

ANALYSE DES MECANISMES DE DEGRADATION DES PERFORMANCES DES OUVRAGES D'ART EXISTANTS BASEE SUR LES MODELES DE CONNAISSANCES ET L'INGENIERIE FORENSIQUE Application aux ponts dans les pays tropicaux " cas du Congo "

Sylvain Ndinga Okina

▶ **To cite this version:**

Sylvain Ndinga Okina. ANALYSE DES MECANISMES DE DEGRADATION DES PERFORMANCES DES OUVRAGES D'ART EXISTANTS BASEE SUR LES MODELES DE CONNAISSANCES ET L'INGENIERIE FORENSIQUE Application aux ponts dans les pays tropicaux " cas du Congo ". Sciences de l'ingénieur [physics]. UNIVERSITE MARIEN NGOUABI (CONGO); Université de Bordeaux (I2M), 2019. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-03112843⟩

HAL Id: tel-03112843

https://theses.hal.science/tel-03112843v1

Submitted on 22 Jan 2021

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.



HAL Authorization

UNIVERSITE MARIEN NGOUABI

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

Année : 2018 - 2019

N° d'ordre : ____ /2019/MEI-GC/DFD/ENSP

THESE

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE MARIEN NGOUABI

CODIRECTION ENTRE L'UNIVERSITE MARIEN NGOUABI ET L'UNIVERSITE DE BORDEAUX

Formation Doctorale : **Sciences de l'Ingénieur**

Parcours/Option **: Génie Civil**

Spécialité : **Génie Civil**

présentée et soutenue publiquement

par

NDINGA OKINA Sylvain

Titulaire de Master en Génie Civil

Le 21 Octobre 2019

TITRE

ANALYSE DES MECANISMES DE DEGRADATION DES PERFORMANCES DES OUVRAGES D'ART EXISTANTS BASEE SUR LES MODELES DE CONNAISSANCES ET L'INGENIERIE FORENSIQUE

Application aux ponts dans les pays tropicaux « cas du Congo »

Directeur(s) de Thèse

Paul LOUZOLO-KIMBEMBE, Professeur titulaire, ENS/UMNG, Congo

Denys BREYSSE, Professeur des Universités, Univ. Bordeaux, France

Encadrant

Franck SFILIGOÏ-TAILLANDIER, HDR Maître de Conférences Univ. Bordeaux, France

Jury

Président : **Bernard M'PASSI MABIALA,** Professeur titulaire, FST/UMNG, Congo

Rapporteurs : **Laurent PEYRAS**, Professeur. Univ. Aix-Marseille/IRSTEA, France

Paul Sand MOUSSOUNDA, Professeur titulaire, FST/UMNG, Congo

Examinateurs : **Franck SFILIGOÏ-TAILLANDIER**, HDR, Maître de Conférences Univ. Bordeaux

Denys BREYSSE, Professeur des Universités, Univ. Bordeaux, France

Paul LOUZOLO-KIMBEMBE, Professeur titulaire, ENS/UMNG, Congo

Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

Chaire UNESCO en sciences de l'ingénieur (Congo)

DEDICACES

" Celui qui ne sait pas d'où il vient ne peut savoir où il va car il ne sait pas où il est. En ce sens le passé est la rampe de lancement vers l'avenir " Archiduc Otto de Habsbourg-Lorraine.

En ces termes, je dédie cette thèse à mes très chers parents, **NDINGA OKINA** Raymond et **NIENGOLI** Micheline, ainsi qu'à ma très chère épouse, Nada **NDINGA** née **ETOKA-LOSSEKI**. A toi Nathan J.**NDINGA OKINA** et tes cadets, cadettes, que cette thèse soit pour vous un témoignage effectif des faveurs illimitées de notre **Dieu** face aux obstacles à franchir dans la vie !

PREAMBULE

Cette thèse a débuté en 2015 à l'Université Marien N'GOUABI sous la direction du Professeur Paul **LOUZOLO-KIMBEMBE**. Sa direction a été renforcée avec l'engagement soutenu du Professeur Denys **BREYSSE** à travers la convention de codirection N° UB17-057 de mars 2017 entre l'Université Marien N'GOUABI (Congo) et l'Université de Bordeaux (France). Cette convention a été signée respectivement par : d'une part, le Professeur Jean-Rosaire **IBARA**, Recteur de l'Université de Marien N'GOUABI, le Professeur Manuel **TUNON DE LARA**, Président de l'Université de Bordeaux. Et d'autre part, le Professeur Paul **LOUZOLO-KIMBEMBE**, Directeur de thèse (Université de Marien N'GOUABI) et le Professeur Denys **BREYSSE** Directeur de thèse (Université de Bordeaux).

La thèse s'est déroulée de manière alternée entre les deux Universités :

A l'Université Marien N'GOUABI, elle a été suivie à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique (ENSP) dans le cadre de la formation doctorale de la Chaire UNESCO en Sciences de l'Ingénieur : Unités de recherches, Département de la formation doctorale, BP 69. Brazzaville, Congo.

A l'Université de Bordeaux, la thèse s'est déroulée au sein du Laboratoire de l'Institut de Mécanique et de l'Ingénierie de Bordeaux (I2M), au département de Génie Civil et de l'Environnement (GCE) : Unités de recherches UMR 5295, Bâtiment B18, Allée Geoffroy Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex.

RESUME

Les ouvrages d'art (ponts, tunnels) liés aux infrastructures de transport dans certains pays tropicaux en développement (Congo, Cameroun, Congo RDC, Inde…) sont constamment influencés par des facteurs multiples comme un environnement naturel agressif et des charges de trafic importantes ou mal contrôlées, dont les effets accélèrent le vieillissement et les défaillances précoces. Cela se traduit souvent par une réduction de leurs performances, qui se situent fréquemment en dessous du niveau acceptable. Afin de prévenir et d'atténuer ces situations, les gestionnaires en charge de ces ouvrages doivent disposer des outils efficaces permettant d'améliorer leurs pratiques en matière de gestion et de maintenance. Il est de plus en plus nécessaire de rassembler des connaissances sur ces infrastructures, notamment leur état et histoire, ainsi que sur la maintenance. Cet objectif souffre de la variété des contextes et de la complexité du domaine de gestion des ouvrages, ainsi que de l'insuffisance et l'hétérogénéité des données. Pourtant des outils de gestion des ponts existent dans le monde (PONTIS, BRIDGIT, IQOA), mais leur mobilisation pour la description des évolutions des ouvrages nécessite un volume important de données. Aussi, le besoin motivé des experts du domaine d'échanger des informations et de partager une certaine compréhension commune du contenu de l'information est une nécessité en pratique de gestion de parc d'ouvrages d'art. Notre travail se focalise sur l'analyse holistique s'appuyant sur les modèles de connaissance et sur l'ingénierie forensique pour examiner des ponts qui ont connu une défaillance, dans le but d'expliquer ce qui peut se passer avant et après la défaillance pour les ponts en cours d'utilisation. Cette approche s'appuie sur la description et la structuration logique des connaissances en mobilisant les capacités des Graphes Conceptuels (vocabulaire, organisation des connaissances génériques et factuelles, simulations graphiques des faits). Cette modélisation repose sur des raisonnements logiques (déterministes, possibilistes) pour organiser les connaissances nécessaires à des fins d'applications multiples en génie civil (analyse d'altérations de matériaux/composant, ingénierie forensique, analyse de performances ou de fiabilité…). L'utilité d'un tel outil est triple :

- modéliser la connaissance utile du domaine en format manipulable (vocabulaire, formalisme, contenu) pour faciliter la communication entre experts et leurs outils ;
- développer une vision d'ingénierie forensique axée sur des simulations (numériques) de la connaissance, afin d'enrichir les pratiques existantes d'analyse de défaillances, d'inspection, du suivi et évaluation des états des ponts ;
- aider à de meilleures décisions pour intervenir sur des ouvrages nécessitant un suivi, une réparation, ou un remplacement.

Mots-Clés : défaillances des ponts, dégradation de performance, ingénierie forensique, simulations, modèle de connaissances des ponts, incertitudes en gestion des ponts, altérations de matériaux.

ABSTRACT

Structures (bridges, tunnels) related to transport infrastructure in some developing tropical countries (Congo, Cameroon, DRC Congo, India…) are constantly influenced by multiple factors like an aggressive natural environment and traffic, the effects of which accelerate aging and early failures. This often results in a reduction in performance, which is frequently below the acceptable level. In order to prevent and mitigate these situations, the managers in charge of these structures must have effective tools to improve their management and maintenance practices. There is a growing need to gather knowledge about these infrastructures, including their condition and history, as well as maintenance. This objective suffers from the variety of contexts and the complexity of the field of asset management, as well as the scarcity and the heterogeneity of the data. Bridge management tools exist worldwide (PONTIS, BRIDGIT, IQOA…), but their mobilization for describing the evolutions of the structures requires a large amount of data. Also, the motivated need of domain experts to exchange information and to share a common understanding of the content of information is a necessity in bridge management practice. Our work focuses on a holistic analysis based on knowledge models and forensic engineering examining at failed bridges in order to explain what can happen before and after the failure of bridges under use. This approach is based on the description and logical structuring of knowledge by mobilizing the ability of Conceptual Graphs (vocabulary, organization of generic and factual knowledge, graphical simulations of facts). This modeling is based on logical reasoning (deterministic, possibilistic) to organize the knowledge needed for multiple applications in civil engineering (analysis of material/component alterations, forensic engineering, performance analysis or reliability…). The utility of such a tool is threefold:

- To model a useful domain knowledge in a practicable format (vocabulary, formalism, content) to facilitate communication between experts and their tools;
- To develop a vision of forensic engineering based on (numerical) simulations of knowledge, in order to enrich the existing practices of inspection, monitoring and evaluation of bridges conditions ;
- To assist in better decisions to carry works on structures requiring follow-up, repair, or replacement.

Keys-Words: bridge failures, performance degradation, forensic engineering, simulation, bridge knowledge model, uncertainties in bridges management, alterations of material.

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier les signataires de la convention de thèse dans les deux Universités sans qui rien n'aurait été possible.

J'adresse mes remerciements au Président du jury, le Professeur M'PASSI MABIALA Bernard qui a bien voulu accorder de l'intérêt à ce travail et d'accepter de présider le jury.

Je souhaite remercier les deux rapporteurs de cette thèse, le Professeur Paul Sand MOUSSOUNDA et le Professeur Laurent PEYRAS, qui ont, non seulement, accepté la tâche de lire ce manuscrit pendant l'Eté mais aussi de rédiger un rapport d'évaluation à son sujet. Je désire ensuite remercier les examinateurs de ce manuscrit (membres du jury) pour leur travail d'analyse et pour toutes les réflexions qu'ils auront partagées avec moi lors de la soutenance.

J'adresse chaleureusement mes remerciements à mes deux Directeurs de thèse, le Professeur Paul LOUZOLO-KIMBEMBE et le Professeur Denys BREYSSE, ainsi qu'à mon encadreur, le Maître de Conférences Franck TAILLANDIER, pour m'avoir accompagné dans l'aventure de la thèse. Ils ont, par leurs précieuses contributions et par leurs conseils, contribué à enrichir considérablement la qualité de ce mémoire. Je tiens aussi à remercier particulièrement à M. Cédric Baudrit (CNRS, I2M) qui a contribué de façon soutenue en qualité d'encadrant de la thèse près du Professeur Denys BREYSSE et du Maître de Conférences Franck TAILLANDIER. Son intervention a été considérable sur les aspects des outils et de la modélisation de connaissances. De plus, le Professeur Denys BREYSSE et le Maître de Conférences Franck TAILLANDIER, ont permis à ce que je présente une communication dans le cadre de la Conférence du Génie Civil des 33ème Rencontres Universitaires de Génie Civil (France).

Un grand merci à toutes les personnes qui m'ont accordé leur disponibilité notamment : Professeur Désiré LILONGA-BOYENGA (Directeur ENSP), M. Romain NIERE (Directeur Adjoint ENSP), Professeur Louis MATOS (ENSP, Chaire UNESCO), le Professeur Jean-Christophe BATSALE (Directeur I2M), M. Bernard OWASSA (ENSP), pour la facilitation des démarches administratives. M. Louis AHOUET (BCBTP, ENSP) et M. Lambert OLEA (Ministère de l'Entretien Routier) pour la collecte de données et des discussions sur l'exploitation des ouvrages d'art dans le contexte national (Congo). M. Christophe FERNANDEZ (CNRS, I2M), Jean-Marc SIBAUD pour leur assistance sur des questions informatiques. Mme Isabelle DUSANIER pour sa disponibilité et le suivi administratif à Bordeaux durant mes années de thèse. Je tiens à remercier toutes les personnes suivantes pour leurs conseils : M. Hyppolite ODIKA, M. David BILEMBI, M. Germain GUIMBI, M. Narcisse MALANDA, tous enseignants à l'ENSP. Un grand merci à M. Cyrille IPOYI (DG Ets LA NDINGA SERVICES) pour son soutien.

Je remercie mes parents pour leur soutien, Nada NDINGA pour son assistance sur la mise en forme du mémoire, Bienvenu EBATA pour sa disponibilité durant mes années de thèse. Je tiens à exprimer toute ma sympathie à l'ensemble des membres, permanents et doctorants, du département GCE du laboratoire I2M qui ont rendu ces années passées à Bordeaux agréables. Je remercie mes collègues doctorants : Quynh, Ghina, Cécile,Waffa, Hassan, etc.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES ..... **ii**

PREAMBULE ..... **iii**

RESUME ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

REMERCIEMENTS ..... **vi**

TABLE DES MATIERES ..... **vii**

Table des figures ..... **x**

Liste des tableaux ..... **xv**

Abréviations ..... **xvi**

Symboles ..... **xvii**

INTRODUCTION GENERALE **1**

Chapitre 1 Revue des pratiques actuelles d'exploitation de patrimoines d'ouvrages d'art existants (ponts) en milieu tropical et approches de modélisation de données **6**

1.1- Caractéristiques des patrimoines techniques de génie civil *6*

1.1.1- Les enjeux d'exploitation de patrimoines de génie civil 7

1.2- Pratiques actuelles de gestion patrimoniale au Congo *11*

1.2.1- Politique institutionnelle actuelle d'exploitation des ponts 11

1.2.2- Le parc d'ouvrages d'art liés au transport 13

1.2.3- Des constats 14

1.3- Outils de gestion patrimoniale des ponts dans le monde *17*

1.3.1- IQOA 95 et ses dérivées en France 18

1.3.2- L'outil VSC 20

1.3.3- PONTIS 90 et ses dérivées 21

1.3.4- BRIDGIT 23

1.3.5- Outil développé en Suisse pour le compte d'OFROU 24

1.4- Approches et méthodes pour l'analyse de risques sur les ouvrages *26*

1.4.1- Approches internes pour l'analyse des défaillances de systèmes 29

1.4.2- Les approches d'expertise pour l'analyse de défaillances 36

1.4.3- Illustration de quelques travaux 39

1.5- Outils de modélisation des connaissances en génie civil *43*

1.5.1- Modèle d'ontologie de domaine 43

1.5.2- Modèle basé sur le BIM 50

1.5.3- Bilan sur les modèles Ontologie de domaine et BIM 53

1.5.4- Positionnement de la thèse par rapport à la modélisation 54

1.6- Synthèse du chapitre ... 55

Chapitre 2 Graphes conceptuels et organisation de la connaissance pour décrire et analyser les défaillances des ponts existants ... 57

2.1- Incertitudes en matière d'exploitation des ouvrages d'art existants ... 59
2.1.1- Incertitudes aléatoires ... 59
2.1.2- Incertitudes épistémiques ... 59
2.1.3- Incertitudes heuristiques (et organisationnelles) ... 60

2.2- Notion de connaissance du domaine ... 62
2.2.1- Notion de concept ... 62
2.2.2- Notion de relation ... 63

2.3- Modélisation des différents modèles de la thèse ... 65
2.3.1- Modèle de connaissances ... 65
2.3.2- Modèles proposés dans la thèse ... 65
2.3.3- Outils pour la modélisation ... 66

2.4- Etapes nécessaires de la modélisation ... 72
2.4.1- L'étape 1 : spécifier les objectifs du modèle et le domaine ... 72
2.4.2- L'étape 2 : Acquérir et valider les informations du domaine ... 73
2.4.3- L'étape 3 : Formaliser les connaissances utiles ... 73
2.4.4- L'étape 4 : Construire le modèle conceptuel ... 73
2.4.5- L'étape 5 : Implémenter le modèle conceptuel et applications ... 73
2.4.6- L'étape 6 : Exploiter/valider le modèle conceptuel (structurer le modèle de simulation) ... 74

2.5- Capacités des graphes conceptuels pour l'analyse des défaillances ... 74
2.5.1- Conceptualisation de graphes de faits pour l'analyse des états d'ouvrages ... 76
2.5.2- Cadre des règles expertes pour expliquer les Faits ... 78
2.5.3- Opérations de projection des requêtes pour exploiter les graphes stockés ... 85
2.5.4- Procédure proposée pour l'analyse de défaillances ... 88

2.6- Synthèse du chapitre ... 91

Chapitre 3 Modèle conceptuel unifiant les connaissances des ponts pour améliorer l'efficacité des pratiques d'exploitation, cas des pays tropicaux-Br3KM ... 93

3.1- Domaine d'étude et objectifs de la modélisation Br3KM ... 93
3.1.1- Objectifs de la modélisation Br3KM ... 93
3.1.2- Domaine et sous-domaines de la modélisation Br3KM ... 94
3.1.3- Sources et processus d'acquisition de l'information sur les ponts existants ... 96

3.2- Identification et analyse forensique des défauts sur les ponts existants ... 97
3.2.1- Détériorations et défaillances des ponts suivant le type constructif ... 99
3.2.2- Détériorations et défaillances des ponts suivant l'état des matériaux ... 110
3.2.3- Base statistique des détériorations des ponts en milieu tropical ... 111
3.2.4- Bilan du vocabulaire des connaissances ... 119

3.3- Structuration et implémentation du modèle M1 de la modélisation Br3KM ... 128
3.3.1- Formalisation des connaissances d'ingénierie des ponts ... 129
3.3.2- Illustration de la structure conceptuelle des connaissances implémentées ... 132

3.4- Structuration des Faits génériques ... 133
3.4.1- Graphes de faits génériques à l'échelle de l'ouvrage et du composant ... 133
3.4.2- Graphes de faits génériques de l'environnement et de processus d'altération ... 134

3.4.3- Cadre d'analyse fonctionnelle par la logique des Graphes Conceptuels 136

3.5- Organisation et implémentation de la modélisation Br3KM 139
3.5.1- Unification globale des connaissances organisant le domaine d'étude 139
3.5.2- Implémentation du modèle conceptuel unifié dans la plate-forme CoGui 142

3.6- Contributions originales et synthèse du chapitre 143
3.6.1- Contributions originales 143
3.6.2- Synthèse du chapitre 144

Chapitre 4 Exploitation du modèle conceptuel des connaissances de l'ingénierie des ponts pour la simulation des états d'ouvrages et leurs modes de défaillances 145

4.1- Modèle de simulation pour l'analyse des défaillances des ponts 145
4.1.1- Modélisation multi échelle de système de type pont 147
4.1.2- Cadre de règles expertes pour la simulation des facteurs de défaillance 151

4.2- Cadre de simulation déterministe de mécanismes de défaillance 161
4.2.1- Description de mécanisme de modes défaillance liée à un processus brutal 161
4.2.2- Simulations de mécanismes de défaillance liées à l'altération de matériaux 168

4.3- Base conceptuelle de faits de défaillances pour l'ingénierie forensique 173
4.3.1- Base de requêtes et de règles expliquant des défaillances similaires 174

4.4- Cadre d'aide au diagnostic, à la décision et synthèse du chapitre 179
4.4.1- Prémices d'une base d'aide à la décision 179
4.4.2- Procédure proposée pour exploiter et interroger le cadre d'aide à la décision 181
4.4.3- Synthèse du chapitre et contribution des simulations numériques 182

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 184

BIBLIOGRAPHIE 187

ANNEXES 202

Annexe 1 : Résultats des simulations du vieillissement naturel d'ouvrages 202

Annexe 2 : Base de cas (Rex) sur les défaillances de ponts en milieu tropical 203

Annexe 3 : Vocabulaire technique des connaissances du domaine 206

Annexe 4 : Cadre de modélisation conceptuelle unifiée (M1) du modèle Br3KM 208

Annexe 5 : Graphes de cadre de simulations des modes de défaillances des ponts 210

Annexe 6: Illustration des graphes d'interrogation de la base de Faits de défaillances des ponts 217

Table des figures

Figure 1 : *Architecture de Br3KM* 4

Figure 1.1 : *Schéma d'interaction des acteurs d'infrastructures (Congo)* 12

Figure 1.2 : *Extrait des statistiques des actifs d'ouvrages d'art exploités au Congo* 14

Figure 1.3 : *Illustration de l'état du vieillissement avancé des ponts au Congo* 14

Figure 1.4 : *Extrait des ponts existants au Congo, (a) ancien ouvrage, (b) nouvel ouvrage* 15

Figure 1.5 : *Extrait- 1- de cas de ruine des ponts au Congo* 15

Figure 1.6 *: Extrait- 2- de cas de ruine des ponts au Congo* 16

Figure 1.7 : *Extrait des statistiques des états d'ouvrages d'art existants (Congo)* 17

Figure 1.8 : *Interface du l'outil IOQA* 19

Figure 1.9 : *Programmation des actions avec l'outil VSC* 21

Figure 1.10 : *Interface de l'outil PONTIS* 23

Figure 1.11 : *Extrait de bloc diagramme fonctionnel d'un système [ZWI 96]* 31

Figure 1.12 : *Extrait d'un cadre de raisonnement en ingénierie forensique* 38

Figure 1.13 : *Profils de performances, a) de dégradation, b) d'évolution et d'intervention* 40

Figure 1.14 : *Démarche d'aide à l'expertise des barrages [PEY 06]* 41

Figure 1.15 : *Exemple de scénario des défaillances d'un système global* 42

Figure 1.16 : *Extrait du modèle BrOntEx des ponts en acier [HEL 13]* 49

Figure 1.17 : *Extrait de résultats de requête d'interrogation du modèle [HEL 13]* 50

Figure 1.18 : *Illustration du modèle BIM - Ontologie (JHA) [ZHA15]* 52

Figure1.19 : *Illustration du modèle d'évaluation de ponts[MC-G14]* 53

Figure 2.1 : *Pyramide des besoins de la connaissance pour la gestion des ponts* 57

Figure 2.2 : *Enjeu de l'ingénierie forensique sur ouvrage non documenté* 60

Figure 2.3 : *Enjeu de transfert logique d'informations de diagnostic d'ouvrages* 61

Figure 2.4 : *Extrait de la base de connaissance hiérarchisée* 67

Figure 2.5 : *Mécanisme de raisonnement, graphes conceptuels et logique [CHE 95]* 68

Figure 2.6 : *Extrait des capacités de CoGui 2.0b5 en trois couches* 70

Figure 2.7 : *Etapes de modélisation holistique (connaissances, modèles)* 72

Figure 2.8 : *Système de génie civil en contexte de l'analyse des défaillances* 75

Figure 2.9 : *Graphe de fait initial, l'environnement agressif affecte le système d'ouvrage* 77

Figure 2.10 : *Simulation, (a,b) des règles, (c ,d) fait initial et fait simulé* 79

Figure 2.11 : *Règle experte du vieillissement d'ouvrage, (a) graphe de la règle, (b) formule de modélisation physique de la règle* 82

Figure 2.12 : *Graphe de Fait initial du vieillissement d'ouvrage* 82

Figure 2.13 : *Evolution de l'état d'altération du temps ti= 0, α = 0.5, Δt=1 et t= 1* 83

Figure 2.14 : *Variation de l'état d'altération suivant la croissance du vieillissement* 84

Figure 2.15 : *Interrogation de fait spécifique par projection de requête (a, b, c)* 86

Figure 2.16 : *Historique de l'évolution de l'état d'altération de système d'ouvrage reconstitué par la projection de requête* 87

Figure 2.17 : *Vision de diagnostic de systèmes dégradés [BOI 00]* 88

Figure 2.18 : *Approche proposée pour l'analyse de défaillances des ponts en 3D* 89

Figure 2.19 : *Phases de mise en œuvre de l'approche d'analyse des défaillances en 3D* 90

Figure 2.20 : *Résumé des étapes de modélisation* 92

Figure 3.1 : *Vision globale de l'organisation du domaine des constructions* 95

Figure 3.2 : *Extrait d'illustration de ponts en arc* 100

Figure 3.3 : *Illustration de mode de fonctionnement de ponts en arc [SAR 16]* 100

Figure 3.4 : *Illustration d'un cas d'altération de pont en arc [RAI 09]* 102

Figure 3.5 : *Extrait de pont à poutre-treillis* 103

Figure 3.6 : *Extrait de détérioration/ défaillance de pont treillis* 104

Figure 3.7 : *Illustration des détails constructifs d'un pont à poutres-caissons [MDO 05]* 105

Figure 3.8 : *Extrait de défaillance d'un pont à poutres-caissons [BRI 09]* 106

Figure 3.9 : *Illustration d'un type constructif de pont à poutres-mixtes* 106

Figure 3.10 : *Illustration des défauts de pont à poutres-mixtes* 107

Figure 3.11 : *Illustratif du schéma de pont à câbles suspendus [LCP 89, HOP 84]* 109

Figure 3.12 : *Extrait de cas de défaillance des ponts à câbles, (a, b) [MAR 12], (c, d) [ROS 84, PET 94, FEL 97]* 110

Figure 3.13 : *Facteurs primaires associés à la détérioration des ponts en milieu tropical* 115

Figure 3.14 : *des défaillances causées par l'affouillement et détériorations* 116

Figure 3.15 : *Des défaillances causées par la corrosion, la collision/surcharges* 117

Figure 3.16 : *Graphe de sélection de concept de base, (a) fait initial, (b) règle, (c) fait spécifique* ... 121

Figure 3.17 : *Graphe pour illustrer le choix du concept général, système d'ouvrage* 122

Figure 3.18 : *Illustration de notre vision de description schématique d'un pont typique* 125

Figure 3.19 : *Description des ponts suivant le type constructif* 129

Figure 3.20 : *Description des ouvrages suivants le matériau principal* 130

Figure 3.21 : *Description des processus d'altération des matériaux d'ouvrage* 130

Figure 3.22 : *Description taxonomique de l'environnement d'ouvrages* 131

Figure 3.23 : *Illustration des connaissances formalisées sous CoGui* 131

Figure 3.24 : *Extrait du vocabulaire implémenté dans CoGui* 132

Figure 3.25 : *Illustration de la structure conceptuelle des connaissances sous CoGui* 132

Figure 3.26: *Graphe de faits génériques, (a) à l'échelle de l'ouvrage, (b) à l'échelle du composant* . 133

Figure 3.27 : *Graphes de faits générique, (a) à l'échelle de l'environnement, (a) à l'échelle de* 134

Figure 3.28 : *Graphes de faits générique, (a) activité associée à un ouvrage, (b) défaillance d'ouvrages* 135

Figure 3.29 : *Modèle de simulation des états de composant d'ouvrage* 135

Figure 3.30 : *Graphes d'analyse fonctionnelle d'un composant de pont* 137

Figure 3.31 : *Graphes d'analyse fonctionnelle d'un composant de pont* 138

Figure 3.32 : *Graphes d'analyse fonctionnelle d'un composant de pont* 138

Figure 3.33 : *Illustration de l'organisation unifiée du domaine de l'ingénierie des ponts* 140

Figure 3.34 : *illustration de l'interrogation du modèle M1* 141

Figure 3.35 : *Extrait du modèle conceptuel unifié (M1) de la modélisation Br3KM* 142

Figure 4.1 : *Modèle global de simulation des états de performance de système (M2)* 146

Figure 4.2 : *Modèle conceptuel d'organisation multi niveaux de pont, (a) partonomie des composants, (b) partonomie des fonctions* 148

Figure 4.3a : *Graphe de règle de répartition des rôles de pont sur le tablier et l'appui* 150

Figure 4.3b : *Modélisation fonctionnelle à l'échelle du pont et des composants* 150

Figure 4.4a : *Graphe de règle R4.2a pour la répartition de la fonction du tablier* 150

Figure 4.4b : *Graphes de Faits de répartition de la fonction du tablier de pont* 151

Figure 4.5 : *Graphes des règles, R4.3a' et R4.3b' appliquées au processus de corrosion* 154

Figure 4.6 : *Graphe de simulation, (a) fait initial, (b) fait simulé de la contribution de l'air au processus de corrosion* 155

Figure 4.7a : *Graphe des règles expertes pour simuler le processus d'affouillement* 156

Figure 4.7b : *Graphe de fait initial la rivière contribue à l'affouillement* 157

Figure 4.8 : *Graphes de fait particulier rivière contribue à l'affouillement* 157

Figure 4.9 : *Graphes de règles d'estimation de l'agressivité due à l'impact de collision* 158

Figure 4.10 : *Graphe, (a) fait initial, (b) résultat de simulation du choc de trafic* 159

Figure 4.11 : *Extrait du dessin d'échappement du tablier* [KIB15] 162

Figure 4.12 : *Graphe, (a) fait initial du mécanisme d'échappement, (b) règle codée* 163

Figure 4.13 : *Graphe de fait de défaillance par échappement de tablier de pont poutres* 163

Figure 4.14 : *Perte de performance d'un tablier sous l'action d'un choc de trafic* 164

Figure 4.15 : *Graphe de fait de défaillance globale du pont sous l'action du choc* 165

Figure 4.16 : *Graphe de fait initial décrivant le mode de défaillance d'une culée* 166

Figure 4.17 : *Extrait de graphe de fait de perte de stabilité de culée de pont arc* 167

Figure 4.18a : *Fait initial pour décrire le mode de défaillance de tablier suspendu* 168

Figure 4.18b : *Graphe de Fait de mécanisme d'instabilité de tablier suspendu* 168

Figure 4.19 : *Graphe de fait initial décrivant le processus de corrosion du tablier de pont* 169

Figure 4.20 : *Simulations du mécanisme de défaillance de tablier de pont en acier* 170

Figure 4.21 : *Courbe d'altération de matériau par la corrosion, r(t) et A(t)* 170

Figure 4.22 : *Effet de la corrosion du matériau sur la performance résiduelle de la fonction du tablier* 171

Figure 4.23 : *Cadre de simulation de mécanisme de défaillance de pont par affouillement*..... 172

Figure 4.24 : *Graphe de simulation du processus d'affouillement de berges de pont*..... 172

Figure 4.25 : *Localisation des modes de défaillances de tablier, piles du pont*..... 175

Figure 4.26 : *Graphes de requêtes pour interpréter la défaillance du pont Mouyondzi*..... 175

Figure 4.27 : *Graphe explicatif des raisons de la défaillance du pont Mouyondzi*..... 176

Figure 4.28 : *Défaillance du pont Abakpa*..... 176

Figure 4.29 : *Graphe de requêtes*..... 177

Figure 4.30 : *Graphe explicatif des raisons de la défaillance du pont Abakpa-Niki (Nigeria)*..... 177

Figure 4.31 : *Graphe de requêtes appliquées à la défaillance du pont Montrouis* 178

Figure 4.32 : *Graphe d'explication des raisons de la défaillance du pont Montrouis* 178

Figure 3.33 : *Graphe de règles de décision d'intervention sur ouvrage détérioré*..... 179

Figure 3.34 : *Graphes illustratifs de prémices d'aide à la décision de maintenance*..... 179

Figure 3.35 : *Cadre d'aide au diagnostic et à la décision des ponts en détérioration* 180

Figure 4.36 : *Schéma proposé pour l'exploitation du cadre d'aide à la décision*..... 181

Figure 4.37 : *Processus de transfert et de manipulation de connaissances dans la chaîne de décision* 183

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Historique de la gestion patrimoniale d'ouvrage d'art routier 11

Tableau 1.2 : Notation d'état et de prévision des actions (IQOA) [SET 96] 19

Tableau 1.3 : Notation d'indicateur de décision VSC 20

Tableau 1.4 : Condition d'état de composant [KUB 98, CDO 98] 25

Tableau 1.5 : Modèle d'aide aux interventions (KUB-MS) 25

Tableau 2.1 : Synthèse des valeurs de simulations de l'état d'altération (a, b) 84

Tableau 3.1 : Détériorations/ défaillances par type constructif 113

Tableau 3.2 : Détériorations/ défaillances suivant le matériau constitutif 113

Tableau 3.3 : Statistique des détériorations des 50 cas de ponts 114

Tableau 3.4 : Extrait du Rex sur les cas de défaillances des ponts en milieu tropical 118

Tableau 3.5 : Regroupement d'informations par sous-domaine (§3.1.2) 120

Tableau 3.6 : Regroupement des concepts par sous-domaine 123

Tableau 3.7 : Regroupement de concepts selon la position dans la modélisation 123

Tableau 3.8 : Extrait du lexique des connaissances de l'ingénierie des ponts 124

Tableau 3.9 : Description des fonctions de ponts et de ses composants 126

Tableau 3.10 : Table de relations 127

Tableau 4.1 : Echelle de corrélation des grandeurs α et K 152

Tableau 4.2 : Echelles d'interaction entre les facteurs d'agressivité (a, b) 153

Tableau 4.3 : Synthèse des valeurs d'échelles des variables de simulation 164

Tableau 4.4 : Synthèse des variables du processus de corrosion du tablier en acier 171

Tableau 4.5 : Extrait du format ADME-composant de pont existant 181

Abréviations

AASHTO	American Association of State Highway Transportation Officials
AFNOR	Association Française de Normalisation
AMDE(C)	Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets et Conséquences
BCBTP	Bureau de Contrôle du Bâtiment et des Travaux Publics
BIM	Building Information Modeling
BTP	Bâtiment et Travaux Publics
CFCO	Chemin de Fer Congo Océan
CGs	Conceptual Graphs
COGUI	Conceptual Graph editor
ELD	Etat Limite de Durabilité
ELS	Etat Limite de Service
ELU	Etat Limite Ultime
FHWA	Federal Highway Administration
IQOA	Image Qualité des Ouvrages d'Art
ISO	International Organization for Standardization
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussée
LCR	La Congolaise des Routes
MAETDGT	Ministère de l'Aménagement, de l'Equipement du Territoire et des Grands
MEER	Ministère de l'Equipement et de l'Entretien Routier (Congo)
NBI	National Bridge Inventory
NCHRP	Programme National de Rechercher sur les Autoroutes en Coopération
OA	Ouvrage d'Art
OCER	Office Congolais de l'Entretien Routier
OFROU	Office Fédérale des Routes
OWL	Web Ontology Language
PAGER	Projet d'Assistance sur la Gouvernance de l'Entretien Routier
RATP	Régie Autonome des Transports Parisiens
RDC	République Démocratique du Congo
RDF	Ressource Description Framework
RN	Route Nationale
RNTP	Régie Nationale des Travaux Publics
SBC	Systèmes experts à Base de Cas
VSC	Visite Simplifiée Comparée

Symboles

A0, A (t)	Etat d'altération d'un ouvrage ou d'un composant
r0, r(t)	Valeur de la propriété de matériau à un instant
NRa	Niveau de performance attendu
R(t)	Niveau réel de performance résiduelle
d/di	Etat de sûreté d'un système/composant
t	Instant, date
t_0	Date de début
dt	Pas de temps
α	Agressivité de l'environnement
p	Paramètre d'une propriété de composant/ouvrage
Te	Température
HR	Humidité relative
K	Cinétique de processus d'altération
KCor	Cinétique du processus de corrosion
KAff	Cinétique du processus d'affouillement
KChoc	Cinétique du processus de choc
F, F1, F2…	Fonction spécifique
Q#	Requête de projection
R#	Règle de simulation
h_{cr}	Hauteur de crues
V_i	Vitesse du courant d'eau
V_r	Vitesse de trafic
DWT	Poids d'élément de trafic (véhicule, navire)
setValue	Déduire une variable
Math.sqrt	Opération logique de la racine carrée des variables

INTRODUCTION GENERALE

➢ Contexte et justification de la recherche

Les ponts constituent des ouvrages d'art indispensables d'infrastructures de transport permettant de soutenir la croissance des activités socio-économiques d'un pays. Depuis le début de ce millénaire, bon nombre de pays Africains se sont lancés dans la construction des infrastructures de base (transport, production d'énergie électrique, stockage et distribution d'eau, sportif, logement, etc.). Aussi, ces pays ont pris l'option avantageuse de la décentralisation, dans laquelle de nombreuses responsabilités dévolues aux pouvoirs centraux sont délégués aux collectivités locales. Ce transfert de responsabilité aux collectivités locales pour une partie du patrimoine de l'Etat devrait également susciter de nouveaux besoins. Les nouveaux et les anciens « propriétaires » souhaiteront être informés sur l'état effectif des ouvrages dont ils ont ou auront la responsabilité, et auront besoin d'informations utiles pour en rationaliser la gestion technique et financière.

Les ponts représentant d'un point de vue de gestion d'actifs des patrimoines techniques importants de génie civil [LE-G 01, FRA 07] ont été récemment cités comme des éléments critiques des infrastructures dans certains pays tropicaux [PUS 10, DIA 10, BAD11, SEB15, NDI 18]. Particulièrement, pour un bon nombre de pays (Congo, Cameroun, Congo RDC, Nigéria…), la dégradation récurrente des performances de ces ouvrages a été signalée comme un problème majeur pour leur maintenance. Cette dégradation liée généralement aux insuffisances des pratiques de maintenance préventive des actifs existants et aux conditions défavorables de l'environnement, est souvent à l'origine des situations de défaillances précoces des ponts (voir chapitres 1 et 3 pour un constat plus détaillé) [SEB15, EBU 15]. Dans la majorité des cas, ces défaillances sont souvent traduites par des conséquences socio-économiques catastrophiques [FRA 07, STE 03, BRE 09, NDI 18] telles que :

- la croissance de coûts d'exploitation : pont Djiri 2 (Congo), des détériorations enregistrées en juin 2013 (soit 3 ans après la mise en service) ;
- les restrictions de gabarit de trafic : pont Bas-Kouilou, juillet 2013 et pont Niari axe Loudima, décembre 2018 (Congo), suite aux défauts constatés sur les ouvrages ;
- la perte de vies humaine : pont Mouyondzi, le 24 avril 2012, 5 morts et 11 blessés enregistrés à la suite de l'événement (Congo) ;
- la mise en indisponibilité ou la perte de structures : pont Mouyondzi, pont Ange, juin 2015 (Congo RD), pont Abakpa-Niki, juin 2012 (Nigeria), pont Matomb axe Yaoundé-Douala, février 2016 (Cameroun), avec des longs temps d'attente (par exemple, sur le pont Wouri, le temps d'attente a été estimé entre 35 à 75% du temps initial « 54 à 76 h » [DIA 10]).

Quelques sources ont été identifiées comme étant à l'origine des défaillances dans le cadre des investigations menées dans ce travail (chapitre 3). Ces sources concernent, les processus d'altération de matériaux (58% : corrosion, érosion, affouillement, pourriture,…), les erreurs humaines (22% : insuffisance d'entretien, inefficacité des pratiques de maintenance préventive, défauts de conception ou de construction, surcharges), et les aléas tropicaux (10% : inondation ou mousson, crue, volcan, séisme). Dans [STE 99, FRA07], les auteurs estiment que la variabilité de tels problèmes au cours du temps peut influencer la performance des ponts en service, rendant ainsi difficile la prise de décision. Pourtant de nombreux efforts ont été consacrés à la conception et au développement d'outils pour les pratiques de gestion des ponts existants :

- les outils traditionnels de gestion patrimoniale (PONTIS, IOQA…) [FRA 07] ;
- les outils techniques et scientifiques pour, l'évaluation de sûreté d'ouvrages et l'analyse des défaillances [FRA07, FRA 04, O'CO 13, BAR 11, NAN 05] ;
- les modèles de connaissances en génie civil, l'ontologie de domaine [HEL 13, LIU 16, CHA 13, WAN 09b], les modèles BIM [TOL 16, DAV 16, FER 17, ZOU 19].

Mais ces outils sont peu adaptés aux contextes particuliers des pays en développement sus-cités (Congo, Cameroun…). Les raisons de cette limitation peuvent être nombreuses, comme nous le verrons tout au long des chapitres (1 et 2). Il s'agit d'une part des problèmes tels que la disponibilité très limitée des données d'exploitation, l'ampleur et la variété des applications du domaine de gestion patrimoniale. D'autre part, soulignons la diversité des contextes et les difficultés de communications entre experts des sous-domaines en interaction. Evaluer si un pont est capable de remplir ses fonctions nécessite des informations provenant de nombreux domaines (science des matériaux, science mécanique et technologie de la construction, pratiques de gestion, risques et fiabilité, etc.) alors que les données issues de ces domaines en interaction peuvent être hétérogènes en termes de format et de structure, ce qui constitue une source d'incertitudes pour les pratiques en génie civil [LIU 16, BUL 05, SUB 89].

Cela peut soulever des questions n'ayant pas encore de réponse, par exemple : *(a) comment considérer simultanément tous ces domaines afin de construire un modèle complet et pertinent ? (b) comment manipuler et gérer un grand nombre d'informations utiles à des fins d'applications pratiques par exemple en ingénierie forensique) ? (c) quels matériaux ont été utilisés pour la construction ? (d) comment capitaliser les connaissances factuelles du retour d'expérience sur ces ouvrages pour prendre de meilleures décisions ? (e) comment améliorer les décisions des acteurs interagissant dans un contexte de gestion patrimoniale confronté au manque de connaissances utiles ?*

Ces questions évoquent des incertitudes multiples [BUL 05, SCH 08, BAR 11], qui peuvent témoigner de l'évidence de deux enjeux majeurs auxquels les gestionnaires des ponts dans certains pays en développement sont actuellement confrontés : (1) scientifique, (2) gestion et maintenance de ponts existants. L'ampleur des défaillances sur les ouvrages d'art existants, associée à un accès souvent difficile et/ou dangereux pour réaliser des inspections

courantes, ont été récemment indiqués comme des problèmes tendant à limiter la fréquence des interventions sur site [WAN 09b, HEL 13]. Dans ce contexte, l'efficacité des pratiques d'ingénierie et de maintenance préventive pour de tels ouvrages, devrait être améliorée.

Cette amélioration soulève les défis de disposer et de gérer les connaissances qui soient en format exploitable par un humain et par une machine. Dans cette optique, mon travail de thèse se focalise sur **le développement d'une modélisation conceptuelle des connaissances du domaine** ***permettant l'identification et l'analyse des mécanismes de dégradation des performances des ponts existants en zone tropicale*****. La finalité est d'aider à l'amélioration de l'efficacité des pratiques d'exploitation des ponts** (diagnostic, surveillance…). Cet outil intègre une démarche innovante d'analyse holistique de défaillances des ponts qui s'appuie sur le couplage de champs multiples d'applications en génie civil (analyse de risque/altération, ingénierie forensique).

Nous appellerons cet **outil**, **Br3KM « Modèle de connaissances pour les pratiques d'exploitation en trois dimensions des ponts en pays tropicaux ».** Les trois axes (dimensions) d'intérêt de l'outil, dont l'architecture schématique est illustrée sur la figure 1, concernent :

- la modélisation, le transfert et la gestion des connaissances et des situations du domaine ;
- le diagnostic systématique des ouvrages en cours de vieillissement ou ayant connu des situations de défaillances ;
- la prise de décision sur la base d'informations suffisantes (structure, cohérence, réutilisabilité).

L'avantage particulier de cet outil, une fois implémenté sera de développer une dimension d'aide à la décision relative à la gestion des ponts en contexte d'incertitudes. L'idée de base sera d'améliorer et de faciliter la prise de décision sur la base d'indicateurs purement techniques. Le défi d'avoir les informations sur les performances (états de matériaux) avant et après la défaillance est donc un besoin crucial.

La finalité est de capitaliser les connaissances des domaines diverses afin de multiplier des applications en ingénierie et maintenance des ponts existants. Le bénéfice de la mise en place de cet outil est de rendre efficace les pratiques actuelles de gestion et de maintenance préventive des ouvrages en détérioration. Br3KM s'inscrit sur les enjeux actuels du génie civil qui sont maintenant axés vers la modélisation numérique d'informations du domaine, ceci dans le but de faciliter : la disponibilité, la transmission et la manipulation (et la gestion) d'un grand nombre d'informations utiles améliorant ainsi la communication entre experts du métier et les gestionnaires d'ouvrages [GIL 08].

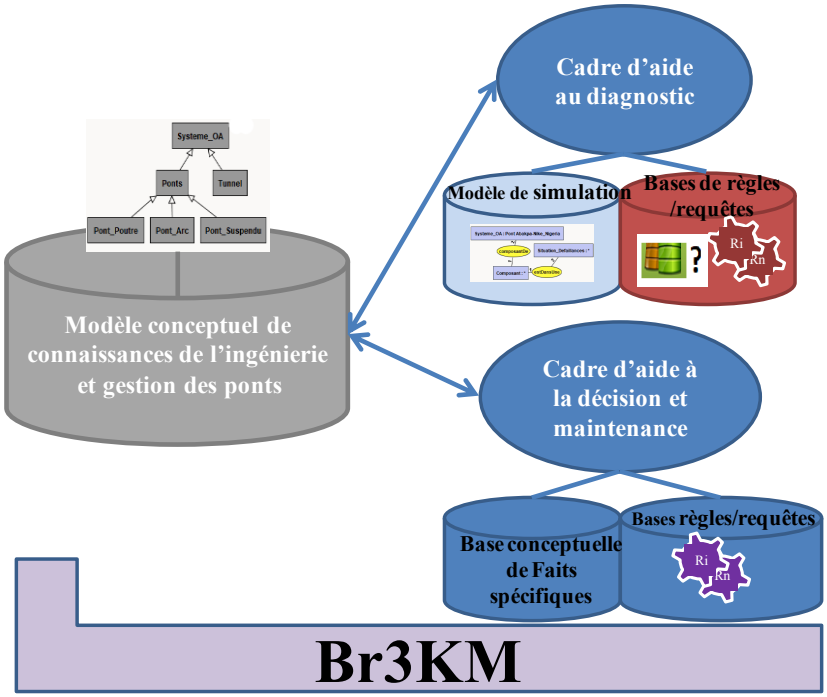


Figure 1 : *Architecture de Br3KM*

➢ **Objectifs spécifiques de la thèse**

Face aux enjeux majeurs identifiés, cette thèse poursuit trois objectifs principaux :

- identifier les cas de défaillances les plus redoutés sur les ponts existants dans les pays tropicaux (au niveau local, sous-régional et dans le monde) et en analyser les causes primaires ainsi que les conséquences. Les informations sur ces défaillances étant obtenues, on construira une base contenant « 50 cas » de défaillances des ponts en zone tropicale pour enrichir l'expertise (chapitre 3).
- étudier les différents outils techniques et scientifiques disponibles en génie civil (approche, méthode, outils de gestion patrimoniale des ponts, modèles de connaissances…). L'intérêt va être de relever leurs limites et les possibilités d'adaptation par rapport à la problématique de la thèse.
- structurer un modèle conceptuel unifié de connaissances du domaine pour les pratiques d'ingénierie et de gestion des ponts en zone tropicale. Cet outil ouvre à des applications spécifiques en ingénierie des ponts (analyse des défaillances, évaluation de performance…). L'idée est de formaliser un cadre plus avancé de diagnostic des états des composants ou d'ouvrages grâce aux capacités des Graphes Conceptuels (simulations logiques, description graphiques de la connaissance sur les ouvrages en cours de détérioration).

De tels objectifs, une fois concrétisés, permettront de faire évoluer les pratiques et de capitaliser le retour d'expérience des experts du génie civil, de la phase de projet à celle d'exploitation des ouvrages. Il s'agit dans ce cadre selon [LE-G 04] de « constituer et

maintenir un patrimoine de connaissances, pour gérer un patrimoine et anticiper les besoins futurs ».

- **Organisation du mémoire**

La thèse est constituée de quatre chapitres et des annexes. Le **chapitre 1** dresse un panorama des recherches déjà effectuées dans le domaine de l'exploitation de patrimoines techniques. Cet état est présenté en trois sections :

- les sections 1 et 2 examinent les enjeux de l'exploitation des ouvrages d'art existants de manière générale. Elles exposent les questions couramment posées permettant de dégager un retour d'expérience sur les pratiques actuelles d'exploitation des ponts au Congo. Elles fournissent des informations pertinentes sur les problèmes auxquels les acteurs sont souvent confrontés en matière d'exploitation de patrimoine d'ouvrages d'art (particulièrement au Congo).
- la section 3 présente un examen des différents outils pour la gestion patrimoniale d'ouvrages d'art (ponts) dans le monde, et identifie leurs limites d'application dans le contexte de l'étude.
- la section 4 passe en revue les approches et les méthodes techniques et scientifiques pour les applications en diagnostic d'ouvrages existants (analyse de risques et des défaillances…), et identifie les premiers choix d'outils de modélisation à utiliser dans la thèse.
- enfin, la section 5 identifie les outils de modélisation de connaissances en génie civil et examine quelques travaux menés dans ce champ d'application (modélisation). La revue des modèles disponibles dans les travaux sélectionnés permet de mieux positionner l'intérêt de cette thèse.

Le **chapitre 2**, posant les bases de la contribution originale de ce travail de thèse, examine les incertitudes associées aux pratiques de gestion et de maintenance des ponts existants. Il présente les propositions d'outils, la démarche scientifique adoptée pour la modélisation et illustre les capacités de ces outils sélectionnés.

Le **chapitre 3** est consacré à la production scientifique des connaissances sur les ponts existants en zone tropicale. Il développe le modèle conceptuel unifié du domaine de l'ingénierie et de gestion des ponts en service dans les pays tropicaux.

Le **chapitre 4** porte sur la modélisation multi-niveaux et multi-domaines de mécanismes de défaillances des ponts existants, à des fins d'analyse prédictive et rétrospective des défaillances. Il se focalise sur le développement des modèles de simulation et sur la manipulation de ces derniers en se basant sur des cas d'études. L'intérêt de ces modèles est de faire le pont entre la modélisation numérique (par algorithme informatique) et le diagnostic sur le terrain (valorisation, capitalisation des données). Enfin, dans une dernière partie, les contributions de la thèse seront dégagées au travers d'une conclusion générale.

Chapitre 1 Revue des pratiques actuelles d'exploitation de patrimoines d'ouvrages d'art existants (ponts) en milieu tropical et approches de modélisation de données

La notion de patrimoine est à l'origine associée aux biens de la famille, qui induit une notion d'héritage et par là de gestion dans le temps (on parle aussi de patrimonium, avec pour racine pater ou le père) [GAL 14]. En outre, l'importance diversifiée des actifs (ou ouvrages) de génie civil, qui intègre les notions de conservation et de protection patrimoniale, fait que depuis quelques années on parle également de patrimoine technique aussi bien d'un point de vue culturel que purement technique. Par exemple, avec la « gestion d'actifs » pour les réseaux d'assainissement « asset management » [LE-G 01]. Nous allons dresser dans ce qui suit, un panorama des recherches déjà effectuées, traitant de l'aspect de gestion-maintenance des parcs de ponts, et des outils disponibles en génie civil. Nous analyserons en quoi le recours à une modélisation structurée de connaissances pour ce domaine complexe permettra de mieux en représenter les différentes dimensions et les enjeux que recouvre le recours à une tel modèle.

1.1- Caractéristiques des patrimoines techniques de génie civil

Nous définirons le patrimoine technique de génie civil comme une collection de familles d'ouvrages d'art physiques et distincts, conçus pour assurer une même fonction principale donnée [BRI 05, LE-G 04]. Nous citons ci-après les différents patrimoines techniques associés aux infrastructures de transport qui ont déjà fait l'objet des recherches :

- les réseaux d'assainissement, dont la fonction principale est d'assurer le drainage et l'évacuation d'eaux dans des conditions définies [LE-G 01, LE-G 04, VAS 05, LAR 16].
- les ouvrages d'art représentant des monuments historiques, tels que le pont de pierre à Bordeaux assurant le franchissement du trafic en zone urbaine, ou le bâti culturel, destinés essentiellement aux loisirs et aux activités culturelles [EZZ 09].
- les ouvrages d'art associés aux infrastructures de transport, dont la fonction principale est de franchir les obstacles pour : assurer la continuité des voies, la sécurité de trafic et l'amélioration des flux aux intersections des voies [AND 87, ORC 08, PAT 16, BRI 05, FRA 07].

La longue durée d'exploitation réglementaire (=100ans) associée aux interactions multiples et à l'utilisation prolongée des ponts, constituent un des éléments qui ont conduit certains auteurs de les classer comme des patrimoines complexes à gérer [AND 87, ORC 08, BRI 05, FRA 07]. Ces ouvrages se comportant souvent de manière différente, souffrent de différents types de défauts, ce qui nécessite des actions de maintenance spécifiques. Tout ceci

ajoute à la difficulté de prendre les décisions adéquates lorsque les données ne sont pas disponibles.

Dans la pratique, si pour certains cas d'ouvrages bien connus et réglementés, les gestionnaires disposent d'outils et de méthodes répondant aux enjeux de gestion et de maintenance, dans d'autres cas les choses sont rarement aussi aisées. Les enjeux sont multiples et souvent complexes. C'est le cas pour les patrimoines d'ouvrages disparates et mal connus, avec de multiples contraintes d'exploitation difficiles à maîtriser, qui imposent au gestionnaire de disposer d'outils et méthodes adaptées et efficaces. Par exemple, le problème de communication entre multiples acteurs exploitant des patrimoines conjoints, se pose souvent en raison de manques ou d'insuffisances de données disponibles (besoin de transfert d'information). La notion de patrimoine conjoint concerne l'interaction des ponts ferroviaire et routier (rail-route) dont la gestion implique deux gestionnaires différents.

Le besoin de transfert d'information (communication) peut également s'amplifier par manque d'outils disponibles adaptés pour capitaliser les leçons apprises sur les études de défaillances antérieurs [BRE 12]. Les conséquences catastrophiques des défaillances non anticipées sur les ponts qui posent elles aussi, des contraintes budgétaires, et d'efficacité de stratégies de maintenance, font partie des illustrations des enjeux de communication entre acteurs [SEB 15, ECA 16, BAD 11, FRA 07]. Les enjeux d'exploitation de tels ouvrages sont multiples et peuvent varier d'un contexte à un autre ou de la diversité d'actifs [ORC 08, PAT 16, BRI 05, FRA 07] : enjeux de gestion, enjeux de maintenance technique. Le paragraphe suivant donne un aperçu de ces enjeux.

1.1.1-Les enjeux d'exploitation de patrimoines de génie civil

Dans la littérature, les ouvrages d'art sont définis comme des systèmes complexes de génie civil [CRE 03, MEA 08, ARN 15]. Dans [CRE 03], un ouvrage de génie civil conçu pour assumer une ou plusieurs fonctions, est : « un système formé de composants, de sous-composants, d'acteurs humains, des procédures, et d'une organisation dans un environnement donné, qui à chaque niveau de sa décomposition, remplit des fonctions élémentaires pour contribuer à la réalisation des fonctions globales ». Cette explication de la notion du système en génie civil illustre ce que nous venons d'indiquer (§1.1), en termes de besoin de communication entre les humains qui interagissent de façon continue avec les ouvrages. Face à ce besoin de connaître, un ouvrage d'art sera abordé dans ce travail comme :

> *Un système de génie civil, est une combinaison de composants en interaction qui satisfont des fonctions spécifiques avec un niveau de performance requis (exemple, pont, tunnel, barrage).*

1.1.1.1- Enjeux de gestion patrimoniale de systèmes existants

La gestion de patrimoine d'ouvrages, aussi appelé management d'infrastructures, est un enjeu d'exploitation visant à : « réunir les conditions permettant de préserver la durée d'utilisation des systèmes existants et d'assurer leur renouvellement dans les conditions financières acceptables pour les services et pour l'usager en particulier » [VAN 01, FRA04].

Dans [FHW 99], elle est considérée comme : « un processus systématique de maintien, de mise à niveau et d'exploitation rentable des biens physiques. Elle associe les principes d'ingénierie, les pratiques commerciales et la théorie économique, et fournit des outils qui favorisent une démarche plus organisée, logique à l'égard du processus de décision ». En pratique, on préfère parler de gestion (ou management) de la maintenance [FRA07], qui représente : « un processus décisionnel visant à fixer les enjeux d'exploitation et à définir les décisions à prendre pour répondre à ceux-ci ».

En pratique, les enjeux d'exploitation d'un patrimoine d'ouvrages se traduisent généralement par des questions que les gestionnaires posent en vue d'optimiser la mise en œuvre des stratégies de maintenance les plus appropriées [BOE 09]. Parmi les questions souvent posées, nous en avons identifié cinq qui sont reformulées comme suit :

- *quel est le patrimoine à gérer ?* Cette question vise à définir le périmètre du patrimoine, en procédant notamment à l'inventaire des actifs physiques qui le constituent.
- *quelles sont les données qu'il convient d'acquérir et de gérer pour prendre les décisions les plus opportunes ? Comment acquérir ces données et qu'apporte leur connaissance* ? Ces deux questions renvoient aux besoins d'outils de modélisation et de conservation de connaissances formalisées, ce qui peut nécessiter des adaptations nécessaires par rapport au contexte et aux conditions d'exploitation des ouvrages.
- *quel est l'état des systèmes existants ?* La réponse à cette question permet à l'acteur de se positionner dans une vision de préconisation et de détermination des priorités d'opérations d'intervention ou d'actions de maintenance.
- *quelle est l'évolution des systèmes dans le temps ?* La réponse à cette question permet de planifier les interventions et les ressources nécessaires (matériaux, matériels, budget) pour la maintenance, donc de l'optimisation de stratégies d'interventions.
- *Quelle décision prendre ?* C'est l'étape finale d'une démarche de gestion patrimoniale qui est accomplie à l'issue des étapes précédentes. On est ici dans une logique d'aide à la décision, selon des enjeux qui dépendent du contexte d'étude. Une décision peut porter sur le déclenchement ou la programmation d'actions de maintenance, ou d'opérations d'intervention ou sur une mise en indisponibilité du système (qui peut être relative à la réalisation de l'entretien ou au déclassement de l'ouvrage). La mise en œuvre d'une telle logique d'aide à la décision, nécessite donc la collecte d'informations sur la problématique posée et leur analyse, afin d'identifier les choix possibles et de décider quant à leur application.

Dans tous les cas, les objectifs d'une décision en contexte d'exploitation patrimoniale sont triples : d'une part, assurer l'entretien des ouvrages, d'autre part, minimiser les coûts d'interventions, et le cas échéant, indiquer la nécessité d'investigations complémentaires.

1.1.1.2- Enjeux de la maintenance des ponts

Pour expliciter les enjeux liés à la notion de maintenance, deux définitions nécessitent d'être exposées dans ce qui suit.

La *maintenance* consiste à maintenir en état de fonctionnalité et de durabilité les systèmes existants, de manière rationnelle et économiquement possible, afin de répondre à deux objectifs [AND 87] ; i) conserver l'aptitude au service du système vis-à-vis de la sécurité des personnes, ii) assurer la durabilité du système pour garantir sa disponibilité. Dans [AFN 01, BAR 11], une maintenance d'ouvrage, est une combinaison d'opérations visant à maintenir un système d'étude dans un état de performances acceptables lui permettant d'assurer ses fonctions prévues.

Cette seconde définition à l'avantage d'intégrer deux termes importants (performance, opération de maintenance) qui recouvrent les idées des deux auteurs. Le terme performance qui sera pris en compte dans l'application de l'approche pour l'analyse de défaillances, est capital pour définir les paramètres appropriés renseignant l'outil d'aide à la décision (chapitre 4). Il englobe différents termes interdépendants dans la première définition (durabilité, aptitude au service). Le terme **opération de maintenance**, intègre tous les aspects liés à la mise en œuvre des stratégies de maintenance (réparation, remplacement, etc.) [FRA 07]. Le terme **fonction** prévue recouvre l'ensemble des fonctions pour lesquelles le système a été conçu. Nous notons de ce qui précède, que les objectifs de maintenance d'un système existant visent à la concrétisation sur le terrain des enjeux de gestion patrimoniale selon deux schémas de maintenance [BAR11, AFN 01, ZWI 96, CRE 05, FRA 07, SAN 07] : la maintenance préventive et la maintenance corrective.

La maintenance préventive consiste en des interventions réalisées suivant des critères définis préalablement et des informations disponibles afin de prévenir le système vis-à-vis des situations de défaillances pendant sa durée d'utilisation. Elle peut être, *systématique*, selon un programme défini à l'avance, *conditionnelle* à des temps déterminés pour l'inspection ou pour la surveillance de l'état du système. Dans le cas d'une stratégie de maintenance systématique, les actions de maintenance sont régulièrement effectuées quel que soit la condition d'état du composant de système existant. Une telle stratégie peut conduire à des coûts élevés, bien qu'il puisse réduire le risque de perturbation de l'exploitation de l'infrastructure (par exemple le remplacement d'appareils d'appui sur les ponts).

S'agissant de la stratégie de maintenance conditionnelle, les interventions de maintenance (type et nombre) dépendent de la condition d'état des composants et des résultats d'inspection, qui conditionnent la décision des acteurs. Dans [CRE 03], l'auteur estime qu'une maintenance préventive sera intéressante lorsque les coûts induits par la perte de

performances (respectivement les situations de défaillances) sont élevés. Dans ces conditions, une politique de maintenance conditionnelle doit intégrer le vison prévisionnel (maintenance conditionnelle prévisionnelle), qui pourra davantage prendre en compte de la notion d'organisation et de planification des interventions de la maintenance en s'appuyant sur différents outils d'optimisation [FRA 07, ZHE 91, ZHA 09]. Mais cela peut être rentable lorsque le besoin d'information est traité en amont.

La maintenance corrective consiste en des interventions effectuées en différée (curatives) ou d'urgence (palliative) après que le système ait subit une situation de défaillance. Dans [BAR 11, O'CO 13], les auteurs ont indiqué qu'une stratégie de maintenance corrective sera satisfaisante lorsque les conséquences des défauts sur les ouvrages ne sont pas catastrophiques ou graves, et si la préconisation préventive de ces situations est onéreuse. Dans tous les cas, ce type de maintenance induit souvent des coûts indirects de perturbation de l'exploitation de l'infrastructure et une accumulation de tâches de maintenance.

Notre définition du terme maintenance est :

> *La **maintenance** est une activité qui consiste, en une combinaison d'opérations (actions de maintenance) visant à maintenir le système dans un état de performance acceptable.*

La préoccupation d'un gestionnaire de ce qui précède, est aussi de connaître le type d'actions de maintenance à engager pour entretenir les ouvrages « inspection, réparation, remplacement, surveillance » [SCH08, FRA04]. De tels enjeux qui découlent des objectifs de gestion patrimoniale (§1.1.1.1), posent ainsi des questions relevant purement de la mise en œuvre pratique. Par exemple, (a) quel est l'état de mon ouvrage ? (b) quels sont les types de défauts observables sur les ouvrages ?(c) quel est le budget disponible pour agir ? L'intérêt de la modélisation que nous allons développer dans cette thèse va être aussi de prendre en compte le genre des questions (a et b) par le recours aux dispositifs disponibles (IOQA, PONTIS…) (voir §1.2, §1.3).

Comme nous l'avons noté au paragraphe (§1.1.1.1), l'efficacité des pratiques de gestion patrimoniale d'ouvrages d'art dépend aussi fortement des spécificités du contexte local ou régional ainsi des dispositions institutionnelles du pays [ORC 08, PAT 16, BRI 05, FRA 07]. Cela nous amène à expliciter dans ce qui suit, le périmètre du patrimoine des ponts, et ouvrages connexes dans le contexte national du Congo et les constats sur les pratiques actuelles de la politique de gestion de ces ouvrages d'art.

1.2- Pratiques actuelles de gestion patrimoniale au Congo

1.2.1-Politique institutionnelle actuelle d'exploitation des ponts

Les ouvrages d'art d'infrastructures de transport (routier et ferroviaire) au Congo sont répartis en deux patrimoines : le patrimoine routier et le patrimoine ferroviaire du Chemin de Fer Congo-Océan (CFCO). La politique actuelle d'exploitation de ces deux patrimoines remonte aux années 1960. Elle consiste en de la maintenance préventive conditionnelle. Le patrimoine ferroviaire est exploité par la société CFCO (gestionnaire public-privé). Le patrimoine d'ouvrages routiers, initialement exploité au sein du Ministère (MEER), est actuellement géré par cinq acteurs : MEER, MAETDGT, Fonds Routier, Collectivités locales, LCR. Cette nouvelle organisation fait suite aux lacunes de la gestion antérieure qui a connu une révolution en trois grandes périodes comme l'illustre le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Historique de la gestion patrimoniale d'ouvrage d'art routier

Période / Gestionnaire	1965-1990	1990-2000	2004 (*)
	RNTP	OCER	Fond Routier
Mission	entretien courant de la route	entretien courant de la route	financer le petit entretien
Politique d'entretien	maintenance corrective	maintenance corrective	contrôle des péages
Problèmes identifiés (**)	- insuffisance de communication entre acteurs - déficit en compétences opérationnelles défauts récurrents des routes	- contrainte budgétaire déficit en compétences opérationnelles	insuffisance de budget (***)

(**) **MAETDGT** : financer le gros entretien
Collectivités locales : financer et exécuter l'entretien dans les départements.
(*) : Source [IDA 69],
(***) : Source [PUS 10].

Dans la pratique, cette option d'exploitation à multiples acteurs complexifie généralement les décisions et les pratiques de maintenance préventives, en particulier lorsque les indicateurs d'aide à la décision ne sont pas renseignés [BAR 11, PAT 16]. Dans [IDA 69, BAD 11], les experts ont fait état :

- du déficit en capacité technique opérationnelle dans le domaine de gestion des ponts,
- des carences dans la programmation des actions de maintenance et les contraintes budgétaires,
- du manque d'informations sur les ouvrages et de l'insuffisance de communication entre acteurs (notamment entre experts des champs techniques).

Sur la figure 1.1 ci-après, nous illustrons les carences de communication entre acteurs dans ce contexte de gestion patrimoniale. La figure 1.1a présente l'organisation discutée dans cette partie, et la figure 1.1b illustre les faiblesses d'une telle collaboration dans un cadre opérationnel de partage homogène d'informations en ingénierie.

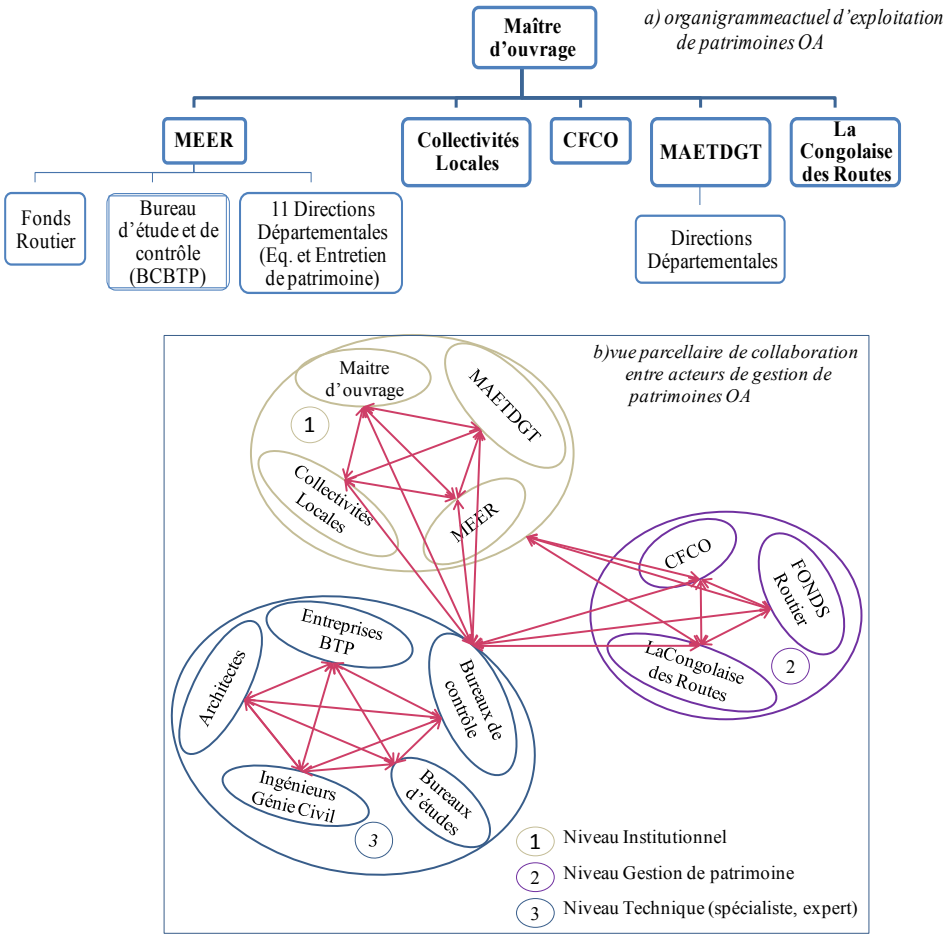


Figure 1.1 : *Schéma d'interaction des acteurs d'infrastructures (Congo)*

Comme le montre la figure 1.1b(1), l'absence de collaboration centralisée dans une telle interaction en trois îles provoque une fragmentation du mode d'interaction entre acteurs et induit des pertes d'informations non formalisées (fig.1.1b). Une conséquence de cette fragmentation est la difficulté de communication entre experts techniques et l'inefficacité des pratiques de gestion, sans compter les coûts qui peuvent en résulter. Afin de minimiser les coûts d'exploitation et de faciliter les échanges entre experts dans ce contexte, il est indispensable de faire des efforts sur la production des connaissances utiles d'ingénierie des ponts existants ; c'est l'un des objectifs de ce travail (chap.3). Dans cette optique, nous proposerons au chapitre 3 (§3.1), un schéma d'organisation homogène entre acteurs en interaction qui prend en compte les difficultés de communication identifiées (fig.1.1b).

Notre ambition de contribuer à l'amélioration de l'efficacité des pratiques de gestion des ponts dans cette thèse tient aussi compte de l'existant. Dans le contexte national du Congo, le

projet d'assistance technique en cours sur la gouvernance de l'entretien routier (PAGER) via la collaboration entre le Congo et la Délégation de l'Union Européenne, certaines données sur l'identification des ouvrages du patrimoine routier sont déjà disponibles (voir *rgrc*[1], consulté le 01 juin 2019). Ces données portent sur la localisation géographique et les statistiques sur l'état des ouvrages d'art dans certains départements du Congo. L'un des principaux objectifs de ce projet est la mise en place d'un système d'information géographique de l'infrastructure routière et des ouvrages d'art associés. La dimension d'ingénierie semble ne pas être a priori prise en compte dans le cadre du projet cité (PAGER). Le paragraphe ci-après donne un aperçu sur les constats physiques de nos investigations sur les deux patrimoines techniques d'infrastructures de transport au Congo.

1.2.2-Le parc d'ouvrages d'art liés au transport

La discussion précédente (§1.2.1) permet de noter quelques différentes caractéristiques des patrimoines concernés par rapport à d'autres secteurs industriels. La première caractéristique est l'hétérogénéité structurelle et la disparité des ouvrages qui les composent. Cela peut s'expliquer par la diversité des matériaux de structure (bois, maçonnerie, béton, acier, etc.), associée à celle des conditions de sols en place, qui peut présenter une forte variété en termes de problèmes géotechniques/hydrogéologiques impactant la sûreté de l'ouvrage (érosion, écoulement dans le sol…). Le patrimoine d'ouvrages d'art du CFCO compte au total 245 actifs (ponts, dalots, murs de soutènement…) répartis en pourcentage (fig.1.2a,), et celui du secteur routier 394 actifs (fig.1.2b, source rgrc). Aucun indicateur d'aide à la décision (ou de sûreté de fonctionnement - sécurité, durabilité -) sur l'exploitation (disponibilité et maintenabilité) des ouvrages existants n'est définit (p. ex. des indicateurs de durabilité).

La seconde caractéristique concerne l'évolution (vieillissement) rapide des ouvrages, et les stratégies de maintenance préventive souvent signalées comme inefficaces [IDA 69, BAD 11, PUS 10, ECA 16] (fig.1.3). Deux constats peuvent justifier ce point :

- la dégradation récurrente des performances survenant de manière précoce après l'entretien comme illustré par les divers défauts et des conséquences catastrophiques identifiées [NDI 18],
- l'indisponibilité des ouvrages souvent pendant des longues périodes d'attente à la suite de la manifestation soudaine d'une situation de défaillance,
- l'absence ou la faible disponibilité des outils d'aide à la décision dans le domaine de la gestion d'infrastructures [BAD11].

La troisième caractéristique concerne l'absence des données sur l'historique d'exploitation et les défauts des structures. Cette absence est souvent citée en pratique comme

[1] http://rgrc-congo.net/geoportail/index.html

un des facteurs limitant la transposition d'outils disponibles dans le monde dans ce contexte spécifique d'exploitation des ouvrages d'art.

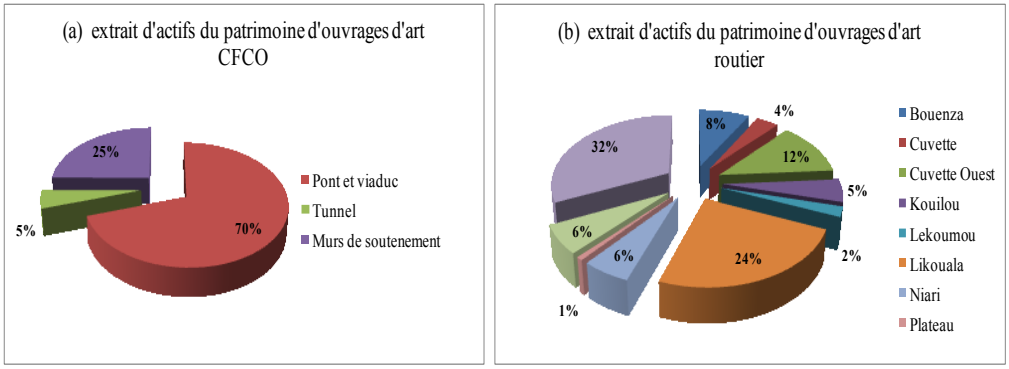


Figure 1.2 : *Extrait des statistiques des actifs d'ouvrages d'art exploités au Congo*

1.2.3-Des constats

1.2.3.1- <u>De l'hétérogénéité des structures d'ouvrages au vieillissement rapide</u>

La figure 1.3 montre un échantillon d'exploitation de ponts à structures hétérogènes et en condition de vieillissement avancé : Les images (fig.1.3 a, b, c) et (fig. 1.4a) illustrent l'état de vieillissement des ponts existants sur le réseau routier et ferroviaire en raison de l'insuffisance de l'entretien. Sur la figure 1.3a, on peut remarquer le niveau catastrophique du vieillissement des ouvrages existants avant leur remplacement (cas du pont Ngoko remplacé par un pont en béton armé en 2013). Ceci risque d'affecter considérablement le niveau de performances attendu et d'augmenter les coûts de maintenance des ouvrages. La figure 1.4(b) illustre une nouvelle construction de pont suspendu en béton armé (en zone urbaine à Brazzaville). D'après nos recherches sur le projet (PAGER) et auprès des gestionnaires de ces infrastructures, les informations sur ces ouvrages consistent essentiellement en des données statistiques d'inventaires de parcs d'ouvrages (voir fig.1.2). Cela justifie le choix des questions que nous nous sommes posées dans ce travail, par exemple : (1) *quel matériau a été utilisé ? (2) quel critère a été utilisé pour classifier les ponts sur le réseau d'infrastructures ?*

(a) pont Ngoko (1970-2013) (b) pont Mvouti (1934-2019) (c) pont Fouta (1934-2019)



Figure 1.3 : *Illustration de l'état du vieillissement avancé des ponts au Congo*

(a) pont Niari (état en 2017) (b) pont Corniche (mise en service en 2017)



Figure 1.4 : *Extrait des ponts existants au Congo, (a) ancien ouvrage, (b) nouvel ouvrage*

1.2.3.2- Des cas des ponts détériorés/ruinés

Les figures 1.5 présentent un extrait du retour d'expérience sur les cas de détérioration et de ruines récurrentes enregistrées sur le patrimoine de ponts au niveau local. La figure 1.5 (a) illustre un cas de ruine de pont en bois sur la route nationale RN1, et la figure 1.5 (b) montre un défaut soudain non documenté du pont Mouyondzi survenu le 24 avril 2012. Sur la figure 1.6 (a), il s'agit d'une détérioration précoce enregistrée au pont Dijri2 (Manianga, soit 3 ans après la mise en service). La figure 1.6 (b) montre la détérioration récurrente au pont Bas-Kouilou (mis en service en 1985), où l'ouvrage a connu une seconde détérioration majeure (2017) peu après la réparation réalisée en 2013. La figure 1.6 (c) illustre les défaillances enregistrées sur les ponts route-rail, et montre dans quelles conditions d'état ou de performance les ouvrages sont exploités. A priori, il existe plusieurs cas de détériorations ou de ruines à l'échelle des deux parcs d'ouvrages d'art au Congo. La figure 1.7 présente un estimatif (image non obtenue) de ces cas relevés dans le cadre du projet PAGER. Mais dans ce travail de thèse, nous allons nous limiter à en sélectionner un échantillon de dix cas obtenus auprès des gestionnaires. En raison du manque d'études disponibles sur ces cas de détériorations des ponts au Congo, cet échantillon sera complété avec des cas de détériorations/ruines relevées sur les ponts existants dans les pays tropicaux. Cela va nous permettre de constituer une base représentative de cas dans ce contexte tropical afin d'enrichir la modélisation proposée dans cette thèse (chap.3).

(a) détérioration pont RN1 (2013) (b) ruine du pont Mouyondzi (12/04/2012)



Figure 1.5 : *Extrait- 1- de cas de ruine des ponts au Congo*

(a) détérioration pont Djiri 2 (06/2013)



(b) défauts pont Bas-Kouilou (2013 et 2017)



(c) défauts des ponts route-rail (Louessé et Niari, 2011)



(C_1) image de l'état du pont global (C_2) image de l'état du platelage



(C_3) image de l'état des composants d'assemblage

Figure 1.6 *: Extrait- 2- de cas de ruine des ponts au Congo*

La figure 1.6 (C_1 et C_2) montre l'état altéré des composants destinés à sécuriser le trafic routier et ferroviaire, et fig1.6 C_3 illustre l'état de détérioration d'éléments verticaux du pont.

Le figure 1.7 est un extrait des statistiques sur les défauts des ouvrages d'art (patrimoines CFCO et routier).

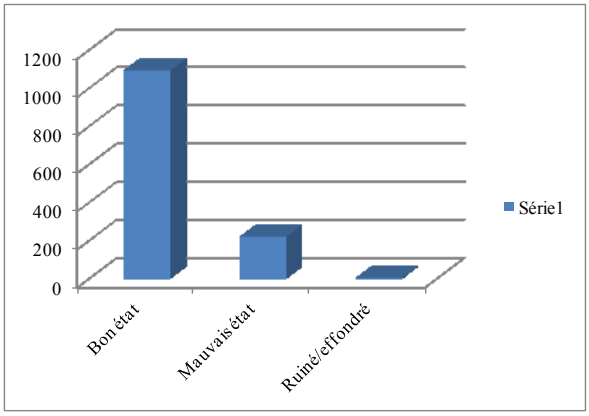


Figure 1.7 : *Extrait des statistiques des états d'ouvrages d'art existants (Congo)*

De ces constats, et sur la base de la littérature [IDA 69, BAD11, PUS 10, BAR11], l'inefficacité des pratiques de gestion de ces ponts peut être liée à quatre problèmes :

- les limitations des budgets d'exploitation qui peuvent aussi s'expliquer par la présence d'un grand nombre de sous-domaines techniques à mobiliser pour répondre aux besoins techniques des gestionnaires ;
- le manque de données pour suivre l'évolution des ouvrages en cours de détérioration avancée ;
- la prise de décisions sur des bases incertaines (par exemple le manque d'indicateurs sur l'évolution de la performance des ouvrages) ;
- les difficultés dans le diagnostic des circonstances des détériorations ou des ruines d'ouvrages existants. Elles peuvent être dues à la fois au manque de connaissances utiles et aux difficultés de communication entre experts du domaine.

L'enjeu majeur de gestion et de maintenance que nous abordons dans ce travail au travers du développement des outils d'aide à la décision est donc de poser des bases pour répondre à des préoccupations primordiales des gestionnaires. La finalité n'est pas de changer les dispositions existantes dans le pays, mais de proposer un outil d'accompagnement technique et scientifique. Il nous faut pour cela examiner les outils de gestion patrimoniale des ponts disponibles dans les pays occidentaux. L'objectif de cette revue est de savoir si ces outils peuvent (ou pas) être adaptés dans le contexte des pays en développement.

1.3- Outils de gestion patrimoniale des ponts dans le monde

L'objectif principal de l'élaboration d'outils de gestion des ponts dans les pays occidentaux était d'après [BRI 05], de doter les gestionnaires des meilleurs moyens pour identifier et inventorier leurs ouvrages afin de limiter le gaspillage des ressources financières. Les quelques outils examinés dans cette partie concernent les outils «IQOA» et ses dérivées

en France [SET 96], «Pontis» et ses dérivées aux USA et dans le monde [THO 98, HAW 98, ROE 01, DE-B 97, BRI 05, MOR 00]. Les axes de gestion couverts dans ces outils sont les suivant : inventaire des ouvrages, évaluation, suivi des ouvrages, et planification des interventions (avec évaluation des coûts de maintenance).

1.3.1-IQOA 95 et ses dérivées en France

IQOA, qui se définit par « Image Qualité des Ouvrages d'Art », est un outil développé en France depuis les années 1990 puis révisé en 1995 [SET 96], pour aider les gestionnaires publics à répondre aux enjeux d'exploitation de patrimoine d'ouvrages d'art. La mise en œuvre de cet outil s'appuie sur une démarche en trois étapes :

- l'inventaire d'actifs, consiste au recensement et à la répartition des ouvrages, par famille constructive ; en nombre et surface totale, et en âge. Cet inventaire est ensuite complété par la description organisationnelle et structurelle de l'ouvrage afin de qualifier les états de santé par partie de l'ouvrage.

- L'évaluation de l'état de santé qui détermine l'image qualité des ouvrages par la notation des états observés de chaque partie ou composant lors de l'inspection. L'agrégation des notes d'un sous-composant vers un composant se fait via l'opérateur Max. La note de l'état global de l'ouvrage est calculée via ce même opérateur Max telle que : classe OA= Max (note classe des parties inspectées). Le seuil d'état limite de santé est fixé par la valeur 3, qui au-delà de laquelle un composant ou un ouvrage sera considéré comme en mauvais état.

Le tableau 1.2 fournie l'extrait de la grille permettant de qualifier l'état de l'ouvrage, apportant ainsi une aide à la prise de décision. Une décision basée sur la note obtenue pour chaque partie ou pour l'ouvrage global et le budget disponible, permettant de planifier les actions d'intervention correspondantes suivant une liste établie. Parmi les actions planifiées, on peut citer le suivi continu de l'évolution des ouvrages tous les 3 ans au cours de laquelle les ingénieurs réévaluent l'état des ouvrages.

Pour capitaliser les données des inspections, un support informatique appelé Lagora, est utilisé pour stocker une base de données du patrimoine. Cette base de données est organisée en deux modules sous forme de fiches ou de procès-verbaux des inspections :

- un module constitué de fiches de synthèse de cotation des états où sur chaque fiche sont listées : les différentes parties de l'ouvrage à inspecter ainsi que les cases correspondantes de notation,
- un module constitué de procès-verbaux des inspections, qui commentent les états observés des ouvrages, avec des croquis représentant physiquement les ouvrages.
  La figure 1.8 illustre un extrait du module de planification des visites de l'IQOA.

Tableau 1.2 : Notation d'état et de prévision des actions (IQOA) [SET 96]

Classe/note	Description
1	**Bon état apparent** (relève de l'entretien courant)
2	**Ouvrage présentant** : - des défauts sur les équipements ou éléments de protection - des défauts mineurs de structure (nécessite un entretien spécialisé sans caractère d'urgence)
2E	**Ouvrage présentant** : - des défauts sur les équipements ou éléments de protection - des défauts mineurs de structure. (nécessite un entretien spécialisé urgent afin de prévenir un risque d'évolution pouvant affecter à court terme la structure, amenant à la classe 3)
3	**Ouvrage dont la structure est altérée** (nécessitant des travaux de réparation sans caractère d'urgence)
3U	**Ouvrage dont la structure est gravement altérée.** Nécessite des travaux de réparation en urgence liés à : - l'insuffisance de capacité portante de l'ouvrage - la rapidité de l'évolution des désordres pouvant y conduire à brève échéance)
Mention particulière	
NE	**Ouvrage non évalué :** - ouvrage neuf n'ayant pas encore été évalué - ouvrage ayant fait l'objet de travaux récents et dont le nouvel état n'a pas encore été évalué - ouvrage dont la structure n'est pas encore évaluée - ouvrage dont l'évaluation remonte à plus de 3ans
S	**Risque pour la sécurité des usagers :** (programmation des travaux en urgence afin d'assurer la sécurité des usagers et d'exploitation).

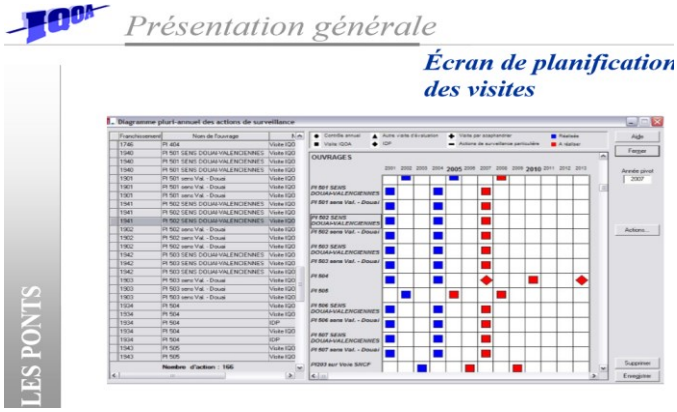


Figure 1.8 : *Interface du l'outil IOQA*

La démarche de gestion des ouvrages d'art au travers l'outil IQOA a permis à certains praticiens (chercheurs, ingénieures) de développer un panorama d'autres outils techniques, spécifiques à chaque type de patrimoine en France [TAR 13]. Nous citons, en exemple, le cas de l'outil VSC«Visite Simplifiée Comparée » qui est présenté dans la partie 1.3.2.

1.3.2- L'outil VSC

VSC «Visite Simplifiée Comparée», est un outil développé par une équipe du LCPC et du Cetmef [FAU 06, FAU 11], pour aider à la gestion de patrimoine d'ouvrages portuaires ou routiers. Contrairement à IQOA, dans VSC la programmation des actions se concentre sur des critères socio-économiques qui sont croisés avec l'évaluation technique de l'ouvrage. La planification des interventions est établie sur le court (1 à 2 ans), moyen (2 à 3ans) et long terme (> 4ans) à l'issue d'une décision basée sur deux indicateurs d'état (fig.1.9) :

- l'indice d'état IE évaluant l'aspect technique de l'ouvrage, résulte lui-même de deux indices : un indice d'état mécanique IEm pour évaluer la partie structurelle de l'ouvrage et un indice d'état d'usage IEu pour évaluer les équipements d'ouvrage. L'indice IE est calculé en prenant le minimum de (IEm) et (IEu). Il est évalué sur une échelle comprenant 4 échelons, chacun étant associé à une action à entreprendre ;
- l'indice stratégique IS visant la programmation stratégique des interventions sur la base des résultats de l'indice IE. La détermination de l'indice IS s'appuie sur des critères basés sur une classification en groupes et familles d'ouvrages ou sur d'autres critères décisionnels tels que : flux de trafic, valeur équivalente de l'ouvrage, la nature du patrimoine, la valeur économique ajoutée, la facilité d'intervention sur l'ouvrage...

Tableau 1.3 : Notation d'indicateur de décision VSC

Notation/ classe de l'état : IE	**Action à entreprendre**
1 : sécurité immédiate non assurée	opération de mise en sécurité à réaliser immédiatement
2 : désordres graves	investigations complémentaires et travaux de réparation à envisager sur le court terme
3 : processus avancé de dégradations des matériaux ou des équipements	entretien spécialisé à planifier sur le moyen terme
4 : bon état apparent	entretien courant à planifier sur le long terme.

La décision sur la base du croisement des deux indices IE et IS (figure 1.9), permet d'être avisé d'une possible situation de défaillances (IE) et des conséquences qui peuvent en résulter (IS). Le fait que les modalités sur ce croisement ne soient pas fixées dans cet outil, permet au décideur de prioriser ses interventions en choisissant lui-même son compromis entre IE et IS. L'intérêt d'un tel outil est de pouvoir développer une vision d'aide à décision basée l'analyse des fonctions de l'ouvrage.

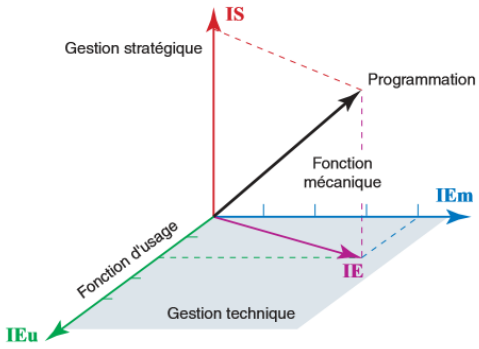


Figure 1.9 : *Programmation des actions avec l'outil VSC*

Un autre outil développé dans la même vision de l'outil IQOA est l'Outil MARION 2003 « Maintenance Assistée du Réseau, Inspections des Ouvrages et Notations » [IDS 08]. Il est dédié à l''inspection et au suivi d'ouvrages dans l'intérêt d'optimisation des interventions au sein du patrimoine de la RATP. L'évaluation de l'état des ouvrages selon la démarche de MARION 2003 s'appuie sur une échelle de 1 « bon état » à 7 « détérioration considérable».

La décision qui résulte de cette évaluation est basée sur la note générale de l'état de l'ouvrage dont l'échelle va de 1 à 6. La planification des interventions est établie à l'image du modèle de l'outil VSC. L'objectif de l'outil était d'améliorer les dispositions réglementaires en place, tels que le schéma directeurs de maintenance des années 90 pour lequel la programmation des interventions a été établie sur des périodes de 10 ans. Cependant, suite à l'évolution de la réglementation qui réduit certaines fonctionnalités de cet outil, [PAT 16] a récemment réalisé un travail de thèse de doctorat pour améliorer les capacités de cet outil en intégrant des modules d'analyse de risque. Pour de plus amples détails, le lecteur est renvoyé à [PAT 16].

1.3.3- PONTIS 90 et ses dérivées

PONTIS est un système de management des ponts (Bridge Management System) développé aux Etats-Unis dans les années 1990 par Cambridge Systematic Inc. Cet outil mis en place sur demande de la FHWA (Federal Highway Administration) dans l'objectif d'optimiser les stratégies de gestion de la maintenance d'infrastructures de transport, est composé de différents modules d'application :

- Une base de données (DB) qui renseigne sur l'ensemble des informations du patrimoine de ponts, telles que : la localisation des ouvrages, l'année de construction, le type d'ouvrage, les matériaux utilisés, le gabarit et le trafic. Dans cette base, les ponts sont décomposés en composants qui les forment et dont les conditions d'état sont ensuite évaluées.
- Un modèle d'évaluation de conditions d'états des composants, qui s'appuie sur la directive nationale d'inventaire des ponts NBI [FHW 95] pour établir la corrélation entre l'état des composants et les constats d'inspection visuelle. La notation de l'état NBI est

réalisée suivant une échelle de 9 notes, où la note 0 (= état défaillant) et 9 (= état excellent). La prévision de l'état repose sur le calcul de l'indice de santé (IH) qui varie de 0% (la pire condition) à 100% (la meilleure condition). Cet indice (IH) pour chaque composant individuel (e) est calculé comme suit [BUL 05] :

$$H_e(\%) = \left\{ \sum_s k_s \, q_s \Big/ \sum_s q_s \right\} 100 \qquad (1)$$

Avec, "s" désigne l'indice de l'état de condition du composant, "q_s", la quantité de composants dans la s-ème état, "k_s", le coefficient d'indice d'intégrité correspondant au s-ème état, est une valeur fractionnelle déterminée dans l'équation (2) :

$$k_s = (n\text{-}s)\ (n\text{-}1) \qquad (2)$$

La valeur de ks est calculée pour s = 1, 2…n et représente le nombre de la condition de l'état dépendant du score de l'échelle FHW de chaque composant. De plus, l'indice IH du pont global peut être également calculé par l'équation 3 :

$$H = \sum_e H_e \, Q_e\text{-}W_e \Big/ \sum_e Q_e \, W_e \qquad (3)$$

Ici, "e" est l'indice d'un composant, We est un facteur de pondération du composant "e", "Qe" est la quantité totale de composants du pont. We est calculé comme le coût de la défaillance ou une valeur empirique. Le lecteur peut consulter [FHW 95, BUL 05] pour plus de détails, par exemple sur les tableaux de notation de l'état, et les valeurs de pondérations empiriques.

- Un modèle pour l'optimisation de maintenance, qui définit pour chaque composant défaillant du pont, la stratégie de maintenance la plus pertinente en s'appuyant sur les résultats d'évaluation de la condition d'état. La stratégie de maintenance dans cet outil consiste en un ensemble d'actions planifiées prenant en compte les évolutions possibles de l'utilité des voies de communication.

La particularité de PONTIS par rapport à IQOA, est le fait que ces modèles d'aide à la décision sont basés sur des simulations (modèle Markovien) [FLY 10 ; GUT 98]. Ces simulations s'appuient sur les données d'inspection, d'historique d'exploitation, des avis d'experts, et les coûts ; elles permettent d'optimiser les pratiques de gestion patrimoniale à l'aide des modèles :

- de planification des interventions qui s'appuie sur les résultats des deux précédents modèles ;
- de prévision de détériorations des ponts

- de coûts des utilisateurs, dans lequel les coûts occasionnés principalement par une déficience de l'utilisation de l'ouvrage (p.ex., une réduction de gabarit de trafic, etc.).

La figure 1.10 illustre l'interface de l'outil PONTIS avec ses différentes fonctionnalités.

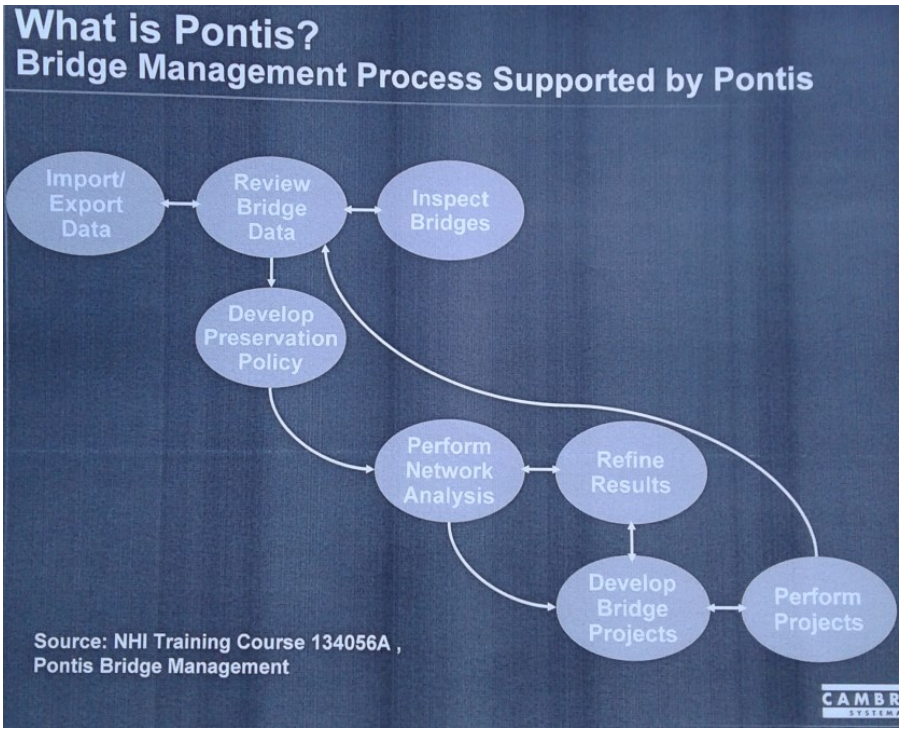


Figure 1.10 : *Interface de l'outil PONTIS*

La démarche de gestion des ponts au travers l'outil Pontis s'est également répandu au niveau national des Etats-Unis avec le développement par exemple de l'outil BRIDGIT [HAW 98, ROE 01, CAI 11], et dans d'autres pays du monde, tels que la Suisse qui en a développé KUBA-DB et KUBA-MS [HAJ 95, ROE 01].

1.3.4-BRIDGIT

BRIDGIT est un progiciel de système de gestion de ponts (BMS) destiné à répondre aux besoins des agences étatiques, locales et autres, en fournissant des conseils sur les décisions de gestion des actifs (ponts, bâtiments). Cet outil développé à travers le Programme National de Rechercher sur les Autoroutes en Coopération (NCHRP), utilise une stratégie d'optimisation de l'ensemble des actions de gestion patrimoniale au niveau du réseau et du projet. Contrairement à PONTIS, BDIDGIT est composé de cinq modules d'aide :

- un module d'inventaire sous forme de base de données permettant d'intégrer un nombre illimité des données sur les composants (ou éléments) de chaque pont, par exemple, la hauteur, la largeur, et l'épaisseur d'une pile.

- un module d'inspection qui stocke les données d'historiques des inspections pour chaque composant des ponts, ce qui permet de suivre l'évolution de l'état des ouvrages. La condition de l'état pour un composant ou un élément du pont est décrite par types de défauts de performance (physiques et fonctionnels).
- un module de maintenance, de réparation et remplacement (MR&R), qui consiste en la planification et le suivi des programmes pluriannuels d'interventions.
- un module d'analyse qui s'appuie sur les informations stockées dans les trois modules précédents pour optimiser l'ensemble des actions de gestion et de maintenance. Ce module est utilisé pour la prise des décisions suivant des critères déterminés par les agences de gestion (par exemple, la disponibilité du budget…). Dans ce module, une analyse visant à l'élaboration des stratégies alternatives de maintenance est réalisée au niveau du projet. Cette analyse utilise des informations d'inventaire, l'état des composants et les coûts d'utilisation spécifiques à chaque pont du réseau afin d'estimer les coûts présents et futurs avec de divers scénarios de réparation ou d'amélioration de la politique de gestion.
- un module de modélisation des détériorations qui utilise des modèles markoviens pour prédire les états de composants. BRIDGIT permet d'utiliser les informations de l'historique des inspections pour mettre à jour la transition de probabilité de détérioration d'un composant au cours du temps.

Certains auteurs ont signalé le fait que l'utilisation conjointe des outils PONTIS et BRIDGIT permet davantage d'obtenir plus d'informations sur un long terme par exemple lorsque les données sont disponibles [HAW 98].

1.3.5-Outil développé en Suisse pour le compte d'OFROU

KUBA-DB et KUBA-MS sont deux modèles constituant un outil pour la gestion des patrimoines d'infrastructures en Suisse [LUD 99]. Cet outil a été développé suivant la démarche de Pontis par la société Grob&Parthner pour le compte d'OFROU« Office Fédérale des Routes » [HAJ 95].

- le modèle KUBA-DB, est une base de données d'inspections et d'historiques d'exploitation. Il permet l'évaluation de la condition d'état sur la base des inspections, comme c'est le cas dans Pontis. Le tableau 1.4 illustre un extrait du modèle de notation des conditions d'état des composants de ponts en béton armé altérés par le mécanisme de corrosion.
- le modèle KUBA-MS, est un modèle de management des interventions. Le tableau 1.5 illustre une hiérarchie des actions à engager, par exemple dans le but de prolonger la durée d'utilisation des ouvrages.

Contrairement à PONTIS, dans cet outil, les données sont stockées dans deux supports informatiques distincts (KUBA-DB et KUBA-MS).

Tableau 1.4 : Condition d'état de composant [KUB 98, CDO 98]

Condition d'état	Description
1 : bon	Pas de dégâts visibles ; que de fines fissures superficielles ; pas de traces de corrosion
2 : acceptable	Tâches de corrosion visibles et/ou écaillage local ; fines fissures dues à la corrosion de l'armature et/ou des zones humides ; dégâts mécaniques insignifiants
3 : endommagé	Ecaillage avec armature visible, section d'armature insignifiante, en moyenne moins de 10% de l'armature visible ; fissures et/ou zones humides
4 : mauvais état	Ecaillage avec armature visible, pertes de section significatives, en moyenne plus de 10% d'armatures visibles et/ou piqûres de corrosion ; fissures et/ou zones humides
5 : état alarmant	La sécurité est mise en danger ; des mesures sont nécessaires avant la prochaine inspection principale ; mesures urgentes

Tableau 1.5 : Modèle d'aide aux interventions (KUB-MS)

Condition d'état	Interventions possible
1 : bon	aucune intervention
2 : acceptable	- aucune intervention - protection de la surface - reprofilage local
3 : endommagé	- aucune intervention - protection de la surface et reprofilage local - remise en état complète
4 : mauvais état	- aucune intervention - reprofilage local - reprofilage local et protection de la surface - remise en état complète, y compris le remplacement de l'armature corrodée
5 : état alarmant	- intervention d'urgence

Nous notons de ce qui précède, que ces outils (IOQA, KUBA, PONTIS et BRIDGIT) ont en commun une même vision d'aide à la gestion et à la maintenance d'ouvrages existants (ponts), reposant sur des bases de notation d'état des ouvrages et des composants. PONTIS et BRIDGIT ont en plus l'avantage d'intégrer une démarche de modélisation probabilisée des détériorations (simulations) et d'optimisation plus avancée des stratégies de maintenance, ce

qui n'est pas encore le cas par exemple, dans IOOA et VSC. La pratique de diagnostic de ponts sur la base de notation d'états intégrant une démarche d'évaluation de l'état global de l'ouvrage à partir de la note de chaque composant individuel nous intéresse dans ce travail. Ceci pour développer une vision d'analyse prédictive de l'évolution des performances des ouvrages adaptée aux objectifs de ce travail de thèse.

Cependant, l'une des lacunes principales de ces outils est qu'ils utilisent des volumes importants d'informations non formalisées, ce qui pourrait limiter leurs exploitations à des fins de raisonnements logiques en ingénierie (par exemple pour l'analyse des défaillances antérieures).Une deuxième lacune est le fait que ces outils, nécessitent d'une part un grand volume de données disponibles, et d'autre part, ils n'intègrent pas toutes les dimensions de l'ingénierie des ponts. A titre d'exemple, des champs tels que la fiabilité et la science des matériaux ne sont pas directement incorporés dans ces outils. Cela limite la capacité des outils à prédire l'évolution de l'état des composants des ouvrages.

Face aux conséquences engendrées par les défaillances sur certains ponts en service, la gestion d'ouvrages par les risques a été récemment proposée comme une alternative à la gestion patrimoniale classique [CRE 03, BAR11, BRI 05, O'CO 13]. C'est l'objet de la partie 1.4 qui expose sur les différentes approches et méthodes employées en génie civil.

1.4- Approches et méthodes pour l'analyse de risques sur les ouvrages

Les ouvrages existants sont comme des systèmes subissant des altérations au cours du temps, qui peuvent ainsi entraîner la dégradation de leurs performances [SAY 13, CAI 11, MOR 00, FRA 07]. Dans [BAR 11, BRE 14, SAY 13], les auteurs estiment que les scénarios de ces dégradations de performances peuvent conduire à un fonctionnement dégradé des structures et à des situations à risque. Pour un système existant de génie civil, une performance représente, « la capacité ou l'aptitude du système ou de son composant, à satisfaire les exigences des fonctions pour lesquelles il est conçu et exploité » [CRE 02, CRE03, FRA07]. Trois classes de performance corrélées chacune à un état limite associé sont définies dans la littérature des ponts [AND 87, CRE 02, CRE 03] :

- la sécurité structurale, qui correspond à la capacité mécanique exigée (stabilité, portance, résistance) que doit posséder un système ou ses composants, pour assurer des fonctions de sécurité en situation normale ou exceptionnelle d'exploitation.
- l'aptitude au service est l'exigence de service majeure pour les ouvrages de franchissement tels que les ponts, représentant leur capacité à assurer le trafic en sécurité. Elle se traduira donc sous la forme d'un certain nombre de critères : (a)l'intégrité de la géométrie de l'ouvrage ou des composants structuraux« disponibilité du nombre de voies, respect des gabarits de trafic » ; (b) l'absence de déplacements excessifs nuisant à la sécurité du trafic, au confort des usagers ou susceptibles de détériorer les équipements «flèches importantes dues aux sollicitations variables ; déformabilité de l'ouvrage vis-à-vis des charges permanentes de sollicitations, etc.».

Cette aptitude recouvre donc le maintien des paramètres géométriques au cours de l'exploitation de l'ouvrage de manière à ce qu'il assure ses fonctions de service sans entraîner des coûts inhérents à l'exploitation.

- la durabilité est l'exigence associant la capacité physique de l'ouvrage ou du composant à la qualité du matériau utilisé. Elle décrit son aptitude à demeurer en état de satisfaire les fonctions de sécurité et de service dans des conditions données d'utilisation et de maintenance sur une durée d'utilisation définie. Selon les normes Eurocodes [AFN 90], la durabilité est intégrée à la maintenabilité du système ; elle correspond à « la capacité de l'ouvrage à remplir ses fonctions pendant sa durée de service prescrite avec une maintenance appropriée ».

En pratique, la performance d'un ouvrage existant fait souvent face à deux catégories d'évolutions traduites par les notions de dégradation et de défaillance [CRE 03]. La « dégradation » ou altération est une diminution de la performance d'une fonction, qui reste néanmoins supérieure au seuil de l'état-limite (état ou phénomène que l'on souhaite éviter) [CRE 02, CRE03]. Suivant les considérations dans [BIE 07, BRE 02], et par rapport à ce qui existe dans les démarches des outils traditionnels de gestion des ponts (§1.4), le terme « dégradation » représente un état d'altération pour un composant ou un système en cours de détérioration.

Par rapport à notre vision d'évaluation de l'état des ponts en cours de détérioration, le terme « état d'altération » semble mieux convenir pour une description sémantique et logique. Il est explicité comme suit :

> *Un état d'altération est une condition de perte de propriété de matériau d'un composant ou d'un ouvrage à un instant donné et son environnement définit au travers tous ses facteurs.*

Dans ce vocabulaire, l'état d'altération d'un matériau peut expliquer au travers des lois d'évolution physique, la mauvaise qualité de système ou de ses composants. L'introduction des notions de temps et de l'état de système est essentielle dans ce travail pour prendre en compte la dimension de surveillance prévisionnelle des ouvrages (voir chapitre 2 « §2.5 », et chapitre 4 « §4.2 »).

Le terme « défaillance » (failure en anglais) a été défini dans différents travaux [VIL 88, TAL03, CRE 03, AFN 01, SER05] : « une défaillance est une altération ou une cessation de l'aptitude d'un système ou d'un composant à remplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications ». Pour [FEL 97], « une défaillance, est une condition dans laquelle un composant, un ouvrage ne répond pas aux exigences de performance de son utilisation désignée ». Dans notre vision de modélisation de système de génie civil, nous préconisons de considérer le concept de « situation de défaillances », qui

permet de considérer la défaillance selon son positionnement dans le système (à l'échelle de composant ou du système).

Nous définirons une défaillance de système comme suit [TAI 18] :

> *Une situation de défaillances (Failure situation, en anglais), est une situation ou condition dans laquelle un système (ouvrage) ou un composant perd sa fonction prévue en raison d'un niveau de performance insatisfaisant.*

Autrement dit, on dira qu'un ouvrage ou un composant se trouve dans une situation de défaillances, lorsque l'une des fonctions qu'il doit assurer n'est plus satisfaite [BRE 09]. Dans cette thèse, ce concept de « situation de défaillances » décrit non seulement les effondrements (partiel ou total), mais également toute déviation ou déplacements inacceptables de composant, les défauts de résistances, la perte de stabilité… [FEL 68].

Savoir comment les risques de défaillances se propagent jusqu'à avoir des conséquences potentiellement fatales sur les ouvrages existants [BRE 18] est une des questions clés en matière de gestion de patrimoines techniques. A cette fin, la mise en œuvre des pratiques de gestion et de maintenance des ponts, implique à la fois l'identification, l'analyse des risques et des situations de défaillances qu'ils peuvent occasionnés. Un tel objectif qui traite de l'étude de sûreté de fonctionnement des ouvrages [VIL 88, AFN 88] nécessite de porter une attention sur quelques questions essentielles que nous formulons comme suit [KAP 97, BJO 15] :

- *quelles sont les différentes situations de défaillances qui peuvent se produire sur les ponts en service ?*
- *qu'est-ce qui peut conduire à des situations de défaillances dans les ponts en service ?*
- *si elles se produisent, à quelles conséquences doit-on s'attendre ?*
- *comment prendre en compte les défaillances les plus plausibles et la manière dont les plus critiques se développent pour mener une analyse prédictive de l'évolution de l'ouvrage ?*
- *quelles leçons tirer suite à une situation de défaillances survenue sur un pont ?*

En examinant ces questions, nous pouvons être amenés à une revue de deux séries d'outils pour l'analyse de risque et de défaillances en génie civil. La première série d'outils concerne les approches basées sur les méthodes internes pour évaluer la sûreté de fonctionnement des systèmes « la modélisation physiques et l'analyse de systèmes » [ZWI 95, PEY 04, BAR 11]. La seconde série d'outils concerne les approches (ou champs d'ingénierie) reposant sur l'expertise par, « le retour d'expérience » [PEY 06b] et «l'ingénierie forensique» [WOO 08, BRE 11, BRE 12].

1.4.1-Approches internes pour l'analyse des défaillances de systèmes

Les approches reposant sur la modélisation physique ou sur la modélisation fonctionnelle visent une description approfondie de systèmes afin de formaliser la connaissance sur la manière dont ils peuvent, se détériorer (matériaux) ou se trouver dans une situation de défaillances (fonction, composant). Dans [PEY 04, SER 05, FER 13, BAR 11], les auteurs ont exploité les capacités de ces approches pour décrire les mécanismes de défaillances sur les systèmes et pour prédire leur évolution future. Le lecteur est renvoyé vers ces travaux ci-dessus cités pour un détail approfondi sur les contributions disponibles à ce sujet.

1.4.1.1- Méthode pour l'analyse de système et de ses défaillances

L'analyse de système et de ses défaillances consiste à l'analyse structurelle et fonctionnelle de systèmes afin de parvenir à l'identification des modes de défaillance, leurs effets et leurs conséquences associées (décomposition structurelle et fonctionnelle de système). L'analyse structurelle et fonctionnelle est une méthode d'analyse de système qui se réalise en amont de la phase d'analyse de ses défaillances afin de développer un modèle fonctionnel de système existant.

Les principales publications disponibles se trouvent dans [PEY 03, SER 05] « travaux sur les barrages et les tunnels », [BJO 15, FER13] « travaux sur les ponts et tunnels», et [TAL 06] « travaux sur les bâtiments ». L'analyse de système est généralement mise en œuvre en trois parties qui sont : description structurelle, description fonctionnelle, AMDE (C).

- *Une partie de description structurelle de système*

La description structurelle consiste en la décomposition structurelle du système en différents composants (ou sous-systèmes). Elle permet, de définir les limites (spatiale, temporelle) du système étudié, ses environnements interagissant (environnement de causes ou de conséquences). Cette description permet de détailler le contenu d'informations d'un système à différents niveaux de son organisation de manière à identifier ses **composants** et ses **interactions** possibles [CRE 03]. Les termes « composant, et interaction » nous seront utiles pour développer la modélisation des ponts existants, dans la mesure ils offrent une vision approfondie de la structure physique d'un système (chapitre3 ; chapitre4).

Un **composant** de système représente d'après [ZWI 96, ISO 02, TAL 06] : « un élément matériel ou une partie physiquement distinguable qui remplit des fonctions particulières dans un système ou dans un sous-système ». Dans ce travail, il va être explicité comme suit :

Un **composant**, est une partie (ou un sous-système) qui en interaction avec d'autres, forme un système pour assurer des fonctions spécifiques.

Une **interaction** dans un système de génie civil, est un lien de transfert d'effort entre ses différents composants, et d'échange réciproque avec ses environnements [CRE 03]. L'intérêt de la description des interactions dans notre vision d'analyse de défaillances des systèmes existants va être illustré par des relations logiques et sémantiques (voir chapitre 2, chapitre 3, chapitre 4).

Il faut noter que les fonctions que doit assurer un composant et ses interactions, peuvent être de plusieurs natures (mécanique, durabilité, protection, esthétiques…). S'il est constitué de plusieurs parties, chacune de ses parties doit assurer tout ou partie des fonctions du composant père, de manière à ce que l'ensemble des parties corresponde au tout. Dans une approche d'analyse de système, la description des fonctions consiste en l'analyse fonctionnelle, qui doit ensuite aboutir à l'analyse des modes de défaillances et de leurs effets et conséquences « AMDE(C) » [PEY 03, PEY 06, SER 05, FER13, BJO 15].

- *Une partie de description fonctionnelle*

Elle consiste en l'analyse fonctionnelle, où l'on définit les fonctions pour lesquelles un système (et ses composants) a été conçu, afin de savoir de quelle manière elles peuvent cesser d'être assurées. Une fonction représente l'« activité d'un produit ou de l'un de ses constituants, exprimée exclusivement en termes de finalité » [AFN 96]. Elle est aussi définit comme un, « rôle propre à un élément au sein d'un ensemble dont les parties sont solidaires » (cf. CNRTL)[2]. Dans [CRE 05], la « fonction d'un ouvrage consiste en la description des exigences auxquelles il doit répondre avec une performance donnée ». De ces considérations, nous notons la définition suivante :

Une **fonction** (rôle) est ce qu'un système ou un composant doit satisfaire en respectant une exigence de performance donnée.

Dans [AFN 96], une « fonction» est désignée par un verbe à l'infinitif suivi d'un complément. Par exemple, pour un pont la fonction de franchissement d'obstacles sera désignée par Franchir un obstacle par-dessus. La notion de « fonction» est essentielle dans ce travail de

[2] https://www.cnrtl.fr/

thèse dans la mesure où elle est liée à notre vision d'analyse des défaillances par la modélisation des connaissances : un pont doit assurer des **Fonctions** au cours du temps. Notre intérêt va être de comprendre pourquoi les **Fonctions** d'un pont ne sont plus assurées afin de documenter les facteurs de causes et les analyser (voir chapitres 2, 3 et 4).

De ce qui précede, cette partie d'analyse de système consiste en la description de ses fonctions en deux étapes : une étape d'analyse fonctionnelle interne qui consiste à déterminer les fonctions que doivent assurées les composants en s'appuyant sur la description physique globale du système (partie a). Une étape d'analyse fonctionnelle externe consistant à déterminer les fonctions principales d'un système en l'étudiant dans sa globalité comme une « boîte noire » en interaction avec son environnement [ZWI 96, PEY 03].

Ces deux étapes d'analyse fonctionnelle font recours à des méthodes issues de l'industrie ou des sciences de l'organisation ; c'est le cas de la méthode APTE. APTE « Application aux techniques d'entreprise », est une méthode souvent préconisée et adaptée dans les applications liées aux ouvrages de génie civil [PEY 03, SER 05]. Cette méthode consiste à décrire les fonctions réglementaires d'un ouvrage en identifier ses environnements d'interaction (fig.1.11)

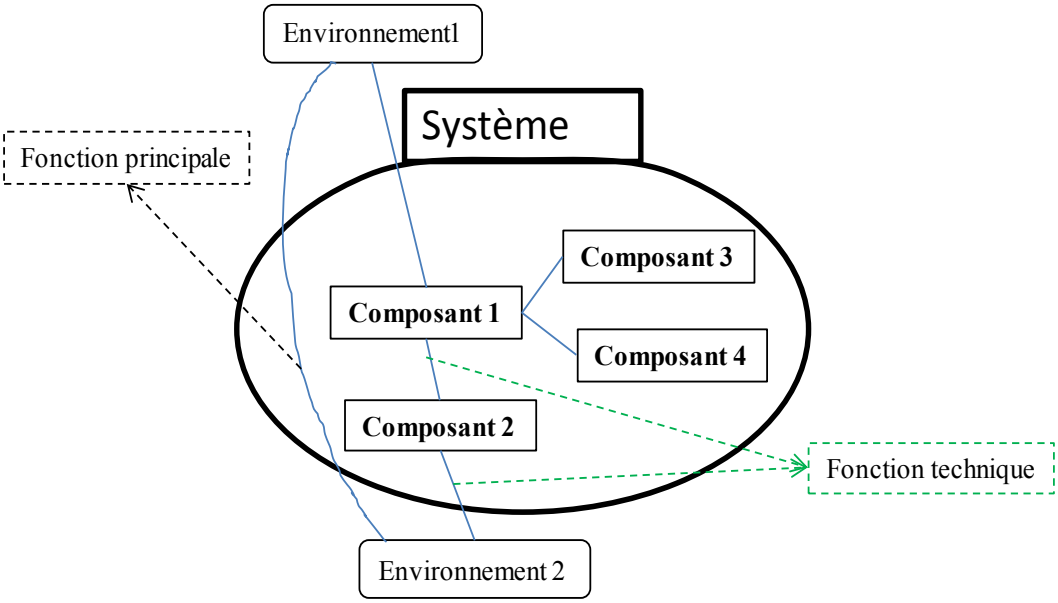


Figure 1.11 : *Extrait de bloc diagramme fonctionnel d'un système [ZWI 96]*

Cette figure 1.11 illustre un Bloc diagramme fonctionnel présentant les résultats d'une démarche d'analyse fonctionnelle à l'aide de la méthode APTE, d'un système de quatre composants interagissant avec deux environnements [ZWI 96].

En génie civil, les fonctions d'ouvrages sont déterminées à partir des exigences règlementaires lors de la conception [CRE 02, CRE 03, AFN 90]. C'est notamment le cas des exigences liées aux états limites : état limite de service (ELS), état limite ultime (ELU) et état limite de durabilité (ELD). Dans [AFN 90], ces trois états limites constituent des critères qui

gouvernent la satisfaction de la fonctionnalité d'un ouvrage pendant toute sa durée exigée de service :

- Etat limite ultime (ELU) : la conséquence du non-respect ou de dépassement de cet état est la mise en danger de l'usager utilisant ou empruntant l'ouvrage ;
- Etat limite de service (ELS) : leur dépassement a des conséquences d'ordre économique « réduction de trafic sur un pont, surcoût d'exploitation, réparation nécessaire » mais aussi, plus largement, en termes d'image ou de satisfaction des usagers ;
- Etat limite de durabilité des matériaux (ELD) : il constitue la garantie que, dans les conditions d'exploitation prévues, les performances des composants et de l'ouvrage seront satisfaites avec une probabilité suffisamment élevée pour être jugée acceptable, pendant la totalité de la durée de service prévue.

Comme souligné dans [CRE 03], ces critères d'états limites visent à prémunir les ouvrages des états (ou situations) de défaillances au travers des marges de sécurité applicables quelque soit la classe de performance à évaluer. A partir de la description du terme performance (§1.4) et de la discussion ci-dessus, un critère d'état limite sera désigné par « niveau de performance » pour corréler la capacité d'un ouvrage à répondre aux sollicitations (performance) avec sa fonction (F). Trois classes de fonctions (techniques) correspondant aux trois critères d'états-limites, vont être considérées dans la modélisation que nous allons développer pour tous ouvrages d'art (chap.3) [CRE02, CRE 03, SIL 05] :

- fonction de service (F_{ELS}),
- fonction de durabilité (F_{ELD}),
- fonction de sécurité structurale(F_{ELU}).

L'intérêt d'une description physique et fonctionnelle d'un système en génie civil est d'introduire l'expert dans une dimension plus approfondie du diagnostic au travers la démarche d'analyse des modes de défaillance et leurs effets (AMDE) [BAR 11, FER 13, BJO 15]. Cet outil de diagnostic d'ouvrages documentés (bien connus), reposant sur la logique causale (AMDE produit) pour expliquer ses enchaînements des défaillances.

- *Partie de l'AMDE produit*

AMDE « Analyse de modes de défaillances et de leurs effets » ou AMDE(C) «Analyse de modes de défaillances, de leurs effets et de leurs criticités», en anglais *FMECA* ou *FMEA* « *Failure Modes Effects and Criticality Analysis* », est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles de système [MOR 05, BJO 15].

L'AMDE produit représente une phase d'analyse qui s'applique sur les ouvrages en service, où sont recherchés, les différents modes de défaillances (états d'altération) liés à l'évolution de l'ouvrage durant le cycle de vie (conception, réalisation et exploitation). L'AMDE (ou AMDEC) relevant de produits ou de systèmes en exploitation, peut-être mise en œuvre selon deux formats d'analyse formalisés sous forme de tableaux. Les travaux de [FER

13, PAT 16, COO 14] sont des exemples d'applications récentes en ingénierie d'ouvrages d'art (ponts, tunnels) de cette approche. Une démarche d'AMDE s'appuie sur un bloc diagramme fonctionnel (fig.1.7) qui permet de rechercher les causes de défaillances afin d'en déduire les effets ou les conséquences possibles. Ce raisonnement peut être mené suivant deux logiques : logique d'analyse par les fonctions, logique d'analyse par les composants.

- une logique d'analyse par « fonction », où l'objectif consiste, d'une part, à identifier les états d'altération générant les diminutions (ou pertes) de performances des fonctions du système d'étude ; et d'autre part, à déduire les causes et les conséquences possibles suivant les étapes de modélisation. [TAL 06] a par exemple mis évidence l'intérêt de ce format d'analyse pour l'étude d'un mur en béton.
- une logique d'analyse par « composant », qui contrairement au format d'analyse précédente, vise à identifier les mécanismes de défaillance affectant les composants du système existant afin d'en déduire les effets et les conséquences. Ce format a été appliqué dans l'étude des systèmes de type « tunnel » [FER 13].

Une démarche d'AMDE (C), nous permettra donc de poser les bases d'un raisonnement suivant la logique causale telle que : A (cause) entraîne B (conséquence). La discussion sur l'approche d'analyse de système et sur la démarche d'AMDE, permet en exergue le fait que cette approche employée seule, ne suffit pas pour décrire les conditions des ponts existants dans des contextes particuliers. Pour cela, ces deux outils (analyse de système, ADME) vont être employés dans notre cas dans un premier temps pour collecter l'information (chap.3), et dans le second temps pour mener des raisonnements (chap.2, chap.4).

Aussi, nous avons vu que ces trois approches d'analyse de défaillances explicitée ne se limitent qu'à la dimension d'évaluation qualitative de systèmes [FER 13, TAL 06]. Elles sont dans ce cas, généralement complétées à d'autres méthodes permettant de quantifier les états d'un système.

1.4.1.2- Méthode pour la modélisation physique de risque

La modélisation physique des risques vise la description des processus continus ou discrets de dégradation des propriétés de matériaux d'un système. Cette modélisation peut s'appuyer sur des lois de comportement (équations mathématiques), ou des simulations numériques, ce qui nécessite une connaissance approfondie du système d'étude. Dans les travaux disponibles en génie civil, différentes lois physiques ont été proposées pour analyser les processus de dégradation de système. Par rapport à nos ambitions de modélisation des défauts sur les ponts, quelques lois discutées dans les travaux ci-après pourront être au cœur de nos raisonnements dans les chapitres 2, 3 et 4 :

- *Loi de dégradation de matériau au cours du temps*

Afin de simuler les effets de dégradation sur le comportement en flexion des poutres de pont soumis à la corrosion d'armatures, Enright et Frangopol 1999 [ENR 99] ont proposé une

formule qui permet de décrire l'évolution (en puissance) de la résistance d'un composant au cours du temps écrite comme suit :

$$r(t) = r0 * g(t) \quad (4)$$

Où, r_0 = résistance initiale, et g(t) terme de dégradation, $g(t) = 1 - k1t + k2t^2$

r(t) : la propriété de matériaux à la détérioration progressive (performance dégradée).
t est le temps écoulé du processus de corrosion. Pour tracer le profil de dégradation qui en résulte de cette équation, les mêmes auteurs [ENR 99] ont considéré k_1 comme une variable aléatoire de coefficient de variation (k_1= 0,2). La simulation de la propagation du processus de corrosion proposée par les auteurs consiste en un raisonnement suivant trois cas en faisant varier les variables k_1 et k_2 en fonction du temps :

1er cas : faible dégradation, k_1 = 0.0005, k_2= 0 et t= 10 ans,
2ème cas : dégradation moyenne, k1= 0.0005, k_2= 0 et t = 5 ans,
3ème cas : forte dégradation, k_1=0.01, k_2= 0.00005 et t = 2.5 ans.

Dans cette même optique, dans [BOR 09, QIN 03], les auteurs ont utilisé une loi qui intègre la dimension temporelle de dégradation des propriétés de matériaux dans un problème de sûreté d'ouvrage. Cette loi permet d'évaluer l'altération de propriété physico-mécanique d'un matériau de composant d'ouvrage due à la propagation linéaire d'un processus progressif :

$$r(t) = r0 - \alpha * \Delta t \quad (5)$$

Avec ;
r(t) : la propriété de matériaux à la détérioration progressive (performance dégradée).
r_0 : la propriété initiale de matériaux ou de composant à la mise en service de l'ouvrage (performance initiale).
Δt : l'âge de l'ouvrage au moment d'apparition des états d'altération critique ou de défaillance (c'est le pas de temps au cours duquel les états peuvent être observés).
α : l'agressivité de l'environnement spécifique à un processus à un processus d'altération.

Dans un cadre de simulation de l'évolution (croissante) du vieillissement d'ouvrages ou de ses composants, cette loi (eq.5) a été traduite dans [BRE 02, VAS 05] comme suit :

$$A(t) = A0 + \alpha * \Delta t \quad (6)$$

Avec ;
A : l'état d'altération (= état de santé) de matériaux/composants
t , Δt et α, voir (éq.5).

L'intérêt des lois (éq.5, éq.6), est de décrire l'évolution du vieillissement naturel d'un composant au cours du temps (éq.6) ou d'un processus spécifique d'altération de matériaux (éq.5). Cela est utile pour suivre la tendance que cette dégradation va avoir sur les fonctions de composants de l'ouvrage à un instant t. Nous exploiterons ces lois dans notre application aux chapitres 2 et 4.

- *Méthode d'évaluation de performance d'ouvrages*

Plusieurs approches d'évaluation de performance ont été proposées pour évaluer la sûreté et la fonctionnalité des structures de génie civil : approche déterministe, approche semi-probabiliste, et approche probabiliste. Nous souhaitons expliciter l'approche d'évaluation semi-probabiliste qui est couramment employée en contexte d'ouvrages existants et dans de nombreux règlements de calcul (par exemple, les Eurocodes) [FRA 07, CRE 03, SIL 05, WUT 01]. L'approche semi-probabiliste est une méthode reposant sur les notions d'état limite et de coefficients partiels de sécurité. Cette méthode permet de décrire le mode de fonctionnement d'une structure par la corrélation entre l'état limite liant les propriétés de matériaux (résistance) et les sollicitations imposées à la structure. Elle découle de la proche probabiliste qui consiste à l'inéquation suivante : R (résistances) > S (sollicitations)

Cette loi traduit le fait que le dépassement de cet état limite suite à une surcharge sur une structure de faible capacité ou dont les matériaux sont de mauvaise qualité, peut entraîner celle-ci dans une situation de défaillance. Dans [CAL 97, FRA 07], les auteurs ont estimé que cette approche probabiliste est limitée par le manque d'études statistiques concernant les différentes variables d'entrée et la complexité des calculs de probabilité. Pour tenir compte de cette lacune, l'approche semi-probabiliste a été jugée plus améliorée, car elle combine, au sein d'un même état limite, des valeurs estimées statiquement et des valeurs déterministes. Les mêmes ont insisté sur le fait que cette approche semi-probabiliste, offre un meilleur compromis pour des raisonnements déterministes dans le jugement par les experts. Cette méthode est traduite par la formule ci-après :

$$\frac{Rk}{yR} = Rd \geq Sd = ysSk \qquad (7)$$

Avec :

Rk et Rd sont des valeurs caractéristiques de résistance du matériau, S_k est l'ensemble des sollicitations ou des efforts extérieurs de l'environnement s'exerçant sur le système. γ_s et γ_R représentent des coefficients partiels de sécurité, destinés à couvrir les incertitudes de propriétés de matériaux et les effets des sollicitations agissantes. Dans [CRE 02, SIL 04, FRA07], les auteurs ont proposé une écriture plus simplifiée de cette formule à des fins d'évaluation niveau de performance (I_{sp}) et de modélisation de profil de dégradation des ponts :

$$I_{SPS} = \frac{\frac{1}{\gamma_{R_d}} \mathcal{R}\left[\ldots, \frac{f_{ic}}{\gamma_{fi}}, \ldots\right]}{\gamma_{S_d} S\left[\ldots, \gamma_{F_j}, F_{jc} \ldots\right]} \quad (8)$$

L'indicateur de performance, Isp = 1, a été défini comme la limite entre l'état de défaillance et l'état de sécurité de l'ouvrage. Les auteurs cités ont montré qu'un pont ou ses composants sera considéré comme en état de sécurité si Is > 1, et comme en état de défaillance dans le cas contraire (Is<1) [CRE 02, SIL 04, FRA07]. L'utilité de cette approche est illustrée sur la figure 1.9 (§1.4.3.1). D'après [CAL 97] La méthode semi-probabiliste permet d'analyser les risques des constructions pour ses capacités à :

- déterminer statistiquement, les données qui doivent être incorporées dans un coefficient forfaitaire de manière à considérer les incertitudes non prises en compte par les calculs des probabilités ;
- négliger les dispersions de certaines données en s'appuyant sur des raisonnements déterministes.

Cependant, pour un patrimoine d'ouvrages hétérogène et mal connu, certains auteurs ont fait valoir que les données issues de l'évaluation des performances peuvent devenir insignifiantes pour interpréter et expliquer les raisons des défaillances complexes [CRE 02]. Le recours à l'approche par expertise est dans ce cas, un moyen efficace pour le diagnostic d'un ouvrage [PEY 06b, BRE 03].

1.4.2- Les approches d'expertise pour l'analyse de défaillances

L'approche par expertise mise en œuvre par un expert confirmé du domaine d'application, qui s'appuie sur ses connaissances, du Retour d'expérience des experts (Rex) et des observations sur le terrain pour réaliser le diagnostic. Cette approche est applicable d'une part, dans le contexte de patrimoine d'ouvrages hétérogènes ou d'ouvrages homogènes en petit nombre, et d'autre part, dans le contexte d'ouvrages mal connu pour lesquels, les données disponibles sont souvent en petite quantité, incomplètes et imprécises [BOI 00, PEY 07].

Elle vise la prédiction des évolutions futures des états d'altération (et/ou des défaillances certaines, possibles ou probables) d'un ouvrage soumis à des mécanismes de défaillances au cours du temps. Dans ces conditions, l'expert adopte souvent un raisonnement par analogie pour examiner les états d'ouvrages ayant connue des situations similaires. Sur cette base, l'expert peut être amené à estimer la période nécessaire d'apparition de nouvelles altérations (défauts visibles), afin d'anticiper les évolutions de l'ouvrage et en définir une action ou non de maintenance (réparation, confortement, etc.).Selon les types d'ouvrages, il y a deux possibilités d'expertise technique : l'expert par le *Retour d'expérience* (Rex), et l'expertise par *l'Ingénierie forensique.*

1.4.2.1- Le Retour d'expérience (dans le domaine des barrages)

Le Retour d'expérience (Rex) est une approche qui revêt une importance particulière en génie civil pour plusieurs raisons [BOR 05] :

- la possibilité d'analyser les situations de défaillances des systèmes existant sur la base des informations collectées sur le site où l'expert peut donner des avis à partir des défauts visibles (ou symptômes) constatés.
- les études de cas d'échecs passés permettent d'identifier des causes (certaines, probables ou possibles), de les analyser et de tirer des conclusions. Ces conclusions enrichissent l'expertise collective. La rétroaction repose sur un processus de collecte de données des défaillances afin de tirer des leçons après un événement imprévu (souvent catastrophique). Elle peut être qualitative ou quantitative, et s'appuie sur des études de cas ou sur des statistiques d'échec similaires, qui nécessitent à la fois un haut niveau d'expertise et des moyens nécessaires (tests de laboratoire, simulations numériques,…).
- la possibilité d'aider les acteurs à décider sur les actions de maintenance ou les inspections complémentaires à déclencher en contexte de gestion patrimoniale d'ouvrages en détérioration.

Dans [PEY 06b,], les auteurs ont développé des démarches ayant permis d'appliquer avec succès cette approche pour le diagnostic d'ouvrages d'art divers (un extrait de résultat pratique est présenté au paragraphe 1.5.3).Une autre approche, complémentaire au Rex classique s'est développée dans les pays anglo-saxons : l'Ingénierie Forensique (en anglais, Forensic engineering).Cette approche avait pour but premier de rechercher les responsabilités lors de défaillances majeures (notamment ayant entrainées des victimes).

Cette approche portée par des experts et des chercheurs s'est élargie pour tirer des leçons de défaillances passées en analysant les mécanismes ayant conduit à cette défaillance. Elle se positionne dans une nouvelle dimension de l'ingénierie et de l'apprentissage collectif (CAR 07, BRE 11a, DEL 02). Dans ce cas, le retour d'expérience devient un moyen d'acquisition des données sur les défaillances passées en amont de la conduite d'une analyse forensique [TAI 18, BRE 18].

1.4.2.2- Le champ d'ingénierie forensique en génie civil

La dénomination d'ingénierie forensique, qualifie selon [DEL 00, DEL 02, BRE 11a], un nouveau champ (domaine) d'ingénierie, qui consiste en l'analyse des situations de défaillances passées afin de comprendre les raisons à l'origine desdites situations et de tirer des leçons utiles. L'ingénierie forensique, peut-être assimilable selon [CHA 14] à une analyse médico-légale, qualifiée d'autopsie judiciaire détaillée consistant en : une retro-analyse (the Forensic cycle) après une défaillance, pour en identifier les causes, de manière à reconstruire la chaîne logique des causes et des conséquences qui ont conduit à la défaillance de l'ouvrage ou de son composant.

La mise en œuvre d'une analyse de défaillances par l'ingénierie forensique repose sur des bases de données disponibles sur les défaillances, qui doivent contenir des données diverses pour réaliser le diagnostic : échantillonnage de composant endommagé, des vestiges du système étudié, des témoignages, l'historique d'exploitation, des plans, des études d'origine, et/ou d'autres informations sur le site et l'ouvrage. L'idée fondamentale de cette approche est d'aboutir à un processus d'amélioration continue des pratiques en place qui se concrétise par les principaux bénéfices suivants : le forensic cycle (ou danse forensic) théorisée par [WOO 08, WOO15] et utilisée dans [DUF 05] (fig.1.12), qui permet quatre utilisations possibles en contexte d'analyse de défaillances : questions juridiques et responsabilité, recherches et amélioration des connaissances, éducation et apprentissage, amélioration des normes et des pratiques.

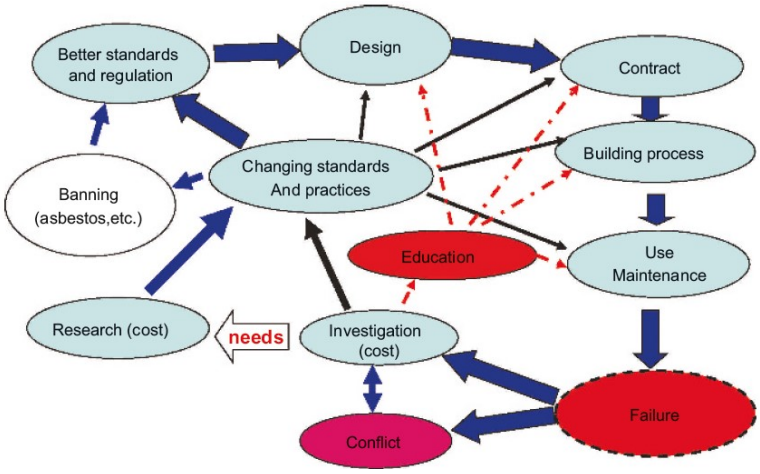


Figure 1.12 : *Extrait d'un cadre de raisonnement en ingénierie forensique*

- L'accumulation et l'amélioration des connaissances, y compris l'éducation, à partir d'une littérature enrichie par les études de cas spécifiques des situations de défaillances d'ouvrages (cas des ponts). Les chercheurs estiment que, les leçons tirées des échecs du passé sont très efficaces en matière d'enseignement auprès des étudiants, des ingénieurs, et même des experts et acteurs [DEL 00, DEL 02, NEW 11]. C'est d'ailleurs ce que souligne [TAI 18, LEE 13a] qui définit l'ingénierie forensique comme étant, « une approche scientifique et systémique visant à trouver une explication à des situations de défaillance afin d'éviter qu'elles ne se reproduisent ».
- L'amélioration des pratiques d'ingénierie (méthodes de construction, normes), sur la base des révélations des circonstances ayant conduit à des situations de défaillances des ouvrages. La mise en place des bases de données des défaillances permet aux acteurs d'extraire les connaissances utiles pour l'amélioration, par exemple de la qualité des travaux des ouvrages de génie civil, ou le recalcule de ceux-ci.
  L'approche forensique est très intéressante dans notre contexte, dans la mesure où elle permettra d'analyser les situations de défaillances sur une base à la fois mécanique, par du retour d'expérience à partir de cas similaires et du raisonnement des experts. Lorsque

les données le scénario de défaillance sont disponibles, on peut être amené à modéliser l'enchainement de l'occurrence ayant conduit à la défaillance.

1.4.3-Illustration de quelques travaux

Nous présentons ici à titre d'illustration pratique, un extrait de récents travaux relatifs au diagnostic des ouvrages d'art de génie civil sur la base des approches examinées.

1.4.3.1- Diagnostic de sûreté d'ouvrages par l'évaluation de performance

[CRE 03] et [SIL 04] ont évalués sur une base semi-probabiliste, les performances des ponts en béton armé soumis à l'agression de mécanismes de corrosion et de fatigue, afin d'analyser les risques de perte de leurs fonctions respectives. L'idée de base de ces travaux était d'obtenir les profils de dégradation de performance, de manière à prédire l'évolution des ouvrages et les types d'interventions à déclencher.

Pour ce qui concerne la corrosion, la démarche d'évaluation de performances a consisté en deux phases :

- Une phase de modélisation du processus de corrosion sur la base des lois physique ayant permis de décrire les facteurs d'initiation et de propagation du mécanisme, tels que, les agents agressifs (dioxyde de carbone et de chlorure), et d'autres facteurs physiques (ex.: température extrême, humidité relative) [TUU 82, CAD 83]. Cette modélisation a permis aux auteurs de relever les effets de corrosion sur les performances des composants de ponts en béton armé, qui se manifestent selon ceux-ci sur trois stades : au niveau de la surface du béton, les effets des produits rouillés conduisent à des fissurations de l'enrobage avec sa perte probable dans le temps. Aux niveaux structural et durable, avec un risque de diminution ou de perte de la section d'acier et de la capacité portante. Notons que, les données sur ces effets représentent des altérations visibles (ou symptômes) qui permettent de situer l'état de l'ouvrage ou de ses composants.

- Une phase de vérification du niveau de performance (dont le seuil minimum de performance était fixé supérieur à 1) et de modélisation du profil d'évolution de performance (fig.1.13). Deux profils de performances ont été modélisés, à partir d'une corrélation entre les niveaux de performances (axe d'ordonnées) et les stades de propagation du processus de dégradation par corrosion (axe d'abscisses), comme illustré sur la figure 1.13 (a, b): la figure 1.13(a), présente le profil de dégradation où le processus de dégradation se décrit en 3 stades avant d'affecter les critères d'exigence de performance. La figure 1.13 (b), illustre un profil d'évolution de performance au cours du temps, avec une prédiction des interventions pour anticiper les situations de défaillances possibles.

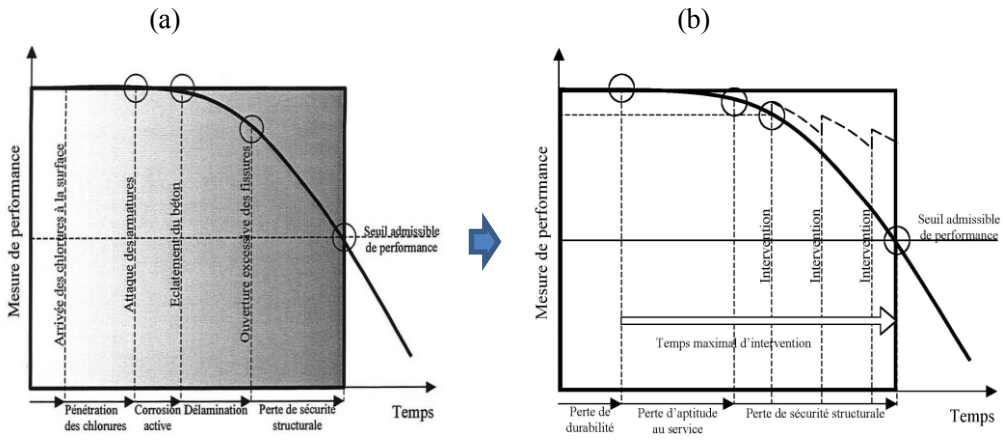


Figure 1.13 : *Profils de performances, a) de dégradation, b) d'évolution et d'intervention*

Sur la figure 1.13(b), l'auteur a voulu montré deux exemples d'évolutions de performances dans un pont en béton armé soumis à l'agression de corrosion : La première courbe (en gras) modélise l'évolution d'une performance « capacité portante » sous l'effet d'un processus de dégradation. Cette dégradation est décrite par trois cycles ; le premier se termine lorsque les exigences relatives à la durabilité sont dégradées suite à l'attaque des armatures (par la chloruration ou la carbonatation). Il se traduit par le début de la décroissance de la performance. Le second cycle correspond à la perte d'aptitude au service, expliquée par le dépassement d'un état limite de service dû par exemple à l'ouverture de fissure (gonflement par corrosion des armatures). Le troisième cycle décrit la perte de capacité portante qui s'explique par le dépassement du seuil admissible d'exigence de performance exigé à l'ELU.

Dans ce dernier cycle, les matériaux constituant les composants ou l'ouvrage, sont fortement détériorés, mais l'ouvrage peut continuer à être exploité, même si c'est de manière réduite (les « coefficients de sécurité » introduits lors de la conception font qu'il n'est pas nécessairement ou totalement ruiné : quoique l'état-limite ultime soit franchi au moins localement, cela n'implique pas que l'ouvrage s'effondre et que sa fonction de « franchissement » soit totalement annihilée). Cette situation correspond à la réalité pour la plupart des pays ciblés par cette étude. Le cas du pont Niari (Loudima, Congo) pour lequel la situation de défaillance signalée le 1er Décembre 2018 a conduit à une décision par le maître de l'ouvrage de limiter le trafic de plus de 15 tonnes.

Dans ces conditions, en l'absence de mesures adaptées pour stopper l'évolution de la dégradation, les détériorations continueront à réduire considérablement les performances de l'ouvrage « telle que la capacité portante » jusqu'à le conduire dans une situation de défaillances totale. Finalement, la courbe en trait pointillé illustre le profil de performance dans le cas d'interventions successives pour (redresser) le niveau de performance au cours du temps. L'instant qui correspond au franchissement de l'exigence minimale acceptable de performance, est alors le dernier stade pour engager une action. En effet, au-delà de cet instant, le niveau de performance ne correspond plus au niveau prescrit. Cet instant n'est d'ailleurs pas nécessairement le plus optimal par rapport aux coûts de maintenance.

Un tel cadre de diagnostic et de décision, peut être pertinent du point de vue pratique, surtout pour les patrimoines bien connus. Néanmoins, sa mise en œuvre dans le cas du contexte de notre étude, nécessite, une description plus fine des critères d'exigences de performances et un bon choix des indicateurs de quantification de perte de performances. Il s'agit donc des informations suffisantes qui doivent être structurées avec des supports numériques adaptés pour disposer des outils efficaces, comme nous allons en proposer trois dans ce travail (chapitres 3 et 4). Le lecteur peut consulter les démarches détaillées pour l'évaluation de performances d'ouvrages dans [CUR 07, LAR 16, NDI 18, SRR 05].

1.4.3.2- Diagnostic de sûreté d'ouvrages par expertise « approche Rex/Forensique » :

- *Retour d'expériences dans le secteur de barrages (digue en terre)*

[PEY 06] a mené une recherche, dont le but consistait à mettre en place une base du retour d'expériences dans ce secteur, formalisant : d'une part une base de connaissances sur les mécanismes de dégradation de barrages en terre, et d'autre part, une base de données sur les barrages y compris des cas de défaillances passées. La finalité de ses travaux, était d'aboutir à un modèle (outil) d'aide à l'expertise (diagnostic et d'analyse de risques) et à la décision. La démarche proposée par l'auteur, est basée sur, les examens in situ, la capitalisation des connaissances expertes et du retour d'expérience de l'expert (figure 1.14).

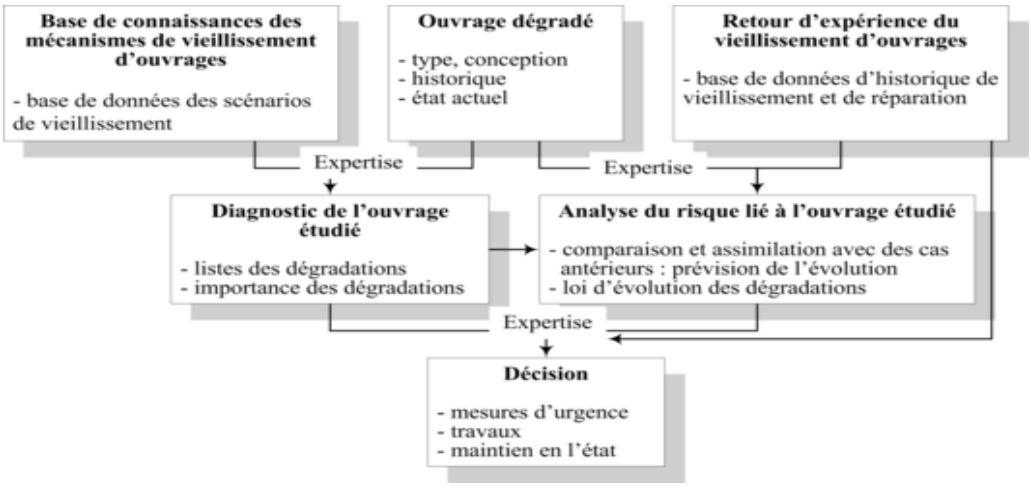


Figure 1.14 : *Démarche d'aide à l'expertise des barrages [PEY 06]*

Sur la base des résultats obtenus, l'auteur a développé deux modèles génériques pouvant s'adapter aux différents mécanismes et à tous les types des ouvrages d'art de génie civil (barrages ou ponts en particulier), ont permis, de représenter la connaissance experte sous forme de scénarios, et d'archiver les études de cas sous forme d'historiques des vieillissements. Ces bases de données de vieillissements peuvent donc être manipulées avec les outils informatiques d'aide à l'expertise qu'il nous faudra structurés dans ce travail.

- *Analyse forensique dans le secteur des ponts*

Breysse 2011 [BRE 11a] a mené une analyse de cas de défaillances enregistrés dans différents ouvrages de génie civil en France. Parmi les ouvrages, citons le cas d'effondrement du pont (rivière Saint-Étienne), sur l'île de la Réunion dans l'océan Indien, le 25 février 2007. Cette étude a été ensuite reprise dans [BRE 14], dont l'objectif était d'enrichir les informations des bases de cas de défaillances sur les ouvrages de génie civil en France. La recherche des raisons de défaillances sur le pont investigué, a conduit le premier auteur, à une analyse statistique des cas de défaillances passées dans le monde.

Neuf principales causes primaires de défaillances des ponts en service ont été identifiées, ce qui a permis à l'auteur d'élaborer une première base statistique de données de défaillances. Cette base de niveau de description macro, vise l'analyse détaillée de défaillances et l'enseignement collectif. Elle décrit les causes identifiées selon la fréquence des cas survenus (échantillon de 45 cas) : surcharge, climat, choc, matériau, géotechnique, séisme, feu (incendie), conception, vandalisme, et autres. Sur la base du retour d'expérience collectif, les auteurs [BRE 14], ont tenté de modéliser le scénario de défaillances sous forme d'arbre de causes, où les concepts entre échelles sont décrits par une relation d'influence (fig.1.15).

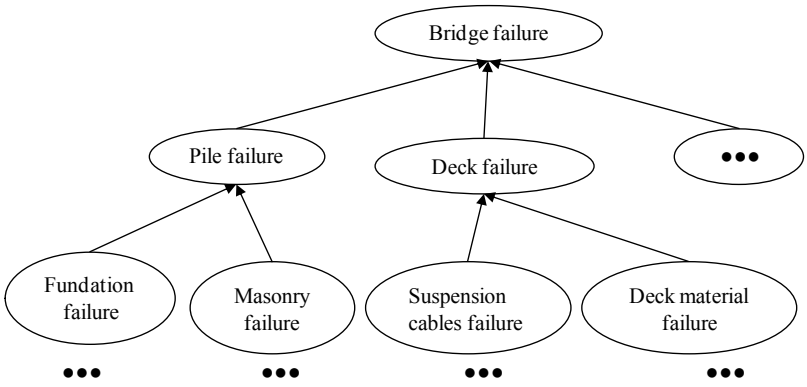


Figure 1.15 : *Exemple de scénario des défaillances d'un système global*

Cet arbre de défaillances proposé par les auteurs [BRE 14], nous donne une idée sur la façon dont nous pourrons modéliser structurellement et fonctionnellement un modèle générique de systèmes. Par conséquent, en ce qui concerne les travaux présentés par les auteurs, nous retenons trois idées fortes vis-à-vis des outils appliqués : les bases de données sur les défaillances facilitent le recueil et la capitalisation de l'information utile. Elles aident les experts dans leurs tâches d'analyse forensique des raisons ayant conduit à des défaillances d'ouvrages, et à tirer des leçons pour l'avenir. Mais la lacune avec ces bases de données non formalisées est l'incertitude liée à l'hétérogénéité de ces données, qui ne permettent pas de développer la dimension de transfert d'héritage dans les patrimoines de génie civil.

Des recherches menées dans cette optique ont conduit récemment au développement d'autres outils à base de modèles de connaissances, pour combler certaines lacunes constatées tout au long de la revue ci-dessus.

1.5- Outils de modélisation des connaissances en génie civil

La diversité des contextes d'exploitation associée à la variété des altérations d'occurrences non anticipées dans les structures de génie civil, et l'étendue du domaine de leur gestion soulèvent un besoin important en information. Notre constat dans les parties précédentes a permis de souligner l'efficacité des outils disponibles dans ce domaine de la gestion des ponts et leur limite dans des contextes spécifiques. Par exemple, la modélisation graphique quantifiant l'occurrence d'un processus d'altération de matériaux des ponts existants reste une des questions d'intérêt pour un ingénieur habitué à décider que sur seul jugement. Le volume important de données hétérogènes à traiter et à unifier d'une part, et d'autre part, l'accès limité à ces informations dans certains contextes, sont autant des enjeux essentiels qui ont ouvert la voie à la modélisation de connaissances en génie civil au cours des vingt dernières années.

En raison de l'étendue des champs de connaissances des experts et des questions posées, le recours à des modèles tels que, les modèles **BIM**, les modèles d'**Ontologie de domaine** dans ce cadre s'est avéré comme une solution prometteuse. Les quelques travaux cités dans ce mémoire en illustration d'usage permettent d'en tirer des leçons sur les opportunités offertes par ces outils en génie civil et leurs lacunes par rapport à notre problématique. Les travaux que nous allons examiner à ce titre, sont ceux développés dans [HEL 13, LIU 16, VAT 09, SHI 14, TIB 17, MES 17] pour les modèles d'Ontologie de domaine (§1.5.1), et dans [TOL 16, DAV 16, FER 17, ZOU 19] pour les modèles BIM (§1.5.2). Parmi les questions non traitées dans ces différents travaux, celles qui nous intéressent concernent particulièrement : (a) la description des scenarios des défaillances sur les ouvrages existants, ainsi que la manière dont ces informations peuvent être exploitées ; (b) les outils qui peuvent permettre de faire évoluer ces informations dans la pratique ; (c) les sources d'acquisition permettant d'accompagner l'évolution de ces informations.

1.5.1-Modèle d'ontologie de domaine

La définition courante d'une Ontologie proposée dans [GUR 93] est : « une spécification explicite d'une conceptualisation ». Cette définition a par ailleurs été explicitée davantage par d'autres chercheurs dans les termes suivants [STU 98, OLS 95, USC 96] : « l'ontologie est une spécification formelle, explicite, d'une conceptualisation partagée ». Les termes de base de ces deux définitions méritent d'être explicités un par un afin de définir au mieux la notion de l'ontologie de domaine :

- la *conceptualisation* qui signifie une vue abstraite et simplifiée du monde que l'on souhaite représenter pour un but donné (modèle structuré de concepts) ;

- la *spécification formelle explicite* qui fait référence à la transposition de la conceptualisation dans un langage pour permettre son utilisation par la machine ;
- le *partage* (de connaissances) qui représente un socle de commun accord permettant de satisfaire les points de vue d'une communauté d'acteurs en interaction, à travers un chemin de transmission formelle de connaissances [OLS 95, OLF 10, WAN 09b].

Le but principal d'une **Ontologie de domaine** est généralement associé à un problème à résoudre. Lee et al.2006 [LEE 06], définissent l'Ontologie de domaine, désignée par l'acronyme (*PDO*) « *a problem domain ontology* » comme : « un modèle de connaissance visant à résoudre un problème complexe dans lequel les concepts de domaines sous-jacents sont fortement interdépendants ». Cette façon de considérer les modèles de connaissances reposant sur l'Ontologie comme outil d'application en génie civil, est essentielle dans notre étude dans la mesure où nous cherchons à prendre en compte quelques problèmes importants d'un domaine complexe (gestion de parc de ponts). L'intérêt de ces modèles basés sur l'ontologie remonte aux années 90 où la formalisation des règles heuristiques pour raisonner sur les systèmes experts à base de cas notés (SBC), nécessitait un vocabulaire sémantique pour faciliter la compréhension de l'information par un humain et par une machine [CHA 02]. Un modèle basé sur l'**ontologie de domaine** est généralement caractérisé par un ensemble d'éléments qui posent ses bases de développement. Nous souhaitons insister sur cinq éléments essentiels qui sont : le domaine d'étude, la structure et le vocabulaire du modèle, le formalisme/logiciel, la méthode de modélisation.

1.5.1.1- Le domaine d'étude (ontologie)

Le domaine d'étude en modélisation de connaissances, représente le champ d'application que l'outil (modèle d'ontologie) doit pouvoir couvrir pour répondre aux besoins des utilisateurs [OLS 95, LOP 97]. Ces besoins se traduisent en des questions de compétence qui doivent être formulées pour guider le développement du modèle de l'ontologie. Suivant la problématique de l'étude, un domaine d'ontologie peut couvrir un ou plusieurs sous-domaines en interaction (ou champs d'applications). Les domaines d'étude des modèles sélectionnés sont les suivants :

- Helmerich R. 2013 [HEL 13], a développé une ontologie de domaine de la gestion des parcs de ponts en acier rivetés en Allemagne (**BrOntEx**). Le champ d'application spécifique de cette ontologie est le diagnostic technique par instrumentation (Contrôle non destructif « CND »). L'intérêt de son travail était d'optimiser le processus d'inspection des ouvrages en facilitant l'apprentissage des ingénieurs débutants grâce à des connaissances formalisées et structurées.
- Liu et al. 2016 [LIU 16] ont proposé une ontologie des ponts pour la modélisation des détériorations (**BridgeOnto**) dans le contexte des Etats-Unis (USA). L'objectif de modélisation des connaissances de ces ponts par ces auteurs était de faciliter l'extraction sémantique et l'intégration des informations structurées pour pouvoir identifier les causes de défaillances antérieures sur les ponts.

- Vatcha et al.2009 [VAT 09] et Wang et al.2009a [WAN 09a] ont proposé des ontologies pour gérer les ponts en service. Le champ d'application spécifique couvert dans les deux cas d'étude, était l'inspection par télédétection intégrant une visualisation reposant sur les systèmes d'information géographiques (SIG) et les technologies d'imagerie satellitaire. Leurs travaux consistaient à l'analyse des défaillances des ponts par visualisation à distance à partir des connaissances stockées dans l'ontologie.
- Shig et al. 2014 [SHI 14] ont proposé une ontologie dans le domaine des centrales nucléaires. Le champ d'application du modèle était la science des matériaux de centrale nucléaire. Leur travail consistait en l'analyse des défaillances dans les centrales à partir des connaissances sur la détérioration des matériaux pour mieux évaluer leur état de santé.
- Tibaut et al. 2017 [TIB 17] ont construit une ontologie couvrant le domaine des matériaux de construction. La finalité de leur travail était de disposer des connaissances sur les phases de production, de formulation et de transport de matériaux afin de maîtriser les risques dans les procédures de construction.
- Messaoudi T.2017 [MES 17] a développé une ontologie de domaine pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel bâti (**Ontologie 3D**). L'idée de base de son travail était de faciliter l'interprétation des cas observables en s'appuyant d'une part sur la description sémantique des défauts sur les bâtiments, et d'autre part sur la corrélation entre ce format formel de connaissances (ontologie) et les structures d'actifs représentées à l'échelle spatiale.

1.5.1.2- La structure conceptuelle et le vocabulaire (ontologie)

La structure conceptuelle d'un modèle d'ontologie est généralement formée par le vocabulaire du domaine, une collection de connaissances, et des éléments de raisonnement [STA 09, STA 13]. Elle peut avoir comme format conceptuel le quadruplet suivant :

$$O = \{C, I, R, A\} \qquad (9)$$

Où, "O" désigne le vocabulaire sémantique du domaine, "C" représente l'ensemble de concepts ou classes génériques du modèle, "I" est l'ensemble des instances de chaque concept générique, "R" correspond à l'ensemble des relations décrivant les concepts, et "A" représente l'ensemble des attributs qui explicitent les concepts dans la modélisation. Un modèle de connaissance du domaine de génie civil développé suivant ce format (éq.9), doit en principe en complément de connaissances d'un expert permettre de reproduire le passé d'un ouvrage ou de prédire ses états futurs [PRA 00, BRI 05]. Dans [STA 09, STA 13], les auteurs ont insisté sur le fait que la modélisation de connaissances doit permettre de raisonner sur les cas généraux et spécifiques d'un domaine d'étude. Mais à la lumière des travaux cités, les modèles de connaissances [HEL 13, LIU 16, TIB 17…] construits suivant le format (éq.9) semblent être confrontés à une insuffisance de capacité pour simuler les défauts de structures (manipulation de connaissances, inférence des règles …). Par exemple, le manque de sous-concepts quantifiables pour décrire les défauts d'ouvrages à travers les concepts principaux à

des niveaux intermédiaires peut être identifié comme une des lacunes dans ces modèles. Nous allons découvrir d'autres raisons possibles dans la suite de cette revue, à travers le formalisme de représentation ou des démarches de description de la connaissance.

1.5.1.3- Le formalisme et la plateforme logicielle

Un formalisme est une représentation mathématique et/ou informatique de la connaissance. Il constitue aussi un outil de représentation de connaissance et de raisonnement sur cette connaissance modélisée. Par rapport à un vœu de modélisation (i.e. la simulation des scénarios du vieillissement de matériaux), l'exploitation d'un formalisme de représentation de connaissance peut associer une plate-forme logicielle. Trois formalismes sont actuellement utilisés en génie civil ou en génie industriel, chacun adapté à une plateforme logicielle dédiée :

- Le formalisme *RDF*, acronyme de « *Ressource Description Framework* » associé à l'OWL acronyme de «*Web Ontology Langage* », utilisé dans [HEL 13, LIU 16, SHI 14, TIB 17], qui ont implémenté leurs modèles dans la plate-forme logicielle « Protégé ».
- Le formalisme des Réseaux Sémantiques, compatible avec les plates-formes telles que « MOT » [PAQ 02].
- Le formalisme des Graphes Conceptuels (CGs), utilisé dans [POT 14, TAI 18, BRE 18], dont les modèles ont été manipulés dans les plates-formes « CoGui » [TAI 18, BRE 18] et « CoGiTan » [POT 14, OLI 95].

La littérature atteste que ces outils fournissent des résultats pertinents relatifs à la représentation des connaissances. Mais force est de constater que certains d'entre eux (formalismes) n'offrent pas les possibilités nécessaires pour une manipulation facile pour structurer et simuler des hypothèses empiriques d'analyse des états des ponts. Ceci ressort du constat sur les modèles dans [HEL 13, LIU 16, TIB 17]. Nous allons illustrer ce propos à travers un extrait de modèle de connaissance (voir fig.1.12, §1.5.1.4). Le paragraphe qui suit présente les deux principales méthodologies utilisées en modélisation de connaissances dans les domaines de l'ingénierie.

1.5.1.4- La méthodologie de modélisation

Différentes méthodologies de construction ou de développement d'ontologies de domaine au sens général, ont été développées. Nous nous limitons ici à en présenter les deux principales qui sont couramment utilisées en génie civil ou dans les domaines connexes tels que le génie industriel. Il s'agit des méthodes « Methontology » [FER 97], et «ON-To-Knowledge» [STA 01]. Ces deux méthodes ont été élaborées suivant une vision de l'ingénierie de connaissance et en développement des logiciels (standard IEEE) pour construire des ontologies de domaines divers. Quelques exemples de résultats sont présentés au paragraphe 1.6.1.3.

- *La méthode Methontology*

Methontology est une méthodologie développée par l'équipe du laboratoire en intelligence artificielle de l'Université Polytechnique de Madrid (UPM) [FER 97]. Sa mise en œuvre repose sur les principes des standards IEEE, acronyme de « *Institue of Electrical and Electronics Engineers* » et des méthodologies d'ingénierie de connaissances [GOM 99]. Methontology est mise en œuvre suivant une démarche respectant les activités de gestion de projets (planification, assurance qualité), de développement (spécification, conceptualisation, formalisation, implémentation, maintenance) et des activités de support (intégration, évaluation, documentation). Nous présentons ci-après, les cinq étapes principales qui couvrent le cycle du développement et de l'utilisation de l'ontologie du domaine selon cette méthode :

- la **spécification** qui vise à définir l'objectif de l'ontologie de domaine en répondant à une série de questions dites de compétence d'ordre général, telles que : *a) Quel domaine va couvrir l'ontologie ?; b) Pourquoi développer l'ontologie pour ce domaine?; c) A quelles questions l'ontologie développée devra-t-elle fournir des réponses ?*
- la **conceptualisation** qui consiste à l'acquisition des informations, à la structuration et l'organisation des connaissances pour aboutir à un modèle conceptuel. Elle est réalisée à travers plusieurs sous-étapes : (i) définir le glossaire des termes ; (ii) construire la taxonomie des concepts et des relations (support partiel) ; (iii) élaborer le dictionnaire des concepts employés dans l'ontologie ; (iv) décrire les relations et les attributs de concepts ; (v) décrire les règles et d'autres assertion telles que les requêtes.
- la **formalisation**, qui vise à transformer le modèle conceptuel en un prototype d'ontologie en s'appuyant sur les méthodes de modélisation des connaissances (par exemple, la méthode des Graphes Conceptuels [SOW 88] ou des réseaux sémantiques [PAQ 02a].
- l'**implémentation**, qui traduit l'ontologie structurée et formalisée en des modèles opérationnels au travers une plate-forme logicielle. Exemple, Protégé [HEL 13], CoGui [TAI 18, BRE 18].
- la **maintenance** de l'outil, qui consiste en une phase de correction ou d'amélioration de l'ontologie créée. Néanmoins, elle ne nous concernera pas dans la mesure où nous ne développerons dans le cadre de la thèse qu'un prototype dont l'utilisation restera limitée. Les modifications et améliorations pourront faire l'objet de travaux futurs.

- *La méthode On-To-Knowledge*

On-To-Knowledge est le produit de la collaboration de trois partenaires dans le cadre d'un projet (Institut AIFB de l'Université de Karlsruhe, Université Libre d'Amsterdam, et la société British Telecom) [STA 01, GOM 04]. Elle est développée à partir d'une démarche en cinq étapes explicitées comme suit :

- étude de faisabilité (*feasibility study*), consistant en une phase d'identification du problème.

- lancement du projet (kickoff), au cours duquel sont définit, les objectifs, les conditions spécifiques requises et les sources d'information, dont la finalité est la construction de l'ontologie (souvent nommée ontologie semi-formelle).
- phase d'amélioration (refinement), durant laquelle l'ontologie précédemment créée est améliorée par les experts du domaine qui apportent leurs savoirs pour répondre aux objectifs fixés dans l'étape précédente (kickoff).
- phase d'évaluation consistant en un processus sur trois niveaux (technologique, utilisateur, ontologique), qui aboutit à la validation de l'ontologie pour son utilisation en production.
- phase de production et d'évolution (application et évolution), durant laquelle l'ontologie implémentée est exploitée.

La particularité de *Methontology* par rapport à *On-To-Knowledge*, est qu'elle est plus compréhensible et permet la réutilisation d'autres ontologies existantes de domaine, ce qui constitue un aspect très fort pour l'adapter dans n'importe quel contexte d'usage. Sa phase d'exploitation et d'évolution constitue également un critère de choix important qui s'inscrit dans une vision d'optimisation des stratégies de gestion des connaissances des ouvrages en service. Nous nous appuierons sur la méthodologie *Methontology* pour développer une nouvelle démarche de description des connaissances répondant à nos besoins relatifs à l'analyse de défaillances des ponts (voir chap.2, §2.2).

Nous venons d'expliciter les éléments de base d'une modélisation de connaissances et les quelques limites de certains modèles disponibles. Pour matérialiser cette discussion, nous illustrons sur les figures 1.16 et 1.17 un extrait de discussion sur un modèle typique disponible dans [HEL 13]. Cette discussion fait référence à trois critères que nous avons identifiés pour comparer l'utilité d'un modèle de connaissances dans une vision collective [FOR 13, STU 98] ou dans un cadre de modélisation d'ouvrage de génie civil [PRA 00] :

- **la compréhension de la description du domaine** : un modèle de connaissance doit permettre la perception d'un domaine d'étude sans ambigüité afin de favoriser un consensus dans l'organisation et dans le partage des connaissances entre experts,
- **la facilité d'exploitation (et de raisonnements)** : un modèle de connaissance doit pouvoir faciliter la manipulation des connaissances formalisées pour décrire les conditions auxquelles un ouvrage peut être soumis ou en prédire ses états futurs.
- **la réutilisation** : une modélisation de connaissance d'ouvrages doit pouvoir ouvrir vers des possibilités d'adaptation et d'évolution du modèle pour développer d'autres raisonnements nécessaires à l'étude des défauts des constructions (aspect générique de la description…).

Ci-dessous l'extrait du modèle de connaissances des ponts en acier [HEL 13].

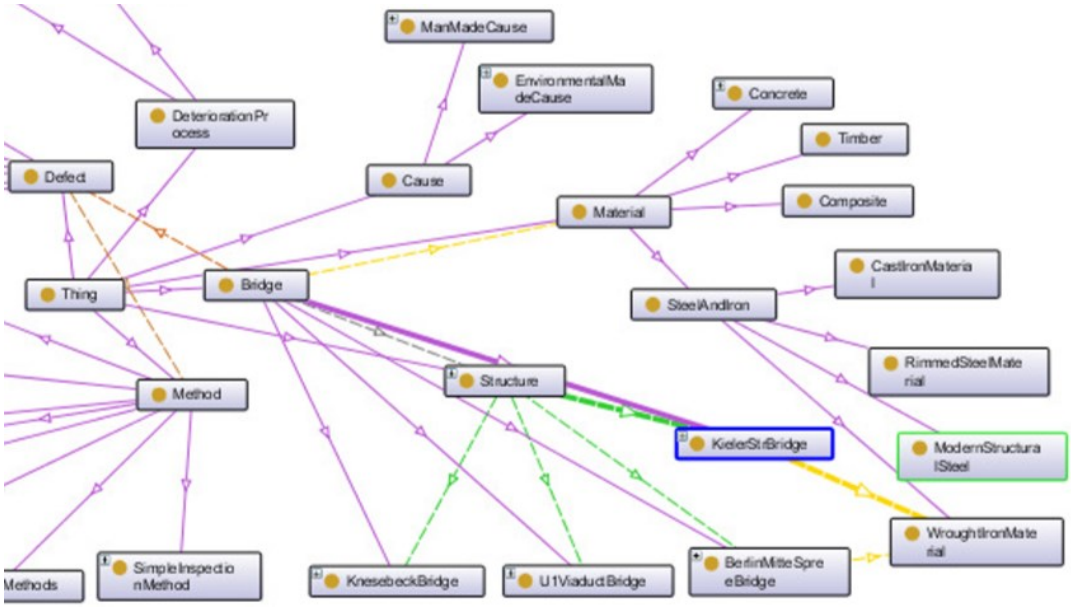


Figure 1.16 : *Extrait du modèle BrOntEx des ponts en acier [HEL 13]*

Au-delà de la pertinence du modèle développée pour décrire les connaissances des ponts en acier dans le contexte d'étude, quatre constats essentiels méritent d'être relevés :

La modélisation (fig.1.16) ne considère pas le facteur de temps pour décrire les processus de détérioration de matériaux. Un tel manque constitue une des lacunes pour mieux situer l'état de propriété d'un matériau de composant de pont à un stade donné de son exploitation. D'un point de vue exploitation, le modèle proposé n'offre pas une manipulation facile des connaissances et ne développe pas un cadre de description des détériorations d'ouvrages qui puisse permettre la quantification des variables d'observation (i.e. l'intégration des valeurs de propriétés de matériaux comme attribut de concept…).

Aussi, cette modélisation (fig.1.16) ne propose pas des règles expertes pour décrire par exemple l'effet qu'un processus de détérioration peut avoir sur le matériau et sur les performances d'un composant au cours du temps. La figure 1.17 qui illustre un extrait de résultat d'interrogation de ce modèle met en évidence cette discussion.

Concernant l'aspect de réutilisation, bien que certains concepts génériques soient réutilisables tels que « matériau, composant », le modèle est trop fragmenté et n'offre qu'une vision parcellaire. Cela est justifié par le fait qu'il ne couvre qu'un seul champ d'application alors que le domaine global de gestion des ponts en comprend plusieurs.

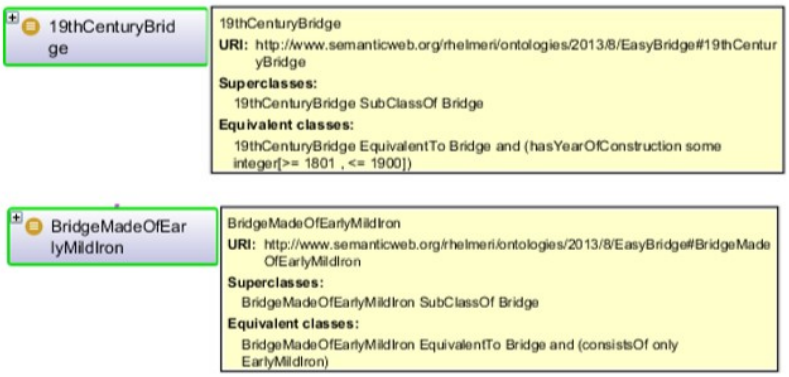


Figure 1.17 : *Extrait de résultats de requête d'interrogation du modèle [HEL 13]*

L'interrogation du modèle à travers cette illustration consiste à l'extraction des concepts équivalents ou qui partagent les mêmes propriétés. Le lecteur est renvoyé vers [HEL 13] pour plus de détails sur la formulation des requêtes d'interrogation (et aussi pour une meilleure qualité de l'image sur les figures 1.16 et 1.17). De ces quatre constats, il est évident qu'une nouvelle modélisation est souhaitable afin de considérer les points discutés ci-dessus. Cette problématique prioritaire va être au centre de notre modélisation dans les chapitres suivants de la thèse (chapitre 2, 3 et 4). Après cette revue sur les Ontologies de domaine, la partie 1.5.2 donne un aperçu sur le *BIM*.

1.5.2-Modèle basé sur le BIM

Le ***BIM***, acronyme de «*Building Information Modeling*» est une Modélisation des informations du Bâtiment. La notion de Bâtiment considérée dans le **BIM** est générique, et englobe également les infrastructures de génie civil. Dans [EAS 11], le BIM est défini comme «une technologie de modélisation et un ensemble de processus associés pour produire, communiquer et analyser des modèles de constructions ». D'après [GRI 10], le BIM s'inscrit dans le besoin de faciliter la mise en place d'un cadre de collaboration et de communication pour permettre, a) au propriétaire de mieux exprimer les besoins de la finalité du projet, b) une conception, le développement et l'analyse des enjeux du projet, c) la gestion de la construction, d) la gestion des opérations de la construction en phase d'exploitation. Cet outil (BIM), s'inscrit donc dans le besoin d'un changement de paradigme dans la manière d'envisager l'acte de concevoir, de construire et de gérer les constructions (bâtiment, infrastructure, ouvrages d'art…).

Le *BIM* s'intéresse également à la méthode de travail à travers la manipulation des maquettes numériques appliquées à la conception de bâtiments. D'après [TOL 16, ZHA 15], l'intérêt du *BIM* est de permettre aux utilisateurs de mieux gérer les interfaces et de partager une information (en termes de qualité) en assurant l'interopérabilité entre les outils en interaction. Davila et al. 2016 [DAV 16] ont estimé que l'outil (BIM) a pour objectif principal de gérer les représentations numériques et des informations des actifs durant leur cycle de vie, afin d'améliorer la productivité et la qualité tout en réduisant les coûts. Les trois idées de base

que nous pouvons retenir de ces définitions sont : l'interopérabilité entre les logiciels pour faciliter le transfert de connaissances, la bonne précision des détails techniques du dessin d'architecture/structure, l'optimisation et la gestion des ressources pendant la construction, etc.

D'après la littérature [TOL 16, DAV 16, ZHA 15], la modélisation d'un BIM (de manière générale) repose souvent sur quatre éléments à expliciter : les exigences, le domaine, et le logiciel de modélisation, l'interopérabilité entre les plates-formes logicielles. Parmi ces quatre éléments, les trois premiers ont un sens commun avec la modélisation basée sur l'ontologie de domaine. Pour cela, nous préconisons d'expliciter la notion d'interopérabilité avant de présenter la revue des quelques travaux identifiés.

1.5.2.1- Notion d'interopérabilité dans le BIM

L'interopérabilité est une habileté d'échanger les informations structurées entre les différentes plates-formes logicielles (et ou les modèles d'applications). En d'autres termes, pour un modèle BIM, l'interopérabilité vise non seulement la compatibilité des logiciels utilisés, mais aussi une collaboration entre acteurs sans perte (inopinée) d'informations dans le circuit de communication [TOL 16, ART 07]. Mais cet aspect semble encore être mal pris en compte dans l'interaction entre les plates-formes modélisant la logique sémantique du vocabulaire et les logiciels du dessin architectural qui sont plus orientés vers la précision du dessin technique. Dans les modèles basés sur l'ontologie du domaine, cet aspect est actuellement pris en compte par le vocabulaire du domaine, ce qui facilite l'interaction entre les acteurs au travers d'un lexique commun, [DIA 00] cité dans [TOL 16]. Dans ce qui suit, nous allons illustrer comment les modèles ont été développés dans le secteur de la construction.

1.5.2.2- Illustration de quelques travaux sur les modèles BIM disponibles

- Tolmer C.-E. 2016 [TOL 16], a travaillé sur un modèle BIM dans le domaine de la construction d'infrastructures en zone urbaine. L'objectif de son travail était d'aider à résoudre deux problèmes : d'une part le problème de gestion des interactions entre les enjeux (respect des exigences du projet) et les avis des acteurs dans le management de projet, et d'autre part de modéliser les objets du projet en intégrant toutes les composantes de l'environnement urbain à des échelles correspondantes. L'outil de modélisation utilisé était le BPMN « *Business Process Model and Notation* ».
- Davila et al. 2016 [DAV 16] ont développé un modèle BIM dans le domaine de l'ingénierie des ponts pour gérer les données de surveillance structurelles des ponts. Leur BIM repose sur les informations collectées dans les fibres optiques installées sur les ponts en béton précontraint (au Royaume-Uni). La plate-forme logicielle de modélisation (ce qui inclut l'implémentation) était le Web, qui permettait selon les auteurs [DAV 16], d'implémenter et de consulter directement les données sous forme de graphiques et de feuilles de calcul.
- Zhang et al. 2015 [ZHA 15] ont développé un BIM couplé à l'ontologie (JHA) pour l'analyse automatisée des risques dans les projets de bâtiments en Chine. L'ontologie

(JHA) intégrée au BIM a été développée à base du formalisme (langage OWL) implémenté dans la plate-forme Protégée. Le modèle développé consistait en une description graphique des informations sur le management des projets (fig.1.18). Pour permettre l'interopérabilité entre le modèle d'ontologie et le modèle BIM, un prototype de (plug-in)[3] compatible avec le langage OWL a été proposé.

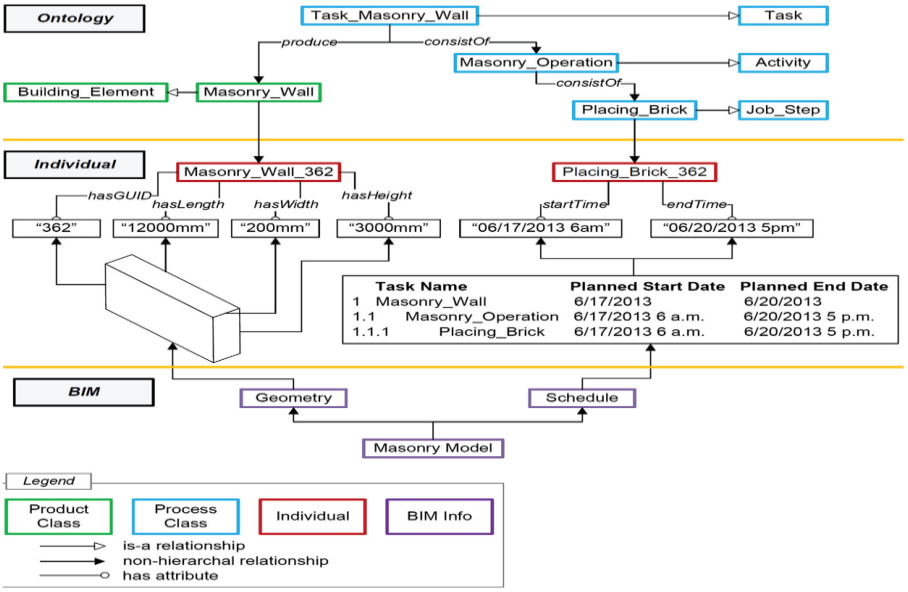


Figure 1.18 : *Illustration du modèle BIM - Ontologie (JHA) [ZHA15]*

La lecture de ce modèle nous donne le constat suivant : les auteurs ont appliqué la logique de description de connaissance utilisée dans les modèles d'Ontologie de domaine pour combler certaines lacunes de raisonnement logique avec les modèles BIM. Par exemple, les termes nommés individus dans la partie BIM tels que « geometry », ne sont manipulables qu'avec leur concept générique ou classe correspondant dans la partie ontologie (exemple, masonry_wall), les deux niveaux interconnectés par une identité numérique (masonry_wall_362). Néanmoins, trois lacunes sont observables. La première est le manque de logique de description entre les différentes hiérarchies du modèle prenant en compte l'aspect du transfert d'information (héritage d'attributs) entre les termes (individus) de même classe sur différents niveaux. Un résumé sur la logique de description de connaissance est explicité au chapitre 2.

La deuxième lacune est la difficulté d'assurer effectivement l'interopérabilité entre le modèle d'ontologie (implémenté dans Protégé) et le BIM (dans l'Autodesk), même si des solutions ont été envisagées. La troisième lacune, est la difficulté d'accéder à des informations sur les ouvrages achevés (projets publics) dans certains contextes où elles sont réservées aux administrateurs gouvernementaux. Cette dernière lacune a déjà été signalée dans [HEL 13].

[3] Prototype plug-in BIM « https://wrw.is/autodesk-bim-interoperability-tools-updated/ »

McGuire B.M. 2014 [MC-G 14] a réalisé un BIM dans le domaine de l'ingénierie des ponts, noté *BIEM*. Son travail (thèse) visait la modélisation d'informations des ponts en phase de construction pour une utilisation future en suivi des ponts dans la phase d'exploitation. Le champ d'application de la modélisation était l'analyse (mécaniste) des défaillances des composants de ponts à l'aide d'une interface de calcul automatisé (DET) intégré au logiciel *Autodesk*[4]. En termes de finalité, son travail s'inscrit dans l'une des dimensions d'application de notre modèle, mais malheureusement le développement de sa modélisation est purement orienté vers une analyse mécaniste, ce qui n'est pas le cas pour nous.

La figure 1.19 montre un extrait de modèle BIM développé dans [MC-G 14] pour l'évaluation de l'état des ponts.

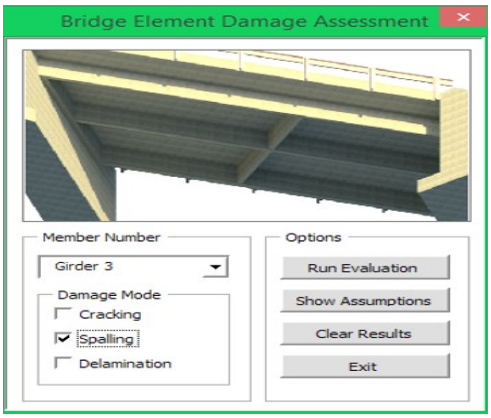


Figure1.19 : *Illustration du modèle d'évaluation de ponts[MC-G14]*

Cet extrait du modèle (fig.1.19) est alimenté par les données de mesures d'inspection pour procéder à l'évaluation de l'état des composants du pont. Par rapport à notre contexte, cette modélisation présente deux lacunes. La première est la nécessité de disposer d'une documentation riche en information (plans détaillés de mise en œuvre, notes de calcul…), ce qui est fastidieux, voire illusoire dans certains contextes où ces informations sont absentes. La deuxième (lacune) est l'absence de la dimension du vocabulaire (ontologie), qui risquera de limiter la réutilisation du modèle à des fins de raisonnements logiques. Cette revue sur les deux modélisations explicitées ci-dessus (Ontologie de domaine, BIM), permet de retenir quelques idées fortes par rapport à notre problématique.

1.5.3-Bilan sur les modèles Ontologie de domaine et BIM

La lecture des travaux récents sur les deux outils permet de souligner avec intérêt la pertinence des contributions des différents auteurs cités ci-dessus, qui s'appuient sur une méthodologie proche des réalités du domaine (Methontology). Ceci semble justifier en quoi la modélisation de l'information en génie civil devient un levier entre les pratiques techniques et

[4] https://knowledge.autodesk.com/fr/support/

l'évolution actuelle des besoins des gestionnaires d'ouvrages [TOL 16, HEL 13]. Néanmoins nous sommes conscients d'après Fernandez-Lopez et al. 2002 [FER 02], du fait que les méthodologies disponibles pour la modélisation (ontologie) n'offrent toutefois pas de consensus autour des meilleures pratiques ou applications à adopter. Cet argument nous permet de donner un bref aperçu comparatif des travaux sélectionnés en nous référant aux critères déjà retenus (§1.5.1.4).

1.5.3.1- Travaux de modèles d'ontologie de domaine

Les modèles actuellement disponibles en génie civil souffrent de trois principales lacunes. Du point de vue réutilisation, les modèles sont très spécifiques et fragmentés. Ils ne peuvent couvrir qu'une vision parcellaire de la modélisation d'information sur les systèmes existants [VAT 09, WAN 09a, HEL 13, LIU 16, TIB 17]. Les modèles développés à des fins d'analyse de défaillances [HEL 13, LIU 16, VAT 09, CHA 13] n'intègrent pas l'aspect générique de la modélisation et la dimension d'analyse multidisciplinaire. Cela ne permet pas leur utilisation pour mener par exemple des raisonnements sur des cas spécifiques. En termes d'exploitation (conceptualisation), les modélisations souffrent d'une insuffisance graphique et de manipulation de la connaissance pour être adaptées à des dimensions plus approfondies d'applications en génie civil : l'analyse des défaillances, l'évaluation de performance ou de fiabilité, la modélisation de l'évolution des états d'ouvrages, etc. Les raisons peuvent se trouver dans le type de formalisme de représentation de connaissance (i.e. RDF-OWL qui semble plus orienté sur les ontologies du langage web). Des questions essentielles restent donc ouvertes comme nous l'avons vu en introduction générale, par exemple, *comment exploiter les mesures d'inspections au travers de ces modèles ?*

1.5.3.2- Travaux de modèles BIM

Les modèles développés sous forme de BIM sont plus spécifiques au projet de construction, en restant plus orientés sur la conception de l'ouvrage. Ils nécessitent la sémantique d'ontologie pour intégrer une vision globale de raisonnement logique (par exemple, pour rechercher les scenarios de mécanismes de défaillances sur les ouvrages existants) [ZHA 15]. La dimension d'interopérabilité entre les plates-formes logicielles de représentation des vocabulaires sémantiques du domaine et les logicielles purement de conception des structures reste encore moins exploités dans le contexte des applications sur la gestion des ouvrages existants [MC-G 14]. Aussi, ces outils impliquent un accès sans restriction aux documents des constructions achevées qui restent généralement de la seule propriété du maître d'ouvrage (propriétaire d'actif). Les modèles BIM constituent donc actuellement des outils essentiels pour l'assurance qualité des constructions civiles [ZHA 14, ZHA15, ART 07, FEN 17, TOL 16, LEE 11].

1.5.4-Positionnement de la thèse par rapport à la modélisation

L'examen des modèles de connaissances disponibles en génie civil nous amène à estimer qu'il n'existe pas actuellement de modèle opérationnel de connaissances qui offre une

vision globale pour coupler plusieurs champs d'applications : environnement des ponts, analyse fonctionnelle, science des matériaux, ingénierie forensique, gestion et la maintenance des ponts… (voir chapitre 3§3.1.2 ; 3.5). Par rapport aux objectifs de cette thèse, ces ontologies ne sont pas adaptées à notre problématique pour des raisons déjà évoquées tout au long de cette revue sur les modèles de connaissances. Seule la réutilisation de certains concepts (génériques), tels que « matériau, composant » dans [LIU 16, HEL 13], « ressource, activité, acteur » dans [ZHA 15, XIN 16] peut se révéler intéressante. En ce qui concerne le BIM, nous pouvons illustrer deux raisons de son inadéquation à notre problématique : l'absence de la dimension de manipulation des concepts à travers les logiciels architecturaux et la nécessité de prendre en compte l'exigence d'interopérabilité entre les plates-formes logicielles. L'examen de quelques modèles [ZHA15, ART 07, TOL 16] a montré qu'il est actuellement difficile de réaliser des simulations numériques et de stocker la connaissance factuelle sous forme d'historique pour les observations. Or, nous voulons développer cette dimension pour prendre en compte le transfert de l'information d'abord entre les sous-domaines en interaction en gestion des ponts avant de l'étendre à un niveau plus général (par exemple des pouvoirs publics). Dans ce cadre, mon travail de thèse va se positionner sur **une modélisation conceptuelle basée sur les Graphes Conceptuels associant une dimension d'ontologie de domaine (vocabulaire)**. Cette préconisation constitue une alternative entre ces deux outils actuellement exploités en génie civil (Ontologie de domaine, BIM). Un premier travail a tenté de poser les bases sur de telles dimensions (pratiques du génie civil) en réalisant des raisonnements intuitifs au travers des règles conceptuelles [TAI 18, BRE18]. Nous présenterons cet outil ainsi que sa plate-forme logicielle de manipulation au chapitre 2.

1.6- Synthèse du chapitre

La revue approfondie que nous venons de présenter a permis de mettre en exergue les défis ultimes et les outils pour les pratiques de gestion des parcs de ponts. Par rapport au aux enjeux de gestion patrimoniale des ponts en milieu tropical, différents facteurs inhérents à l'efficacité des pratiques d'exploitation ont été identifiés. Il s'agit :

- des spécificités locales et régionales qui s'expliquent par la variété des contextes d'exploitation et des conditions défavorables du climat tropical. Les facteurs explicites sont, les divers aléas extrêmes « mouvements de terrains, volcans, inondations, pluies abondantes…», le vieillissement rapide des structures, et les processus variables d'altération de matériaux, etc.
- la diversité et la variété des constructions qui peuvent expliquer en partie l'inefficacité des pratiques de gestion patrimoniale : la variété et l'hétérogénéité des matériaux, la variété de la nature des composants des structures et leurs interactions avec l'environnement, l'évolution des modes de construction et les défauts distincts des performances des structures.
- l'absence des données utiles, de l'historique d'exploitation, de conceptions/modes de construction des ouvrages, ce qui risque de limiter la mobilisation d'un ensemble important de champs techniques d'ingénierie.
- la récurrence des défauts des constructions associés aux contraintes budgétaires.

- le déficit en compétence opérationnelle pour faire face à l'ampleur des champs techniques d'ingénierie (diagnostic, surveillance, analyse de défaillances, maintenance, exécution…).
- l'ambigüité des communications entre les multiples acteurs, qui suivant les phases du cycle de vie des ouvrages, contribuent à l'inhomogénéité et à la perte de l'information.

De ce qui précède et par rapport aux objectifs de ce travail de thèse, les différents outils examinés sont peu adaptés. Pour les outils traditionnels de gestion patrimoniale (§1.3) et les champs ou outils techniques d'ingénierie (§1.4), l'absence de connaissances structurées sur les ouvrages concernés, est l'une des raisons principales. Par exemple pour les outils (PONTIS, BRIDGIT…), certains auteurs ont estimé que ceux-ci sont encore limités pour prendre en charge la prévision et la compréhension avancée des situations de défaillances des ponts dans les contextes à incertitudes multiples [LIU 16, FRA 07]. Aussi, pour les champs techniques (outils techniques d'ingénierie), certains auteurs sont unanimes sur le fait que leur application en contexte industriel nécessite des données disponibles [BRE 11b, BRE12, CRE 02]. Nous estimons qu'avec la production et l'organisation des connaissances telles que préconisées dans cette thèse via la modélisation des connaissances, va permettre de mettre en valeur ses différents outils dans le contexte de l'étude. Cependant, l'examen des modélisations disponibles en génie civil nous a amené à estimer qu'il n'existe pas actuellement de modèle de connaissances opérationnelle qui offre une vision globale couplant plusieurs champs d'applications et permettant des manipulations plus avancées.

Développer une modélisation générique unifiée qui intègre les connaissances utiles, permettant ainsi des raisonnements efficaces grâce aux capacités du formalisme des graphes conceptuels que nous comptons exploiter semble être une alternative intéressante. Alors que la plupart des travaux de recherche ont été consacrés jusqu'à présent aux modèles théoriques et numériques de modélisation de la détérioration [FRA07, FRA 04, STE 03, SHE 03], notre travail proposera une vision holistique d'analyse des défaillances par la modélisation à des fins de raisonnements (simulations logique et numérique…). Le bénéfice de la modélisation que nous développons dans ce travail est triple : décrire et organiser les connaissances du domaine d'étude, structurer des modèles d'applications pour faire des simulations à des fins d'analyse des défaillances, et développer une base relationnelle des cas pour faire le suivi des ouvrages et l'ingénierie forensique. Mais se posent encore des questions (scientifiques) telles que : *1) en quoi consistent les incertitudes associées aux lacunes identifiées et comment y répondre ? 2) comment considérer simultanément tous ces domaines afin de construire un modèle complet et pertinent ?*

Tels sont les défis du chapitre 2 qui pose les bases de cette modélisation. Dans le chapitre 2, nous expliciterons premièrement les incertitudes associées aux ponts de manière générale et aux modèles de connaissances. Et deuxièmement nous développerons les étapes illustrant notre démarche pour la description des connaissances et l'analyse de défaillances. Le développement de cette démarche sera argumenté par des illustrations qui sont au cœur de notre application.

Chapitre 2 Graphes conceptuels et organisation de la connaissance pour décrire et analyser les défaillances des ponts existants

Les objectifs primordiaux des gestionnaires de parc de ponts explicités au chapitre 1 peuvent être résumés en deux enjeux techniques qui sont :

- **diagnostiquer** continuellement les ouvrages afin d'engager des actions préventives de maintenance aux moindres coûts,
- prendre les **meilleures décisions** qui s'imposent pour anticiper les situations de défaillances qui peuvent survenir sur les ponts en service.

Ces deux enjeux majeurs impliquent un besoin d'informations suffisantes qui doivent être transférables et manipulables durant le cycle de vie des ouvrages, pour pouvoir identifier les ouvrages dégradés et nécessitant une intervention. La figure 2.1 illustre les enjeux techniques de la gestion d'ouvrages existants au travers d'une pyramide. La flèche (1) retrace les cinq principaux niveaux de besoin de connaissances dans un cadre de diagnostic d'ouvrages peu connu jusqu'à la prise de décision. La flèche (2) exprime la nécessité de capitaliser les informations ayant servi à la prise de décision pour enrichir le retour d'expérience des experts.

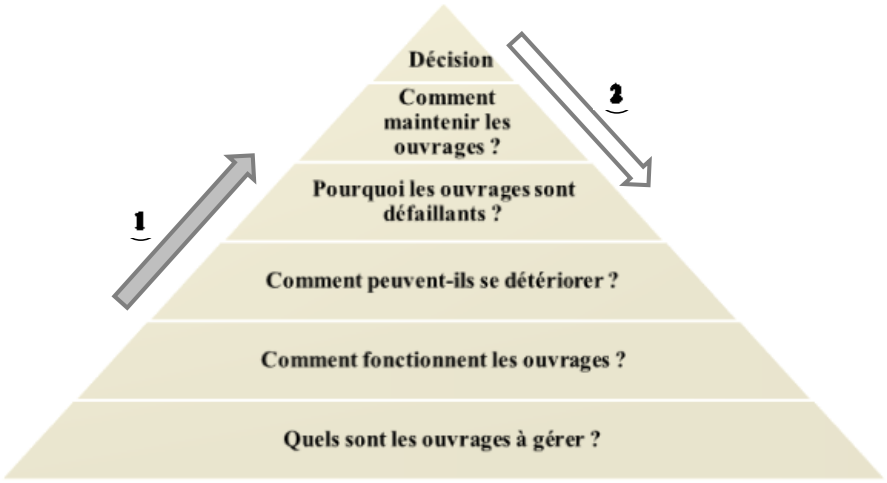


Figure 2.1 : *Pyramide des besoins de la connaissance pour la gestion des ponts*

Les enjeux de gestion patrimoniale illustrés sur la figure (2.1) mettent en exergue cinq niveaux de diagnostic d'ouvrages qui correspondent à un ensemble de champs techniques. Par exemple, l'inspection d'ouvrage (premier niveau, fig.2.1), l'analyse de sûreté de fonctionnement (second niveau, fig.2.1), etc. L'importance des tâches de diagnostic et la

diversité des modes de défaillances d'ouvrages mal documentés se traduisent souvent par des contraintes d'investigation qui peuvent s'imposer aux spécialistes du métier. Pour diagnostiquer de tels ouvrages, il faut :

- décrire les types d'ouvrages afin de disposer la connaissance nécessaire à la description du domaine d'investigation (ou d'étude) ;
- identifier les processus d'altération des matériaux et les fonctions des ouvrages ;
- connaître les lois de dégradation pour décrire les états présents et futurs ;
- établir les lois de fonctionnalité d'ouvrages en service ;
- capitaliser la connaissance utile pour disposer de l'historique des ouvrages…

Afin de considérer l'ensemble de tâches ci-dessus listées, le recours à la modélisation de connaissances est d'intérêt pour mener des investigations sur les ouvrages d'étude. De même, pour supporter les phases d'acquisition et d'organisation de connaissances, il faut disposer d'un outil adapté pour la modélisation. Mais la présence de divers facteurs de risque qui interagissent souvent dans l'organisation d'ouvrage, peut engendrer deux difficultés pour les modèles de connaissances [BOU 00] :

- la nécessité de coupler des modèles de connaissances propres à chaque type d'ouvrage dans le cadre de l'analyse de dégradation de ses performances. Par exemple, la prise en compte de l'environnement, du facteur « temps » et de l'état d'ouvrage pour simuler son vieillissement.
- la difficulté à renseigner les modèles de connaissances avec des informations quantitatives (i.e. la valeur de l'état initial d'un ouvrage sans historique d'exploitation).

De ce qui précède, au-delà du besoin d'acquisition de données sur les constructions comme évoqué au chapitre1 (§1.6), deux points essentiels également sont à traiter dans la thèse. Il s'agit de montrer en premier lieu comment simuler l'évolution des états d'ouvrages à partir des hypothèses (physiques, possibilistes…). Une illustration est présentée dans ce chapitre (§2.5). En second lieu, nous allons considérer la particularité des modes de défaillances de composants de ponts et la variabilité de processus d'altération pour l'évaluation de leur performance. Cette ambition implique à la fois de la modélisation prédictive (description logique de la connaissance) et des simulations numériques pour répondre aux enjeux de diagnostic de systèmes existants. Ces points évoqués (description logique de la connaissance d'ouvrages, simulation numérique…) introduisent la notion d'**incertitudes** auxquelles, les modèles de connaissances et les décideurs de gestion d'ouvrages risquent d'être confrontées [SIA 97, CRE 02, WEN 03, BAR 11, SAY 13]. Ces incertitudes sont multiples et nécessitent d'être mieux prise en compte afin de développer une modélisation pertinente de connaissances qui soit capable de :

- considérer un grand nombre de sous-domaines en interaction ;
- prévoir l'évolution temporelle des états d'ouvrages durant la phase d'exploitation ;
- reproduire la connaissance sur les situations de défaillance passées.

Dans ce chapitre nous exposons les différentes étapes de description des connaissances, en mettant l'accent sur la notion d'incertitudes et sur les outils de modélisation (formalisme…).

2.1- Incertitudes en matière d'exploitation des ouvrages d'art existants

Les incertitudes peuvent décrire d'une part, le caractère imparfait des informations dont les ingénieurs disposent sur les situations d'études (cas) ou un état mal connu d'ouvrages. Et d'autre part, le caractère limité (ou imprécis) des modélisations disponibles [CRE 02, BRE 09, LIU 16]. Dans le cadre la gestion des ponts existants et de la modélisation de leurs connaissances, d'après les recherches déjà citées, nous pouvons regrouper ces incertitudes en trois familles [SIA 97, WEN 03, BAR 11, SAY 13, BRI 05] : les incertitudes aléatoires, les incertitudes épistémiques, et les incertitudes heuristiques.

2.1.1-Incertitudes aléatoires

Les incertitudes aléatoires proviennent de la variabilité propre aux phénomènes et de la nature latente des facteurs physiques liés à la détérioration de système d'ouvrages (par exemple, l'action variable du vieillissement de matériaux…). Pour les ponts, ces incertitudes peuvent provenir de facteurs tels que : processus d'altération, surcharges imposées aux structures existantes, environnements interagissant avec le système, la variété (spatiales ou temporelles) des propriétés des matériaux, l'évolution des fonctions de l'ouvrages ou de ses composants, etc. Pour de telles incertitudes généralement considérées comme irréductibles [BAR 11, SAY 13], nous allons procéder par des simulations numériques des lois physiques de modélisation d'ouvrages. L'intérêt est de stocker la connaissance reproduite par les simulations pour mener un bon suivi des performances des ponts existants. Ces simulations reposent sur la logique du premier ordre des Graphes Conceptuels qui permettent différentes opérations logiques en modélisation de connaissances (inférence de règles expertes, projections…) [KLE 71, MUG 09, BRE 18] (§ 2.5).

2.1.2-Incertitudes épistémiques

Les incertitudes épistémiques sont liées au manque de connaissances (format inexploitable, caractère limité et hétérogène), qui risque d'engendrer l'inadéquation des modèles et des outils existants en génie civil [CRE 02, BRI 05, FRA07, SAY 13]. La nécessité de disposer de la connaissance en format manipulable peut expliquer cette famille d'incertitudes dans deux contextes d'investigation des ouvrages : la difficulté de traduire les hypothèses non documentées de modélisation d'ouvrages (relations empiriques, lois physiques) pour connaître l'état d'un système ou de ses composants avant l'apparition d'une situation de défaillance. La difficulté de structurer les données du retour d'expérience non formalisées pour décrire les scénarios de mécanisme de défaillance d'un ouvrage ancien dont l'histoire a été perdue. La figure 2.2 illustre ce manque de connaissances dans un domaine tel que l'**ingénierie forensique** où la nécessité de tirer des leçons sur des cas de défaillances s'impose (cas du pont Mouyondzi, **chap.1.2**).

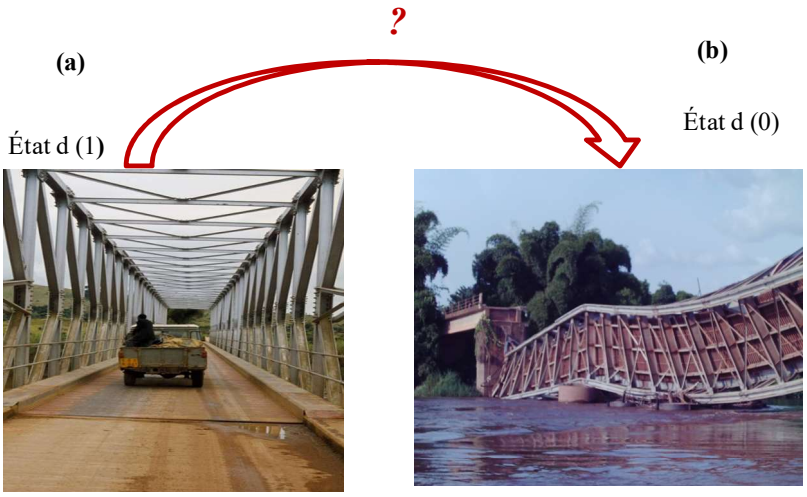


Figure 2.2 : *Enjeu de l'ingénierie forensique sur ouvrage non documenté*

L'état d(1) sur cette figure 2.2 (a) signifie que l'ouvrage est en état de sûreté (a priori sans défaillance), et l'état d (0) sur la figure 2.2(b) représente la situation de défaillances dans laquelle le pont s'est retrouvé. Des enquêtes faites auprès des gestionnaires en charge de ce parc d'ouvrages ont révélé que ce pont n'a pas été documenté après sa construction. La question dans ce cas est celle de savoir, *comment pouvons-nous reproduire la connaissance nécessaire pour décrire les circonstances de la défaillance d'un tel ouvrage mal documenté* ?

D'après la revue de littérature au chapitre 1 (§1.5), les modèles de connaissances disponibles en génie civil n'ont pas traité cette question qui est essentielle pour l'efficacité des pratiques de gestion des ponts en service : cas des ontologies, BrOntEx [HEL 13], BridgeOnto [LIU 16], modèle de [WAN 09a], etc.

Contrairement aux incertitudes aléatoires, les incertitudes épistémiques peuvent davantage être réduites, par des efforts de développement des connaissances du domaine (acquisition, vocabulaire, identification et intégration des variables des lois physiques…) [BRE 09, BAR 11, ANG 11]. Des illustrations applicatives sont présentées dans ce chapitre (§ 2.5).

2.1.3-Incertitudes heuristiques (et organisationnelles)

Les incertitudes heuristiques peuvent être liées, d'une part au déficit d'organisation de la connaissance et du formalisme utilisé pour faire expliciter cette connaissance aux experts sans introduire de biais [FER 92]. D'autre part, elles peuvent être liées à l'insuffisance de consensus entre les logiques de raisonnements des experts et au grand nombre d'informations (hétérogènes) détenues par ces derniers. Ceci peut être à l'origine des erreurs humaines qui risquent de limiter les possibilités de prédire avec pertinence l'évolution des ouvrages [BAR 11, ANG 11] ou ce qui peut contribuer à l'inadéquation des modèles de connaissances pour décrire l'historique d'ouvrages.

Une des illustrations d'incertitudes heuristiques dans le contexte de l'analyse des défaillances, est la difficulté de faire remonter l'information avec les modèles disponibles de connaissances (fig.2.3). Par exemple, *comment peut-on transférer de manière logique l'information d'un enchaînement de défaillance de pont à travers ses différents niveaux de description* ?

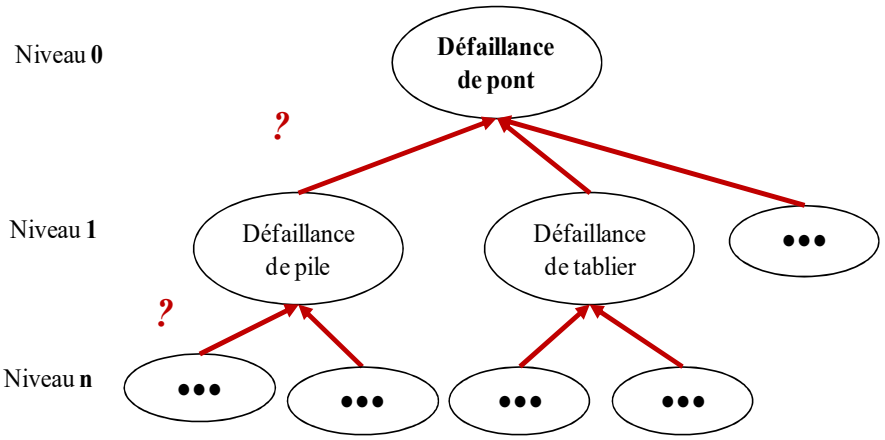


Figure 2.3 : *Enjeu de transfert logique d'informations de diagnostic d'ouvrages*

La revue de littérature (chapitre 1, §1.3) montre que les outils traditionnelles de gestion patrimoniale évaluent l'état des composants des ponts, mais sans pouvoir transférer les notes d'état d'un niveau d'échelle à un autre de la décomposition de ces ouvrages. Aussi, le caractère trop spécifique des modèles disponibles de connaissances (chapitre 1, §1.5), qui ne couvrent pas une grande partie du domaine d'ingénierie des ponts, sont au tant des exemples d'illustration des incertitudes procédurales.

Nous proposons de considérer ces incertitudes heuristiques à travers une organisation générique unifiée des connaissances et des raisonnements logiques (formalisation d'hypothèse, des lois, des règles…). Nous montrerons comment cela est possible par le recours au formalisme des Graphes Conceptuels « CGs » [SOW 84]. L'illustration présentée dans ce chapitre à ce propos (organisation de connaissance) concerne la structuration d'un graphe générique pour simuler le vieillissement de système d'ouvrages (voir §2.5.3).

La discussion sur les incertitudes est déterminante pour situer ce que nous espérons de la modélisation des connaissances du domaine d'étude (**Br3KM**). Par exemple, en termes de cohérence, de contenu, de structure et du niveau de finisse de la description logique de la connaissance, ainsi que des possibilités d'applications de la modélisation Br3KM, etc. Nous introduisons dans les paragraphes suivants les notions développées au fil du chapitre (connaissance du domaine, Graphes Conceptuels…), des réponses à quelques questions posées (thèse), ainsi que les illustrations apportées.

2.2- Notion de connaissance du domaine

La notion de **connaissance « *knowledge* »**, a été définie par [WAN 09b], comme : « une information organisée que l'on peut appliquer pour la résolution de problèmes ». Elle découle de l'information, alors qu'une information dérive des données collectées [DAV 98, H OW 96]. Une **connaissance** est aussi considérée comme une compréhension des **Faits**, des informations, des descriptions ou des compétences qui sont acquises par l'expérience ou par l'apprentissage, etc. D'après [GRU 96, NON 95, BAS 04], une connaissance en ingénierie peut être décrite de deux manières :

- une connaissance tacite « savoir-faire de l'entreprise » (par exemple, l'interprétation des données d'auscultation, la proposition des actions nécessaires à la correction d'une altération de composant…).
- une connaissance explicite « savoir-de l'entreprise, compréhension théorique d'une situation donnée » (par exemple la modélisation des lois d'altération de propriétés de matériaux, la connaissance des mécanismes physiques d'un processus d'érosion externe…).

Nous abordons une connaissance en génie civil comme une information formalisée sous forme de **concepts et des relations pour structurer, l'organisation du système d'ouvrage, les hypothèses et les faits, etc.** Une des particularités de notre idée pour la modélisation de la connaissance d'ouvrages est de pouvoir comprendre de manière simple et logique les actions des facteurs de risque sur les ouvrages (par exemple, l'action du trafic sur une pile ou sur un tablier de pont à poutres isostatiques …).

2.2.1-Notion de concept

Un **concept (C)** est « une unité de connaissance formalisée qui explicite une donnée, un objet physique ou un élément constructif, et sur laquelle on peut structurer des raisonnements sur les Faits ». Par exemple, un composant et un matériau d'ouvrage de génie civil sont des types de concepts du domaine d'ingénierie de système d'ouvrages [HEL 13]. La notion de concept (ou classe) correspond à ce que Gruber T. 1993 [GRU 93] considère comme une abstraction pertinente d'un segment de la réalité du domaine d'étude. Dans la modélisation de connaissances d'ingénierie, il est courant de décrire la connaissance du domaine sous forme d'un concept représenté suivant deux typologies [POT 14a, TAI 18] : un concept générique et un individu de ce concept. Ce découpage correspond à la logique de description des connaissances à travers la théorie des **Graphes Conceptuels** que nous exposons dans ce chapitre (§2.3.3).

2.2.1.1- Concept générique

Un concept générique (C) est une unité de connaissance (type) qui permet de décrire la connaissance d'un ouvrage au sens général (connaissance abstraite). La désignation d'un concept dans notre modélisation commence par une lettre majuscule. Par exemple, le terme «

Système d'ouvrage d'art » est un concept qui décrit l'ensemble des familles d'ouvrages d'art de génie civil.

2.2.1.2- Individu ou instance de concept

Un **individu ou une instance** (I)**,** est une spécialisation du concept générique qui décrit sa nature intrinsèque en langage naturel (exemple : « Tablier suspendu » et « Câble porteur » sont des individus du concept « Composant » de pont suspendu). L'individu de concept dans notre modélisation servira d'unité de connaissance pour décrire les connaissances factuelles du domaine. La quantification des variables de facteurs de dégradation de matériaux ou d'évolution des états d'ouvrages à travers la modélisation de connaissances va être améliorée dans notre thèse par l'intégration des attributs de concept.

2.2.1.3- Attributs de concepts

Un **attribut** ou une propriété, est un paramètre qui permet de décrire et/ou de caractériser le concept auquel il est relié (ou attaché). Par exemple, le matériau d'une pile de pont réalisé en béton armé de classe C25 est caractérisé par la résistance à la compression. Dans cet exemple, la résistance caractéristique à la compression quantifiée par la valeur « Rc = 25 MPa » est une propriété « attribut » qui décrit le concept « matériau : béton armé ».

La description des concepts (ce qui inclut leurs attributs) est supportée par des relations du domaine.

2.2.2-Notion de relation

Une relation peut être traduite comme un lien (ou liaison) qui permet de décrire les interactions dans l'organisation d'un système (composant, matériau, fonction…) avec son environnement externe [BRE 03]. Dans le cadre d'une modélisation de connaissance d'ouvrages, une relation **R** (de degré d'arité >1) permet de décrire les concepts en interaction. Nous désignerons une relation par une chaîne de caractères commençant par une lettre minuscule. Par exemple, un matériau « béton armé » aPourPropriété « Résistance à la compression ».

Le formalisme des Graphes Conceptuels permet de classifier les relations selon le degré d'arité (nombre d'arguments) : **relation unaire**, **binaire** et (t-naire). Nous utiliserons dans ce travail uniquement les relations unaires, binaires et ternaires qui permettent de décrire l'ensemble des relations de notre domaine.

2.2.2.1- Relation unaire

Une **relation unaire** (R^1) est un lien simple d'arité 1. Cette relation modélise un attribut permettant de renseigner un concept (qualitatif). Par exemple, la relation notée « *n'estPasAssurée* » est une relation unaire qui documente la **perte d'une fonction** prévue.

2.2.2.2- Relation binaire

Une relation binaire est un lien d'arité 2, qui associe (ou décrit) deux concepts en interaction dans une modélisation (voir exemples précédents, §2.2.2). Dans ce travail, trois familles de relations binaires sont utilisées, et nécessitent d'être explicitées : relations de **taxonomie**, de partonomie, et d'influence (ou causale).

2.2.2.3- Relation ternaire

Une relation ternaire est un lien d'arité 3 qui permet de décrire trois concepts interconnectés. Par exemple, un système peut être décrit par son composant et son environnement.

- la relation taxonomique, notée « estUn » ou « sorteDe », est une relation binaire de subsomption qui permet de spécialiser/spécifier un concept (instance) par rapport à un concept générique. Elle permet aussi de relier une sous-classe (sous concept) à sa classe (concept top). Par exemple, il est possible de décrire qu'un (Tablier) estUn (Composant) de pont. Cette relation repose sur l'ordonnancement partiel (hiérarchie) de concepts génériques et permet d'introduire le principe d'héritage de connaissances de même vocabulaire. Autrement dit, une instance (a) décrivant un concept générique (A) hérite de manière logique les attributs de ce dernier. Par exemple, dans la sous famille de ponts à poutres, le nombre de travée est un attribut que chaque type de pont à poutres hérite nécessairement.
- la relation partonomique, notée « *estComposéDe* », « *composantDe* » ou « *aPourComposant* », est une relation binaire de partition, permettant de décrire la décomposition d'un système d'ouvrage sur différents niveaux « composant, matériau, fonction… » (voir définition du terme « système de génie civil », **chap.1.1**). Par exemple, nous décrirons qu'un pont est composé de tablier et d'autres composants…
- les relations d'influence (causale), sont des liens décrivant les changements des états d'ouvrages en corrélation avec des facteurs externes qui interfèrent de manière risqué avec les ouvrages [BRE 03]. Cette catégorie de relation (d'influence) est particulièrement importante pour développer notre procédure d'analyse des défaillances (voir §2.5).Exemple : un environnement défavorable (cause) interagissant avec un ouvrage peut entraîner des altérations de matériaux ou de composant « ou un risque de défaillance » (conséquence). Nous pourrons ainsi sur cette base déterminer des relations permettant de décrire les influences entre les sous-domaines en interaction.

Une fois les connaissances produites (ou acquises), ces unités de connaissances vont nous permettre de construire les **modèles** de simulations et les appliquer sur des cas concrets. Nous illustrerons les éléments discutés précédemment au travers de différentes applications dans ce chapitre (§2.5).

2.3- Modélisation des différents modèles de la thèse

2.3.1-Modèle de connaissances

Berti-Equille L. 2012 [BER 12] définit un **modèle de connaissance** comme une « une représentation abstraite de la réalité ». D'après Perie C.J.1992 [PER 92], les modèles sont des moyens qui permettent aux spécialistes d'organiser, d'utiliser et de communiquer les connaissances sur les produits (systèmes), leur structure, leur état et leur maintenance, etc. Notre vision de la notion de modèle de connaissances d'ouvrages au-delà de la représentation abstraite, est *aussi celle de la manière de structurer la connaissance dans un but principal de connaître l'état des ouvrages pour améliorer l'efficacité des pratiques préventives de maintenance.* Nous présentons dans le paragraphe suivant les différents modèles et base de connaissances factuelles (**Faits**, **Règles**, **Requêtes**) qui vont être développés dans ce travail (thèse).

2.3.2-Modèles proposés dans la thèse

Pour répondre aux différentes questions posées de l'introduction générale à ce chapitre, deux modèles opérationnels de connaissances sont développés dans cette thèse. Ces modèles reposent sur le formalisme des Graphes Conceptuels intégré à la plate-forme logicielle (CoGui). Il s'agit pour les gestionnaires et les experts de génie civil de disposer :

- d'un modèle conceptuel unifié de connaissances des ponts en service (M1) reposant sur le vocabulaire du domaine pour gérer un grand nombre d'informations, de manière à considérer simultanément tous les champs techniques du domaine d'étude. Nous en avons déjà fait état (chapitre1, §1.54) ;
- d'un **modèle générique pour l'analyse de défaillances** des composants de système (M2), permettant de faire des simulations logiques pour comprendre et de décrire par quels processus se développent les défaillances d'ouvrages. Ce modèle de simulation considère les variables de facteurs d'incertitudes aléatoires et permet ainsi de prédire au mieux les évolutions futures des performances afin d'envisager des actions d'anticipation des défaillances les plus redoutées : analyse prédictive des altérations et des modes de défaillances ;
- d'une base conceptuelle de Faits spécifiques (DBF) regroupant l'ensemble des **Faits spécifiques** structurées et implémentées dans la plate-forme logicielle : Fait de vieillissement d'ouvrages, Faits de défaillances antérieures des ponts identifiés (un échantillon de quatre cas est illustré, voir chapitre 4, §4.3). Cette base relationnelle permet de documenter les états des ponts en service afin d'enrichir les pratiques de l'ingénierie forensique et d'aider à la prise de meilleure décisions par le recours à des inférences sur la base implémentée.

De tels outils une fois développés et mise en œuvre (chapitres 3 et 4), permettront de répondre aux objectifs de mon travail de thèse, qui consiste principalement à : **proposer une approche holistique d'analyse de défaillances et les bases d'un support formel d'aide à la décision, qui prend en compte une grande diversité d'incertitudes.**

Il s'agit de fournir, dans une vision de diagnostic systématique des ponts en cours de détérioration, une évaluation des performances d'ouvrages à l'échelle locale de composants qui s'appuie sur des données disponibles et structurées.

L'intérêt des deux modèles (M1, M2) consiste non seulement à la prise en compte des données et des processus de détérioration des ponts, mais aussi en la considération du retour d'expérience pour permettre une adaptation et une évolution de la modélisation Br3KM. Cela se traduit par une modélisation multi disciplinaire et multi-échelle des connaissances du domaine (ontologie, raisonnement), visant la manipulation facile par un humain et une machine (outils disponibles pour la modélisation).

2.3.3-Outils pour la modélisation

Pour décrire de manière logique et sémantique les informations sur l'ingénierie des ponts, nous avons préconisé d'utiliser les **Graphes Conceptuels** comme outil de description [SOW 84]. Cette modélisation à l'aide des Graphes Conceptuels va s'appuyer sur la méthode *Methontology* afin d'affiner les étapes de description de la connaissance [LOP 97]. Le choix de Methontology se justifie en ce qu'elle constitue l'une des méthodologies les plus complètes pour développer une démarche de description basée sur la sémantique d'Ontologie de domaine d'étude [LOP 97, HEL 13, LIU 16] (chap.1, §1.5). L'intérêt des Graphes Conceptuels réside dans la description logique basée sur un formalisme de représentation de connaissances permettant des manipulations graphiques intuitives et ordonnées (structuration, simulation, inférence, projection) [SOW 84, CHE 92, BRE 18, TAI 18, POT 14a].

2.3.3.1- Graphes conceptuels pour la modélisation des connaissances

Un graphe conceptuel (CG) est une « représentation graphique et logique résultant des réseaux sémantiques » introduite par Sowa J.F. 1984 [SOW 84] et formalisée dans [CHE 92]. Le modèle de connaissance qui découle de cette représentation est un modèle conceptuel, constituant le formalisme de structuration de connaissances pour faire des raisonnements. D'après les deux auteurs [SOW 84, CHE 92], les Graphes Conceptuels permettent de résoudre le problème qu'avaient les réseaux sémantiques à représenter les hiérarchies multiples de connaissances. Une illustration de représentation conceptuelle de connaissance sur les ouvrages d'art est montrée au paragraphe suivant (figure 2.4). D'autres applications au paragraphe (§2.5) vont servir d'exemples pratiques de l'utilisation des Graphes Conceptuels dans ce travail de thèse.

2.3.3.2- Formalisme des graphes conceptuels

Le formalisme de connaissances retenu consiste en un modèle conceptuel de représentation formelle des connaissances du domaine à l'aide des Graphes. Il permet de réaliser des manipulations intuitives (raisonnements, simulations…) à l'aide de graphes [SOW 84, LEH 92, CHE 92]. Cette modélisation s'appuie sur le principe d'héritage en ordonnant partiellement chaque ensemble d'unités de connaissances (concepts, relations) sur une

arborescence formalisée. La figure 2.4 illustre un extrait de formalisation logique de connaissance. Cette illustration (niveau 2) est un extrait d'ouvrages d'art exploités dans le contexte national du Congo, où : les ouvrages d'art de type « pont » et « tunnel » sont considérés par rapport à leur grande longueur totale (pont Bas Kouilou « 400ml », pont suspendu Brazza « 360ml », tunnel de Bamba « 4600 ml ») et les barrages par leur grande capacité de production en hydroélectricité (barrage d'Imboulou «120 MW», barrage de Moukoukoulou « 74MW»). L'ordre partiel exprimé par la relation taxonomique (estUn ou sorteDe), est représenté par la flèche induisant une orientation (source vers cible).

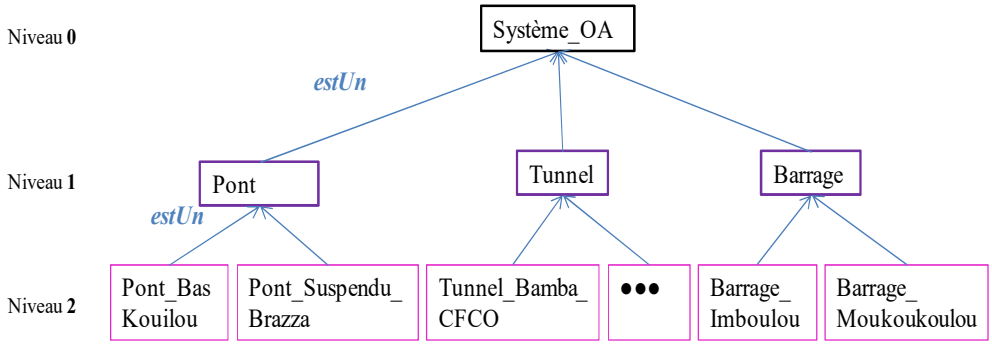


Figure 2.4 : *Extrait de la base de connaissance hiérarchisée*

Le niveau 0 sur la figure 2.4 correspond au niveau générique. Les niveaux 1 et 2 relèvent de la représentation factuelle (spécifique). Les termes « pont », « tunnel », et « barrage » sont des sous-concepts qui héritent des attributs du terme générique « système d'ouvrage d'art ». Suivant ce principe d'ordonnancement partiel de connaissance, dans le deuxième niveau de description, cette modélisation s'interprète : les termes « pont Bas Kouilou » et « pont suspendu Brazza » sont des sous-concepts de concept « pont », et les termes « barrage Imboulou » ainsi que le « barrage Moukoukoulou » sont ceux du concept « barrage ». Le terme « tunnel Bamba » représente un sous-concept du concept « tunnel ». Cette description multi-niveau tire parti de l'approche hiérarchique de la structuration de la connaissance.

2.3.3.3- Logique du premier ordre appliquée aux Graphes Conceptuels

Nous venons d'introduire la logique de description de la théorie des Graphes Conceptuels. D'après [KLE 71, SOW 95], au-delà de la dimension de représentation graphique des connaissances, les Graphes Conceptuels permettent aussi une manipulation de la connaissance du domaine par logique du premier ordre. Une solide introduction à la logique de description du premier ordre peut être trouvée dans [KLE 71, NAP 80, SOW 95]. Deux considérations essentielles relatives à cette logique méritent d'être explicitées dans cette partie. Premièrement, la logique de description du premier ordre consiste à décrire la connaissance d'un domaine en la divisant en deux catégories hiérarchisées sur deux niveaux (voir figure 2.4) : la connaissance structurelle (abstraction) et la connaissance factuelle.

- la connaissance structurelle ou abstraite représente une information (ou donnée) générique qui décrit un domaine, un ouvrage à l'échelle macro (exemple, système d'ouvrage d'art, fig.2.4) ;
- la connaissance factuelle fait référence à un objet concret, un ouvrage physique (ou spécifique) que l'on peut toucher (pont suspendu à Brazzaville, le pont de Pierre à Bordeaux).

Deuxièmement, l'intérêt de la logique du premier ordre des Graphes Conceptuels réside dans la déduction logique des Faits et des formules associées. Ceci nous permet par exemple de décrire l'évolution des états d'ouvrages grâce à des simulations des règles qualitatives basées sur des lois physiques. La figure 2.5 fournit une synthèse illustrant l'application de la logique du premier ordre des Graphes Conceptuels pour traiter les problèmes d'un domaine d'étude.

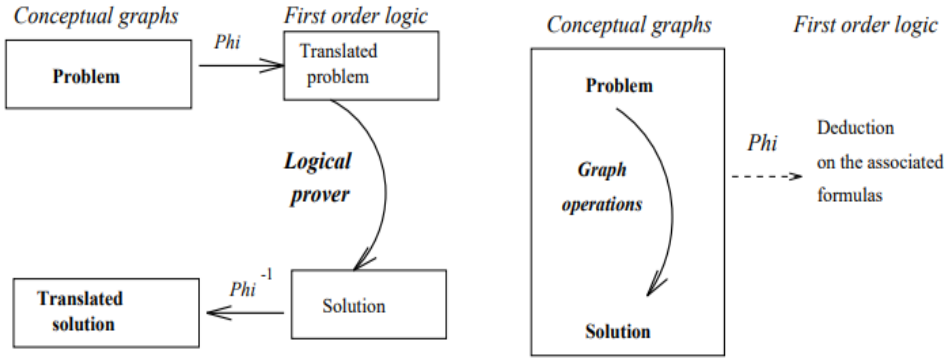


Figure 2.5 : *Mécanisme de raisonnement, graphes conceptuels et logique [CHE 95]*

La figure 2.5 illustre : à gauche, les Graphes Conceptuels comme un graphique de la logique du premier ordre. A droite, les Graphes Conceptuels en tant que modèle graphique doté d'une logique permettant de faire des déductions à travers une hiérarchie de concepts. Les capacités des Graphes Conceptuels que nous venons d'expliciter sont illustrées par des applications au paragraphe 2.5. Nous justifions dans ce qui suit en quoi les Graphes Conceptuels sont nécessaires en génie civil, notamment pour notre modélisation.

2.3.3.4- Nécessité des Graphes Conceptuels en génie civil

La littérature sur les « Réseaux Sémantiques » fait état du manque de logique sémantique clairement définie, ce qui constitue d'après [QUI 68, OLS 95, ZIM 08, CHE 08] une insuffisance pour l'interprétation des connaissances factuelles (voir §2.3.3.1). Aussi, ce formalisme semble permettre qu'une description parcellaire de la représentation de connaissances, limitant ainsi la possibilité de faire des raisonnements plus approfondis (en particulier en génie civil) [KIN 96]. Ces constats ont été signalés dans différents travaux de modélisation des connaissances en génie civil [HEL 13, LIU 16] (chap.1, §1.5). Par rapport à la discussion ci-dessus, et au regard du constat précédent (§2.3.3.3), en nous appuyant sur des travaux disponibles [BRE 18, TAI 18, POT 14a, POT 13], nous estimons que les Graphes

Conceptuels sont adaptés à notre problématique : modélisation multi échelle, analyse des défaillances par simulation, transfert de la connaissance, etc. Les avantages sont multiples, dont trois sont essentiels pour notre modélisation et sont exposés dans la partie suivante.

2.3.3.5- Justification du choix des Graphes Conceptuels

Les trois avantages des Graphes Conceptuels en génie civil identifiés à travers les littératures citées sont les suivants [SOW 84, CHE 92, BRE 18, TA 18, POT 14a] :

- la description formelle et multi échelle des connaissances d'un grand ensemble de connaissances des sous-domaines en interaction. L'utilité de cet axe des Graphes Conceptuels se traduit par leur capacité à générer les caractéristiques fondamentales d'un modèle de connaissances en génie civil, organisant la connaissance (modèle conceptuel) sur deux niveaux conceptuels (l'un structurel et l'autre factuel) : la généralisation, la spécification de connaissance à des niveaux de finesse plus étendu ;
- la capacité de l'interface graphique de la logique du premier ordre des Graphes Conceptuels qui permet de faire des raisonnements en traduisant les graphes par des formules logiques introduites suivant la sémantique complète de la logique commune (CL) du standard ISO /IEC 24707[SOW 84, SOW 95]. Cela est important dans notre approche pour simuler par exemple, les états d'ouvrages et les scénarios physiques de défaillances en s'appuyant sur les lois de performance, de matériaux… [STE 03] ;
- le caractère plus souple et intuitif du formalisme de représentation des connaissances (modèle conceptuel) et la facilité des raisonnements. Ces raisonnements vont s'appuyer sur les éléments de base des Graphes Conceptuels (les Faits, les Règles et les Requêtes) qui enrichissent de façon pertinente les modèles afin de faciliter l'interprétation des situations modélisées. Ceci va permettre de développer une dimension de l'ingénierie forensique en déployant les simulations numériques (graphiques) pour quantifier les enchaînements des situations de défaillances sur les ponts.

Au regard de ces avantages explicités, notre préconisation des Graphes Conceptuels est justifié pour six raisons qui sont :

a. la description multi échelle et multi sous-domaines ;
b. le raisonnement logique intégrant des lois d'ingénierie (raisonnement déterministe, possibiliste…) ;
c. l'interrogation logique et graphique des modèles implémentés permettant de stocker l'historique des observations ;
d. la génération de connaissances (factuelles) une fois des nouvelles défaillances sont constatées, enrichissant ainsi l'expertise des spécialistes et des non spécialistes ;
e. le transfert logique de connaissances, d'une part d'un niveau d'échelle à un autre de modélisation de l'ouvrage, et d'autre part entre une communauté d'experts sans introduire des biais.

Dans les travaux disponibles [TAI 18, BRE 18], les capacités des Graphes Conceptuels ont été justifié à travers les critères (c et d). Le critère (a) est en partie pris en compte sur la figure 2.4 (§2.3.3.3). Les illustrations que nous allons présenter au paragraphe 2.5, montreront davantage les capacités de outil pour couvrir l'ensemble de nos critères de préférence. Pour développer cette modélisation, nous avons sélectionné la plate-forme logicielle (CoGui) qui est conçue dans l'optique de manipulation facile des Graphes Conceptuels pour stocker la connaissance. Le paragraphe suivant met un accent particulier sur CoGui par rapport nos besoins.

2.3.3.6- Plate-forme logicielle CoGui[5]

CoGui « Conceptual Graph editor», est un outil visuel graphique développé depuis 2005 par le LIRMM[6], pour modéliser les connaissances d'un domaine au moyen des Graphes Conceptuels. Cet outil permet de construire les hiérarchies multiples de concepts, des relations, des Faits, des Règles et des Requêtes, et d'effectuer des raisonnements logiques basés sur les graphes [BAG 10, OLI 95]. Les raisonnements (simulation, projection…) dans l'outil CoGui sont facilités par un moteur d'inférence graphique associé au raisonneur « Cogitant, C++ ». D'après la littérature, l'implémentation des connaissances dans CoGui via ce raisonneur permet de développer des applications complètes basées sur la logique de description du premier ordre des Graphes Conceptuels [MUG 09]. Une telle implémentation repose sur l'architecture de base relationnelle de connaissances en trois couches proposée dans [ANS 75]. La figure 2.6 présente l'architecture d'implémentation (conceptuelle) de connaissances dans CoGui, ce qui correspond à quelques fonctionnalités de CoGui utilisées dans notre approche. Pour une revue plus détaillée sur les fonctionnalités de CoGui, nous renvoyons le lecteur vers la page de l'outil qui explicite en détail les algorithmes utilisés (Cogitant)[7].

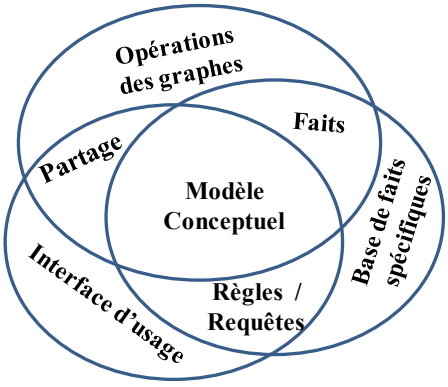


Figure 2.6 : *Extrait des capacités de CoGui 2.0b5 en trois couches*

[5] http://www.lirmm.fr/cogui/
[6] LIRMM, Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (France).
[7] https://cogitant.sourceforge.io/

L'illustration sur la figure 2.6 correspond au schéma d'implémentation des connaissances en trois couches de l'approche ANSI-SPARC [ANS 75]. Elle montre la manière dont les connaissances sont stockées dans CoGui pour faciliter les raisonnements. Le graphe au centre de cette figure 2.6 décrit le modèle conceptuel qui utilise le vocabulaire du domaine (glossaire) pour développer les modèles de simulation. Les éléments tels que Faits, Règles, Base de faits spécifiques, Opérations des graphes (conceptuels), complètent l'opérationnalité des modèles d'applications en communiquant l'information entre les différents modèles pour enrichir la connaissance factuelle (Faits spécifiques).

CoGui permet de satisfaire nos besoins de modélisation de connaissances basée sur les Graphes Conceptuels (§2.3.3.5). Par rapport au contexte d'utilisation (pays en développement) et à la problématique posée par le transfert d'expertise, CoGui présente trois avantages particuliers.

- le premier avantage est la construction des modèles conceptuels avec des manipulations graphiques plus souples qui facilitent les raisonnements et le partage d'informations entre ces modèles de Faits en interaction.
- le deuxième avantage est la possibilité de stockées et de réutiliser des graphes de Faits spécifiques sous forme de base relationnelle pour faire le suivi des ouvrages en service (actualisation de l'historique d'exploitation à partir des mesures d'observations in situ…).
- Et le troisième réside dans le positionnement de CoGui : un logiciel libre et gratuit développé par une équipe de recherche assurant la maintenance et l'évolution de la plate-forme logicielle CoGui. Cela permet une diffusion et une utilisation simplifié de CoGui et des modèles que nous développons dans ce travail.

D'après les premiers résultats disponibles dans [TAI 18, BRE 18], et par rapport aux constats de la problématique de la thèse, CoGui permet d'atteindre un de nos objectifs capitaux qui est celui de construire des modèles conceptuels permettant de passer de l'observation in situ à l'interprétation par des simulations numériques. Cet axe une fois développé avec les Graphes Conceptuels dans CoGui permettra d'améliorer l'efficacité des dispositifs en place de diagnostic et de suivi des ponts en milieu tropical. Comme nous l'avons fait remarquer au chapitre 1.5, les modèles de connaissances des ponts disponibles avec l'outil (Protégé) n'offrent pas l'ensemble des bénéfices offerts par les Graphes Conceptuels [HEL13, LIU 16, WAN 09a, TIB 17].

Dans [KHA 13, FOR 13], les auteurs estiment qu'une des raisons de limitation de raisonnements pour des applications avancées sur la plate-forme Protégé réside dans l'insuffisance de la capacité des raisonneurs intégrés (pellet, FACT ++…). Ces auteurs ont indiqué par exemple que, le principe d'héritage d'attribut entre concept générique (classe) et ses instances pourtant supporté par l'outil (Protégé), n'est pas totalement pris en compte par ses raisonneurs associés (pellet, FACT ++…) [KHA 13, FOR 13].

Face aux lacunes de Protégé qui ne permet pas d'adapter les modèles disponibles dans [HEL 13, LIU 16, TIB 17, WAN 09a] à notre contexte, nous préconisons l'utilisation CoGui. Une dimension significative de cet outil est celle du calcul des variables de relations (particulières) entre concepts ainsi que de leurs propriétés pour décrire les Faits spécifiques à partir d'une modélisation générique (cf. §2.5). Sur la base de ces choix justifiant l'utilité de CoGui dans notre application, nous pouvons maintenant présenter les étapes de description des connaissances pour développer notre vision d'analyse holistique des défaillances.

2.4- Etapes nécessaires de la modélisation

Le processus de description des connaissances proposé consiste en un enchaînement d'étapes qui commencent par la spécification du domaine d'étude jusqu'à l'application du modèle implémenté. Cette description comprend six étapes (figure 2.7).

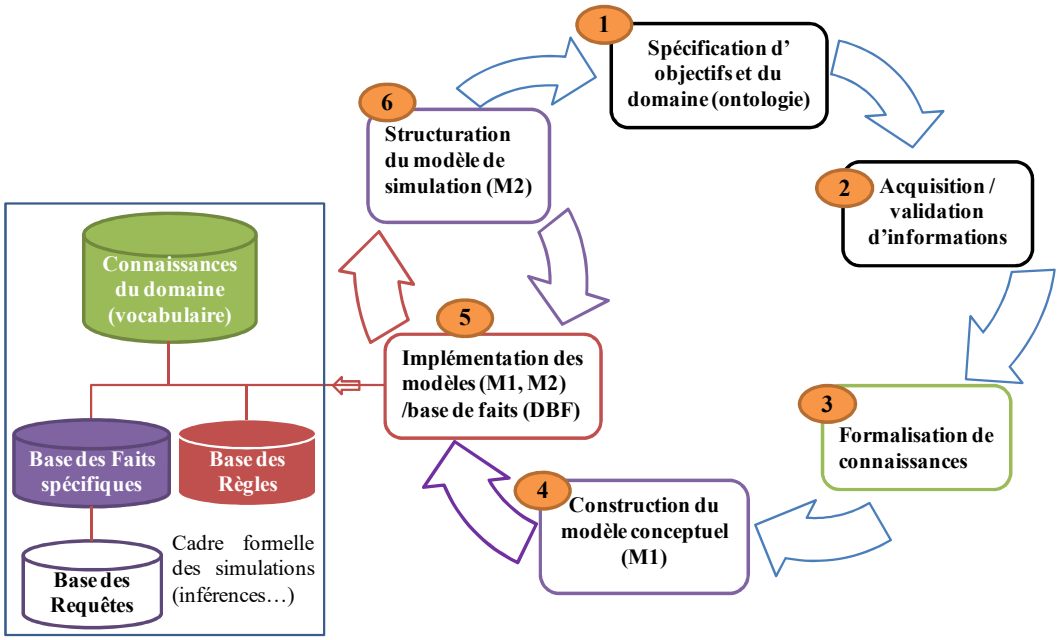


Figure 2.7 : *Etapes de modélisation holistique (connaissances, modèles)*

2.4.1-L'étape 1 : spécifier les objectifs du modèle et le domaine

La première étape consiste à spécifier l'objectif du modèle conceptuel (M1), le domaine d'étude et les champs d'application qu'il recouvre, tels que les sciences des matériaux, l'analyse des défaillances, l'ingénierie forensique, l'évaluation de sûreté, l'analyse de risques d'ouvrages, etc. La spécification de l'objectif du modèle va consister en des questions de compétence auxquelles la modélisation doit répondre. Il s'agit de recenser les questions que nous nous sommes posées tout au long de ce travail (par exemple, *comment peut-on transférer de manière logique l'information d'un enchaînement de défaillance de pont à travers ses différents niveaux de description* ?).

2.4.2-L'étape 2 : Acquérir et valider les informations du domaine

La seconde étape consiste à l'acquisition et la validation d'informations sur les ponts existants et leur composition (composant, fonction, matériau), leur environnement, leurs mécanismes de défaillances, etc. Cette étape ne peut s'étendre que grâce à la spécification des moyens de collecte et de traitement de l'information au regard de l'objectif défini (étape 1). Elle est indispensable dans toute démarche de construction de modèles dans la mesure où elle permet de disposer de la connaissance nécessaire. La collecte des données sur les ouvrages s'appuiera sur l'identification, l'analyse et l'examen pour disposer des informations recherchées. Cette collection (information) va être suivie d'une transcription en langage naturelle du domaine (vocabulaire) des termes pertinents. Ce vocabulaire va s'appuyer sur les dictionnaires en ligne (CNRTL[8], des lexiques du génie civil d'organismes publics[9]), sur la littérature scientifique et sur l'expertise.

2.4.3-L'étape 3 : Formaliser les connaissances utiles

La troisième étape consiste à formaliser les informations sélectionnées pouvant enrichir le modèle de connaissances du domaine d'étude. Il s'agit de donner à la connaissance le format manipulable, c'est-à-dire compréhensible par un humain et une machine (plate-forme informatique). Ceci constitue un préalable pour enrichir le modèle de connaissances permettant au mieux de connaître le domaine étudié. Cette formalisation repose sur le formalisme des Graphes Conceptuels et la sémantique du vocabulaire (ontologie) afin de construire un modèle pertinent. Un exemple de formalisation de connaissance d'un patrimoine d'ouvrages d'art est illustré sur la figure 2.4 (§2.3.3.3). Cette étape sera développée progressivement et de façon alternée avec celle de la collecte des informations (étape 2).

2.4.4-L'étape 4 : Construire le modèle conceptuel

La quatrième étape consiste à organiser les connaissances formalisées (étape 3) de manière à construire une structure homogène et unifiée des connaissances utiles à des applications à développer. Il s'agira dans cette phase de description, de représenter, de fusionner les concepts (instances, attributs) et leurs relations correspondantes suivant la structure du formalisme des Graphes Conceptuels. Cette étape pourra générer des itérations et amener à revoir le vocabulaire de certains concepts retenus. Un des avantages de CoGui dans cette étape, sera d'intégrer et d'organiser de façon automatique chaque hiérarchie de concepts implémentés.

2.4.5-L'étape 5 : Implémenter le modèle conceptuel et applications

La cinquième étape consiste à implémenter le modèle (M1) formalisé des connaissances du domaine d'étude. Cette étape qui est au cœur de la manipulation des connaissances

[8] http://www.cnrtl.fr
[9] https://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne

préalablement formalisées, traduit les modèles en des formats opérationnels (ou exploitable). Elle va mettre en exergue la description multi échelle et multi sous-domaine défendu dans cette approche. Cette étape est réalisée de façon interactive entre les étapes 4 et 6, puisque l'implémentation pensée ici consiste aussi à intégrer les lois physiques (par exemple la loi d'altération des matériaux, la loi d'évolution de performance…). Des illustrations d'implémentation de connaissances dans la plate-forme CoGui vont être présentées dans ce chapitre (§2.5). Une des capacités particulières de CoGui dans ce cas, sera de pouvoir contrôler l'homogénéité des connaissances implémentées (vérification de la cohérence, restriction des hiérarchies, manipulation des modèles…).

2.4.6-L'étape 6 : Exploiter/valider le modèle conceptuel (structurer le modèle de simulation)

La sixième étape consiste à structurer les connaissances (contenues dans le modèle conceptuel unifié de connaissances du domaine), pour développer les modèles d'application (modèles de simulation «M2»). Au regard des résultats de l'étape 3 et 4 (définition du support unifié de connaissances du domaine), on est ici dans une phase d'utilisation du modèle implémenté. Cette phase postérieure à la modélisation proprement dite, pose généralement une difficulté d'exploitation, puisque les besoins des utilisateurs peuvent être mal exprimés. Pour nous, ces besoins qui sont ceux des gestionnaires de parcs de ponts confrontés à l'ampleur des champs d'application, ont été préalablement identifiés (voir paragraphes introductif, fig.2.1).

C'est à travers cette étape que nous réaliserons l'analyse des défaillances sur les ponts ayant connu des détériorations ou de situations de défaillances afin de proposer des mesures correspondantes pour l'anticipation. La modélisation à ce propos consiste en la structuration du modèle de simulation (M2) dont la finalité des applications est de construire une base relationnelle de Faits des défaillances (voir §2.2). La structuration de ce modèle (M2) intègre le caractère générique de la description logique, ce qui va permettre de tester différents types de Faits spécifiques sur les ponts (voir chapitre 4, partie 2). L'intérêt des simulations à travers le modèle (M2) sera illustré par la mise en place d'un cadre d'aide au diagnostic des états de ponts en service, ce qui permet de poser les bases d'un outil générique d'aide à la décision. Afin de montrer l'efficacité de cette approche de modélisation, le paragraphe qui suit va servir de base de développement illustratif de notre vision d'analyse holistique des défaillances sur les ponts.

2.5- Capacités des graphes conceptuels pour l'analyse des défaillances

Nous avons vu que l'évaluation de sûreté des composants d'un ouvrage de génie civil vise à vérifier dans quelles conditions de fonctionnement ces composants doivent satisfaire aux exigences de performance (chapitre 1, §1.4.1). Pour savoir qu'un composant d'ouvrage est en sûreté ou en situation de défaillance, un modèle de simulation de connaissances doit considérer la variabilité et la diversité des facteurs d'incertitudes aléatoires associés aux

ouvrages. Nous rappelons que ces incertitudes (cf. §2.1), traitent de la connaissance de matériaux et des ressources, des charges d'exploitation, des limites de la modélisation physique, mécanique, du comportement des parties prenantes. Elles sont liées à l'environnement (physique, etc.) et à tous les autres facteurs pouvant avoir un impact sur la structure ou le composant d'ouvrage (normes et standards, contexte économique…) [BRE 03].

Dans certains contextes d'exploitation des ouvrages, les variables de certaines familles d'incertitudes (aléatoires) risquent de conduire à des défaillances (précoces) des ouvrages jusqu'à engendrer des conséquences potentiellement fatales sur les composants et sur l'ouvrage global [BRE12, FRA07]. Les décisions à prendre lorsqu'elles se produisent nécessitent en partie, de savoir comment ces incertitudes se propagent jusqu'à avoir des conséquences (situations de défaillances) afin d'engager des actions correspondantes de maintenance (soit pour atténuer, soit pour anticiper ou réparer…). Dans cette optique de décision, notre approche d'analyse de défaillance consiste à décrire un système d'ouvrages en procédant comme dans un contexte d'analyse de risque afin d'examiner ses sources de détériorations (fig.2.8).

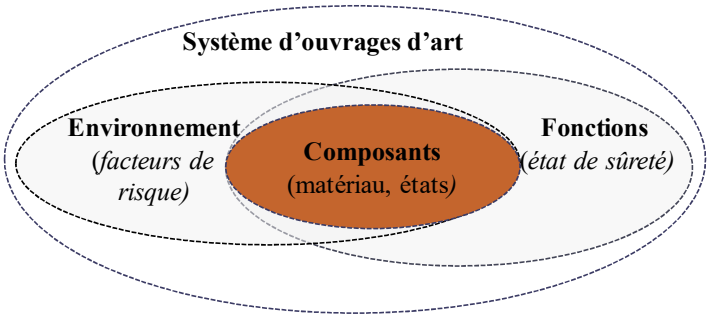


Figure 2.8 : *Système de génie civil en contexte de l'analyse des défaillances*

La figure 2.8 matérialise les limites (spatiales, temporelles) décrivant un ouvrage en contexte d'analyse de défaillance (par exemple un pont). Cette schématisation (fig.2.8) permet de déterminer les échelles de modélisation de système d'ouvrages afin de décrire ses états. Les trois termes, environnement, états de composant/ouvrage, état de sûreté) représentent des données variables qui peuvent évoluer au cours du temps [BAR 11, CAI 11]. Cette évolution est dépendante des conditions d'exploitation, dans la mesure où le système ou ses composants doivent être entretenus pour demeurer en état de satisfaire les fonctions prévues.

Les causes (environnement) entrainent des effets possibles (état), qui conduisent à terme aux conséquences (évolution des performances) [BAR11, SAY13, DAN 08]. Les causes représentent l'ensemble des concepts avec leurs attributs, qui décrivent les facteurs de risque en interaction (exemple : processus d'affouillement, crue excessive, corrosion et agressivité de l'air…). Les effets sont tous les concepts liés à l'altération progressive des propriétés de matériau (i.e. fissuration, éclatement de béton…) ou de détérioration des propriétés d'un composant (ondulation de l'uni de chaussée…). Les conséquences résultant des états

inacceptables d'un composant ou d'un ouvrage représentent des situations de défaillances « FS ». L'idée de base est de traduire de manière logique, l'hypothèse suivante :

Hypothèse (hyp.1)

Si les conditions du milieu d'exploitation sont défavorables,
Et si la qualité des matériaux de système/composant n'est pas celle requise,
Alors l'ouvrage ou le composant risque une situation de défaillance.

Modéliser ce raisonnement (hyp.1) de manière experte et logique, est possible avec les modèles de connaissances basés sur les Graphes Conceptuels [SOW 84, BRE 18]. Cette dimension d'analyse des défaillances par la modélisation des ouvrages implique une logique de description à la fois holistique et technique pour appréhender de manière simple et pertinente les situations sur les ponts en service [BJO 15, CHA 14]. Ceci va être possible par la description des connaissances en combinant multi champs d'application (voir chap.1§1.5.4, et chap.3§3.1.2), à différents niveaux d'échelles (modèles de sous-domaines) pour décrire et interpréter les **Faits**. L'interprétation des Faits modélisés suivant cette dimension d'analyse, va consister en des raisonnements basés sur la logique du premier ordre des Graphes Conceptuels (§2.3.3.3), afin de mieux faire comprendre l'occurrence des défaillances (simulation, inférences des règles, projection…). Le paragraphe qui suit, expose comment structurer les graphes de Faits génériques pour construire les modèles de simulation en s'appuyant sur les connaissances du modèle conceptuel (M1) qui va être implémenté au chapitre 3. Les principaux éléments et opérations de base permettant la manipulation et l'exploitation des modèles de simulation vont être explicités progressivement tout au long du paragraphe (§2.5) : **Faits, Règles expertes, Inférences des règles, Projection**.

2.5.1-Conceptualisation de graphes de faits pour l'analyse des états d'ouvrages

Un **Fait** dans notre approche décrit une réalité physique, d'un ouvrage existant, d'un composant tel qu'il a été conçu et réalisé, ou d'une situation particulière (défaillance) qui s'est produite. Nous considérons deux types de Faits :

- Fait initial décrivant un ouvrage ou un domaine de manière générique ou générale, exemple : le patrimoine d'ouvrages d'art du Congo est constitué des ponts, des tunnels et des barrages (voir fi.2.4). Le pont de Pierre (Bordeaux) est un pont à voûte en maçonnerie franchissant la Garonne (rivière) sur une longueur totale de 487m avec un tablier comportant 17 arches.
- Fait spécifique décrivant une situation particulière, par exemple, l'échappement de tablier du pont Mouyondzi (chapitre1, §1.2).

La structuration de ces deux types de Faits consiste à rassembler un ensemble de concepts et des relations formalisées sur différentes échelles à l'aide des graphes pour développer des modèles de raisonnements tels que : le modèle de simulation du vieillissement d'ouvrages ou le modèle d'identification des actifs d'un patrimoine…

Dans cette partie nous présentons un modèle générique de simulation du vieillissement d'ouvrage renseigné par trois concepts : « Environnement », « Agressivité_Envt » (= agressivité de l'environnement) et « Système_OA » (= système d'ouvrage d'art). Ces trois concepts sont structurées à l'aide de deux relations binaires d'influence (Ra = affecte ; Rb = aUneAgressivité) pour former un modèle de simulation du vieillissement. La figure 2.9 est une représentation graphique de ce modèle de simulation sous forme de graphe de Fait initial implémenté dans l'outil «CoGui 2.0b5». Les labels (1 et 2) de chaque arc des relations Ra et Rb, correspondent à la position de l'argument de la relation binaire. Par exemple, Environnement-1-affecte-2-Systeme_OA se lit : « l'environnement affecte le système d'ouvrage d'art ». L'étiquette (*) sur chaque concept labélisé (fig.2.9) est un marqueur qui indique le caractère générique de ce concept pour montrer qu'il existe un individu non spécifié à intégrer [SOW 84, SOW 95]. Par exemple, l'individu du concept « Environnement » va être (= air) ou (= trafic) suivant la spécificité de la situation analysée.

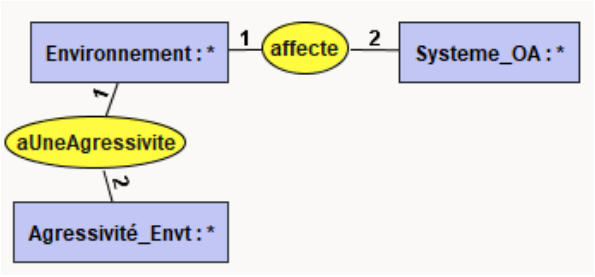


Figure 2.9 : *Graphe de fait initial, l'environnement agressif affecte le système d'ouvrage*

Le graphe modélisé (fig.2.9) signifie, un environnement agressif affecte le système d'ouvrages d'art, notamment lorsque la qualité de cet ouvrage n'est pas celle requise (voir hypothèse 1, §2.5). Cette modélisation va être développée sur des échelles d'études plus détaillées dans les chapitres 3 et 4. Par rapport à notre problématique (analyse holistique des défaillances), nous envisageons de développer des applications en procédant par la décomposition du système global en sous-structures. Ceci va être mis en œuvre suivant trois échelles d'analyse : échelle géométrique, échelle fonctionnelle et échelle phénoménologique. Nous renvoyons le lecteur vers [TAL 06, BAR 11, CUR 08], pour une description complète de la notion d'échelles d'études.

- échelle fonctionnelle : notre modélisation va s'intéresser à la description des fonctions des systèmes, ceci dans le but d'analyser des fonctions particulières de manière isolées.
- échelle géométrique : notre approche pour l'analyse des défaillances de système d'ouvrage portera sur des composants modélisés de manière isolée. Ceci pour faciliter la remontée de l'information au niveau du système global [YE 94, CUR 08].
- échelle des phénomènes : pour décrire les scénarios (= enchaînements possibles des facteurs défavorables à la sûreté du système), il va être question dans notre description

d'intégrer l'interaction entre le système et ses facteurs externes (environnement, aléas extrêmes) à chaque niveau de sa décomposition.

Comme nous l'avons indiqué au paragraphe précédent (§2.3.3.3., fig.2.5), les raisonnements sur le modèle (fig.2.9) nécessitent des règles structurées pour faire des simulations numériques. Dans les paragraphes suivants (§2.5.2 et 2.5.3), nous présentons de quelle manière ces règles sont structurées et appliquées.

2.5.2-Cadre des règles expertes pour expliquer les Faits

Une règle experte est considérée ici, comme un moyen formel structurant de manière explicite et conceptuelle, un raisonnement d'experts sous la forme « si (hypothèse), alors (conclusion) » [KAR 07, BOI 14, BOI 99, AZI 03, TAL 06], où :

- l'hypothèse consiste en une liste de conditions pouvant contenir différentes données (numérique, booléen…) ;
- la conclusion consiste en une réponse du raisonnement sur l'hypothèse. Le raisonnement peut conduire à une conclusion formée par des réponses combinées ou non, tels que « si l'hypothèse (B), alors conclusion (C et/ou D) » [BOI 14, BRE 18].

Suivant le niveau de l'échelle de description des connaissances, deux types de règles expertes vont être formalisées : les règles génériques (applicables pour toute hypothèse générale, voir l'exemple de la règle du vieillissement R1#) et les règles spécifiques (pour des simulations des variables spécifiques, telles que celle prédisant l'agressivité d'un processus de corrosion d'acier, de l'érosion interne dans un massif d'appui de pont…). Les règles génériques reposent sur les aspects de similarité, symétrie…), facilitant les tâches de description multi échelle et multi sous-domaine [SOW 95] (cf. chap.3 et 4).

2.5.2.1- Règles expertes pour qualifier l'état d'un ouvrage

Dans le formalisme des graphes conceptuels, l'hypothèse et la conclusion d'une règle constituent deux graphes conceptuels qui partagent des nœuds communs [TAI 18]. L'utilisation de règles expertes formalisée de cette manière, consiste à formaliser le graphe de conclusion lorsque le graphe d'hypothèse existe. En d'autres termes, la propagation logique de règles consiste à générer des nouveaux graphes de Faits à partir des inférences par les algorithmes intégrés à l'outil [KLE 71, SOW 95]. Nous illustrons cette discussion par la règle experte (R1#) qui permet de simuler les effets du vieillissement d'ouvrages à partir du graphe de Fait initial présenté en fig.2.9. Cette règle experte (R1#) s'écrit de la manière ci-après :

Règle experte (R1)

Si les conditions du milieu d'exploitation sont défavorables,
Et si la qualité des matériaux de système/composant n'est pas celle requise,
Alors risque de défaillances.

La règle experte (R1) explicite l'hypothèse générale de perte de sûreté d'un ouvrage et signifie qu'un ouvrage tend vers une défaillance et/ou se trouve en situation de défaillance « FS » lorsque que l'action d'un environnement de forte agressivité (sollicitations excessives « S ») dépasse sa résistance (R). Cette hypothèse formalisée par **S > R →FS** (si S > R alors défaillance) est présentée au chapitre 1(§1.4.1.2). Les applications de la règle R1# sont illustrées sur les paragraphes §2.5.2.2 et §2.5.2.3.

2.5.2.2- Simulation de règles expertes pour l'analyse prédictive des états d'ouvrages

La vision déterministe d'analyse de défaillances suivant le formalisme AMDE (chap.1.4) permet d'écrire la règle, **si** cause (**B**), **alors** conséquence (**C**). Sur cette base, nous pouvons décliner la règle générale (R1#) explicitée (§2.5.2.1) en deux règles expertes pour déduire l'enchaînement ayant conduit au risque de défaillance : la règle (Ra#) traduit l'hypothèse selon laquelle l'interaction d'un système (par exemple un pont en acier) avec un environnement agressif (par exemple l'agressivité de l'air) entraîne un état d'altération du système (par exemple la diminution de l'épaisseur de l'acier suite à la corrosion).

La règle (Rb#) interprète l'hypothèse qu'un système en cours de détérioration continuant d'interagir avec cet environnement agressif risque la défaillance. Ces deux règles (Ra#, Rb#) une fois implémentée (fig.2.10 a, b) et propagées sur le graphe-fait initial (fig.2.10c), vont compléter ce dernier avec des nouveaux graphes résultant du raisonnement automatisé (fig.2.10d).

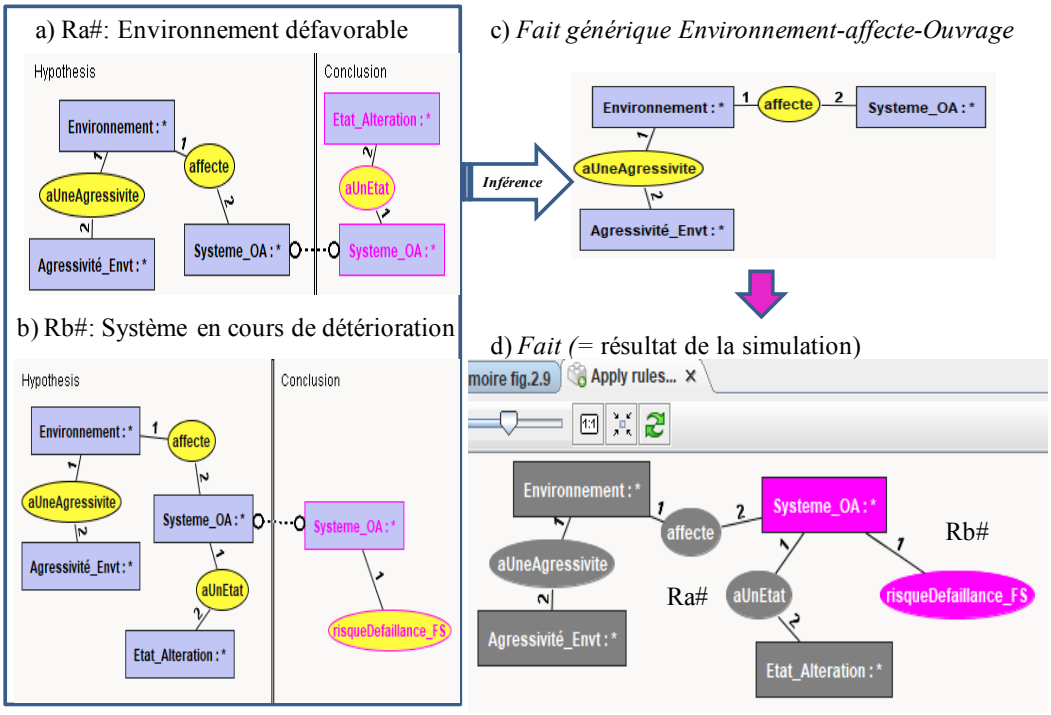


Figure 2.10 : *Simulation, (a,b) des règles, (c ,d) fait initial et fait simulé*

Les graphes sur la fig.2.10 (a, b) montrent de quelle manière une règle experte est structurée et implémentée dans l'outil CoGui. Les graphes sur le côté gauche de chaque règle fig.2.10 (a, b) représentent la partie hypothèse et ceux sur le côté droit donnent la conclusion de la règle. La particularité de ces deux règles Ra# et Rb# est le fait que : la conclusion de la règle Ra# est un graphe de concept générique qui permet de spécifier l'état d'altération correspondante. Tandis que celle de la règle Rb# est un graphe de relation unaire qualifiant l'ouvrage de système défaillant. La figure 2.10(c) illustre le graphe de Fait initial sur lequel les règles Ra# et Rb# sont propagées. La figure 2.10(d) est un graphe de Fait global enrichi du vieillissement de système d'ouvrage. Ce graphe de Fait global consiste en un chaînage complet de l'inférence simultanée des règles Ra# et Rb#. Il s'agit dans ce cas d'une unification du graphe de Fait initial (fig.2.10c) et de trois nouveaux graphes générés [MUG 09] : état d'altération (= Concept générique), a un état (= relation binaire), et risque de défaillance (= attribut de concept).

Les graphes (gris, fig.2.10d) sont ceux sur lesquels le chaînage de la simulation de la connaissance (inférence de la règle Ra#) a été exécutée en premier avant d'être terminé sur le dernier nouveau graphe de Fait global (violet). L'arrêt de ce mécanisme de simulation des connaissances montre que la réponse à la question posée est trouvée (fin du chaînage des graphes). L'inférence des règles (Ra# et Rb#) montre un changement qualitatif d'état d'ouvrage suite à la manifestation d'un environnement agressif. Pour quantifier ces variables (agressivité de l'environnement et l'état d'altération), des simulations quantitatives sont nécessaires. Cela relève de l'analyse quantitative et prédictive dans le cadre du suivi et évaluation (monitoring) des ouvrages. Nous illustrons cette dimension de l'inspection au paragraphe suivant.

2.5.2.3- Règles expertes pour quantifier les états d'un ouvrage

Ce paragraphe montre comment quantifier, l'évolution des états d'un système au cours du temps en remontant l'information (note de l'état) à chaque période d'inspection. Ceci a pour objectif de stocker l'historique de l'inspection sous forme de connaissances formalisées. La modélisation des états de systèmes sur cet axe d'application consiste à la simulation des Faits via une règle experte (par exemple la règle Rc#) qui décrit l'évolution du vieillissement naturel à travers la loi physique de l'équation 6 (chapitre 1, §1.4.1.2).

L'objectif est de simuler les états de système d'ouvrage de manière à établir une corrélation entre la note obtenue par cette simulation et les échelles de conditions d'états d'ouvrages définies dans « IOQA, KUBA-DB…» (chapitre1, §1.3). Cette modélisation nécessite une structuration puis des inférences des règles expertes décrites suivant **deux logiques** [CHE 09, RAI 08, ALO 05, RIV 98] :

- une logique de formalisation où les graphes de concepts et de relations structurant la règle sont modélisées et implémentées de façon conceptuelle (ou statique « voir fig.2.10 a ») ;

- une logique d'implémentation codée, transcrivant les lois du raisonnement (règles arithmétiques, conditions, simulation du hasard...) sous une forme explicite (scripts informatique). Cela permet de faire des calculs sur les graphes des règles formalisées à travers des corrélations logiques des paramètres (variables de facteurs aléatoires, notes d'état de composant…).

La simulation des variables d'état d'ouvrages dans ce paragraphe consiste à la modélisation de l'évolution du vieillissement naturel à l'échelle d'un ouvrage global interagissant avec un environnement défavorable. Cette simulation repose sur la règle Rc# qui considère le graphe de Fait global (fig.2.10d) comme une hypothèse structurée et dont la conclusion consiste en valeurs calculées sur ces graphes.

La règle Rc# formalise le passage de l'état «A» du système au temps (t) à l'état au temps (t+ Δt) sous l'effet de l'agressivité de l'environnement. La loi physique du vieillissement (éq.6) intégrée à travers cette règle Rc# s'écrit :

(6) : $A(t) = A(t_i) + \alpha^*(t_i+\Delta t)$,

Où, t représente le concept « Temps », ti « valeur initiale du temps t, avec i = 0, 1, 2…», Δt est le « pas de temps » attaché au temps t, et α représente la « variable d'agressivité de l'environnement ». La variable (α) permet également de quantifier la cinétique du vieillissement.

Règle générique (Rc#) : description de l'évolution du vieillissement de système

Si A(ti)= état d'altération de système OA à l'intervalle de temps t= t_i,
Et si Δt = pas de temps t d'observation,
Et si α = agressivité variable d'environnement au cours du temps t,
Et si cet environnement interagit avec le système OA,
Alors après un temps delta t, cet état devient A(t)= $A(t_i) + \alpha^*(t_i+\Delta t)$.

Pour simuler différentes cinétiques du vieillissement (lente, très lente, modérée, rapide, très rapide), nous avons considéré deux pas de temps : Δt = 1 an dans le cas où l'observation de l'ouvrage est effectuée une fois par an et Δt = 3 ans dans le cas où elle intervient une fois tous les trois ans. A(t) est défini sur une échelle d'intervalle [0, 5] formalisée à partir des outils (IQOA, KUBA-DB, §1.3), où la valeur 0 décrit le bon état et 5 l'état critique (c'est-à-dire altéré ou ruiné). L'agressivité de l'environnement est simulée sur trois niveaux de sévérité par les valeurs ci-après : α = 0.5 agressivité faible, α = 1.5 agressivité moyenne, et α =2 forte agressivité.

La figure 2.11 illustre la regèle structurée (fig.2.11a, b) pour simuler le Fait générique du vieillissement (fig.2.12).

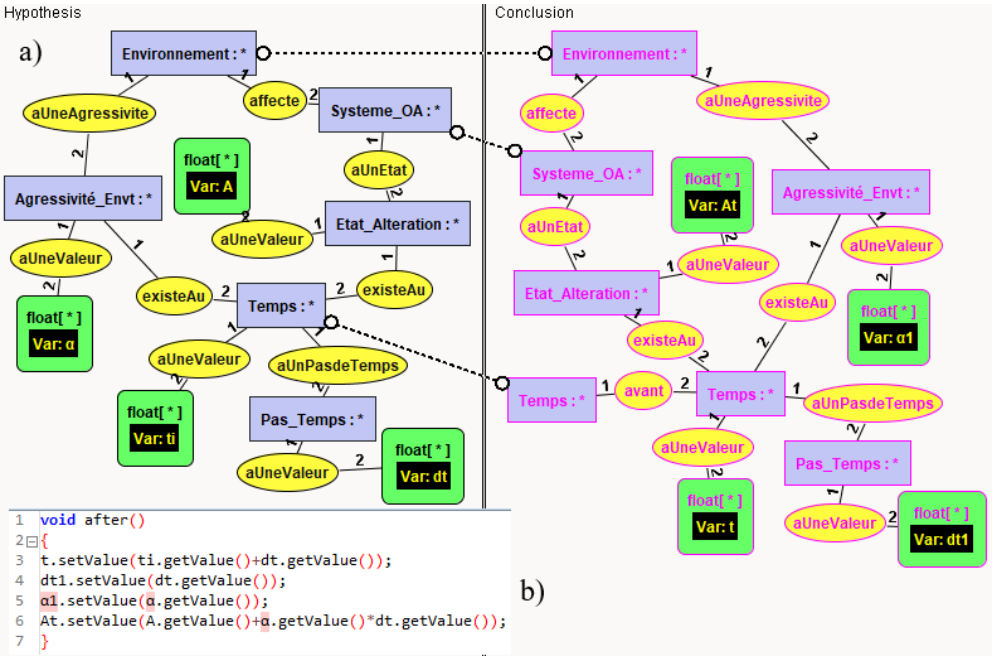


Figure 2.11 : *Règle experte du vieillissement d'ouvrage, (a) graphe de la règle, (b) formule de modélisation physique de la règle*

La figure 2.11 b montre un extrait de modélisation de la loi du vieillissement (6) à travers la logique du premier ordre des Graphes Conceptuels sur la plate-forme CoGui (2.0b5). La variable de type *float* sur cette figure 2.11 permet de renseigner des valeurs numériques (par exemple les données de mesures d'observations).

La relation de temporalité « avant » intégrée dans cette règle permet de renseigner l'état d'altération du système sur deux pas de temps au travers de l'équation (6). Il s'agit d'un aspect significatif pour l'observation de l'évolution des états des ouvrages sur un patrimoine. La figure 2.12 présente le graphe de Fait initial du vieillissement du système global : $\alpha = 0.5$, ti= 0, $\Delta t = 1$ e A (ti) =0.

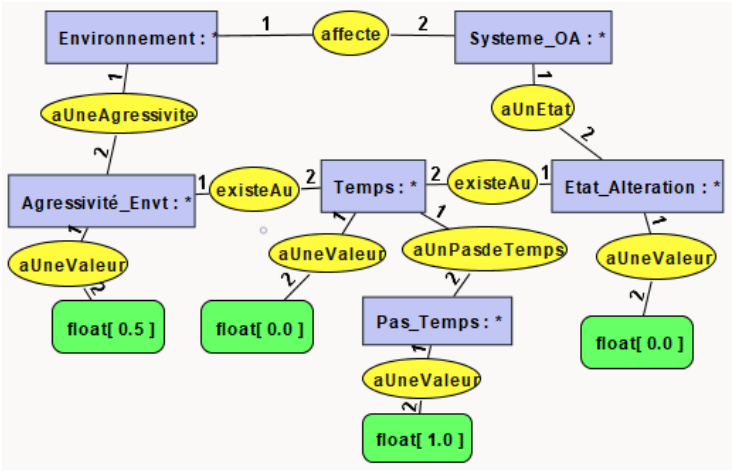


Figure 2.12 : *Graphe de Fait initial du vieillissement d'ouvrage*

L'inférence de la règle Rc# (fig.2.11) sur le Fait initial structuré (fig.2.12) consiste à générer les valeurs de l'état *A(t)* au cours du temps sur l'intervalle de Δt en calculant la variable aléatoire (α). Nous avons réalisé 54 simulations pour les deux pas de temps retenus, soit 27 simulations par pas de temps (Δt = 1 ; Δt = 3) et 3 itérations pour chaque échelle d la variable (α). Nous illustrons sur la figure 2.13 les résultats de simulation d'une itération pour α = 0.5 sur le pas de temps (Δt = 1). Nous présentons ensuite les résultats de toutes les simulations au tableau 2.1 et à la figure 2.14. Pour des soucis de lisibilité, seules les simulations graphique pour Δt = 1 an, sont présentées en annexe 1 (annexe1a : simulations pour α = 0.5, annexe 1b :α = 1.5 et annexe 1b :α = 2).

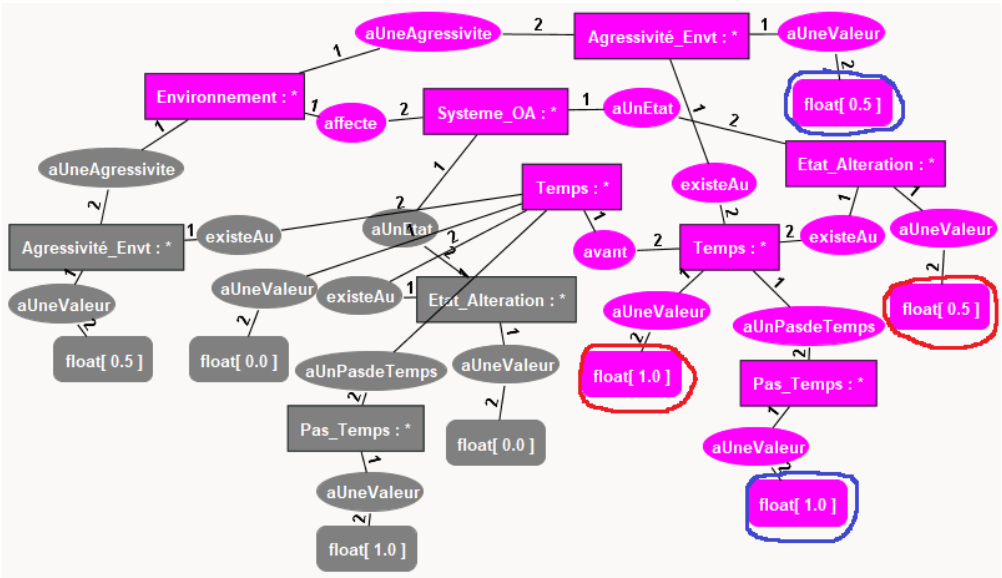
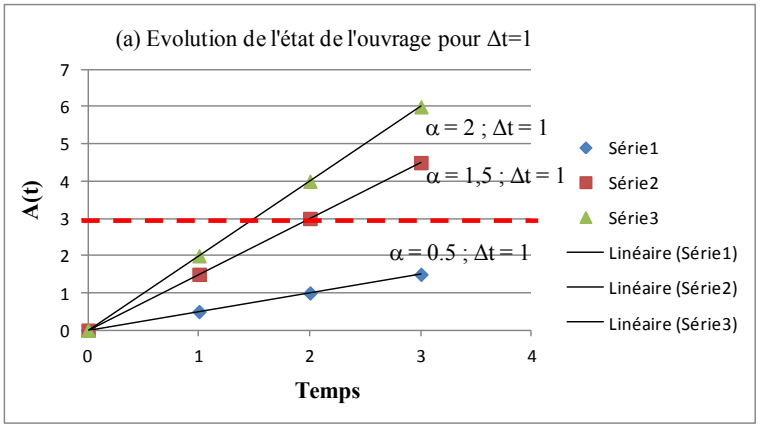


Figure 2.13 : *Evolution de l'état d'altération du temps ti= 0, α = 0.5, Δt=1 et t= 1*

Les valeurs sélectionnées (nœud en rouge) sont des variables déduites par la simulation de la règle Rc#, et celles du nœud bleu sont des données d'entrée. Ceci explique l'influence de la manifestation d'un environnement défavorable sur un système au cours du temps. Cette modélisation étant générique peut être exploitée pour expliquer un Fait de vieillissement naturel de tout ouvrage à des échelles de descriptions au choix. Ce graphique constitue une illustration de l'efficacité des Graphes Conceptuels dans la simulation et la description logique des Faits.

La figure 2.14 illustre les distributions linéaires des variables d'environnement au cours du temps. La figure 2.14 (a) consiste en des résultats des simulations pour les scenarios, (Δt=1, α = 0.5 ; 1.5 et 2). La figure 2.14 (b) consiste en des résultats des simulations pour les scenarios (Δt=2, α = 0.5 ; 1.5 et 2).



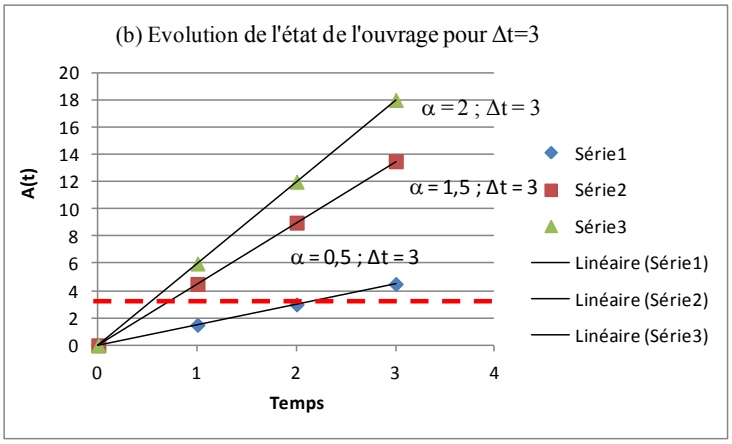


Figure 2.14 : *Variation de l'état d'altération suivant la croissance du vieillissement*

Les valeurs sur ces deux figures (2.14a, b) sont explicitées au tableau 2.1 ci-dessous.

Tableau 2.1 : Synthèse des valeurs de simulations de l'état d'altération (a, b)

(a) valeurs pour les scenarios Δt=1, α = 0.5 ; 1.5 et 2

	Temps	α = 0,5; Δt = 1	α = 1,5; Δt = 1	α = 2; Δt = 1
	0	0	0	0
Etat d'altération (A)	1	0,5	1,5	2
	2	1	3	4
	3	1,5	4,5	6

(b) valeurs pour les scenarios Δt=3, α = 0.5 ; 1.5 et 2

	Temps	α = 0,5; Δt =3	α = 1,5; Δt = 3	α = 2; Δt =3
	0	0	0	0
Etat d'altération A(t)	1	1,5	4,5	6
	2	3	9	12
	3	4,5	13,5	18

Pour différents scénarios de variabilité de l'environnement (peu agressif, moyennement agressif et fortement agressif), la figure 2.14 (a) confirme le caractère aléatoire des facteurs d'environnement et de la qualité des matériaux (= propriétés de matériaux) qui peut être insuffisante dès la phase du projet. Elle traduit aussi l'hypothèse selon laquelle une observation tardive au temps t_3 risque d'avoir des conséquences sur les pratiques d'exploitation du patrimoine pour un environnement moyennement ou fortement agressif. Ceci s'explique par le dépassement de l'état limite de maintenabilité (ELD = 3), ce qui correspond au non-respect de l'exigence de fonctionnalité de fonctions de service et de durabilité (courbe 2 et 3) [FRA 04, CRE 03, SIL 04].

Avec la même sévérité d'agressivité de l'environnement, lorsqu'on augmente l'intervalle de l'observation à dt =3, il est possible que l'ouvrage puisse se trouver dans une situation de défaillance précoce suite à la perte de sa fonction de durabilité. Cela signifie que, si l'on dispose de la connaissance sur l'ouvrage, notamment sur les facteurs susceptibles de le détériorer au cours du temps, il devient plus facile au gestionnaire de prendre des mesures efficaces. L'interprétation des notes obtenues de l'état du système (tab.2.1a et b) est la suivante : A(t) = 0.5 et A(t) = 1.5 signifie « altération légère », A(t) =2 « altération modérée », A(t) =3 « altération alarmant » et A(t) > 4 « altération critique ».

La modélisation illustrée ci-dessus met en évidence la nécessité de disposer de l'information suffisante sur le domaine général des ponts afin d'approfondir la description logique des connaissances sur les ouvrages. Les illustrations présentées à travers cette modélisation (fig.2.10d, fig.2.13) permettent de ramener les graphiques de surveillance d'ouvrages à des courbes d'évolution de leur état (fig.2.13 ; fig.2.14). Cela est important afin d'observer immédiatement toute mesure anormale, puis de suivre l'évolution de l'état de l'ouvrage pendant son exploitation.

Comme nous l'avons indiqué en introduction générale du mémoire, nous avons souhaité illustrer ici les effets de la prise en compte de la variabilité des conditions de l'environnement sur l'état des ouvrages au cours du temps. Nous montrons maintenant comment exploiter les résultats de ces simulations prédictives (fig.2.10d, fig.2.13) dans le sens antéchronologique, partant des conséquences pour revenir aux causes. Les raisonnements logiques dans ce contexte de l'observation possibiliste (conséquences → causes) impliquent l'exploitation d'autres capacités des Graphes Conceptuelles telles que la **projection des requêtes** (voir §2.5.3).

2.5.3-Opérations de projection des requêtes pour exploiter les graphes stockés

La **projection** (ou homomorphisme de graphes) est une opération de base d'interrogation des Faits stockés sous forme de graphes ou des modèles graphiques de connaissances [CHE 92, MUG 96]. Elle vise la déduction adéquate et complète d'informations contenues dans une base de Faits ou dans un modèle de connaissances, par la projection d'un graphe-requête sur cette base de Faits/modèle de connaissances [SOW 84, CHE 92].

Soient B et C deux graphes conceptuels définis sur le même modèle conceptuel unifié de connaissances du domaine (vocabulaire technique), l'interrogation de graphes-faits de base à l'aide de requêtes, exprimées elles aussi à l'aide des graphes conceptuels, permet de savoir si l'information contenue dans (B) est incluse dans la connaissance représentée par (C) [CHE 92]. Les projections de requêtes dans notre application servent à rechercher l'historique des états d'ouvrages ou des circonstances d'une situation de défaillances documentées « Faits formalisés et implémentés ».

Nous illustrons cela à travers les graphiques de Faits précédents stockées dans la plate-forme logicielle CoGui sous forme d'historique pour les observations (fig.2.10d, fig.2.13). La projection de requête sur une base de Faits dans le cadre de l'observation d'ouvrage consiste à extraire l'information utile à la décision. Il s'agit dans ce cas de raisonner à partir des conséquences enregistrées sur l'ouvrage pour quantifier au mieux le scénario de l'enchaînement de modification de ses états (voir fig.2.15a, fig.2.16a).

Deux illustrations sont présentées pour mettre en exergue le raisonnement par la projection de requêtes (fig.2.15 et fig.2.16). Sur la figure 2.15 nous montrons les résultats de la requête exprimant le besoin d'identification des causes ayant conduit à un état inacceptable dans un pont similaire documenté également dans la base de Faits précédente (fig.2.15a). La projection de la requête (fig.2.15b) sur le Fait (fig.2.16a) montre qu'il existe un pont ayant été renseigné dans la base de connaissance qui a connu une défaillance suite à la manifestation d'un environnement agressif combiné à la mauvaise qualité (mauvais état) de ce pont (fig.2.15c).

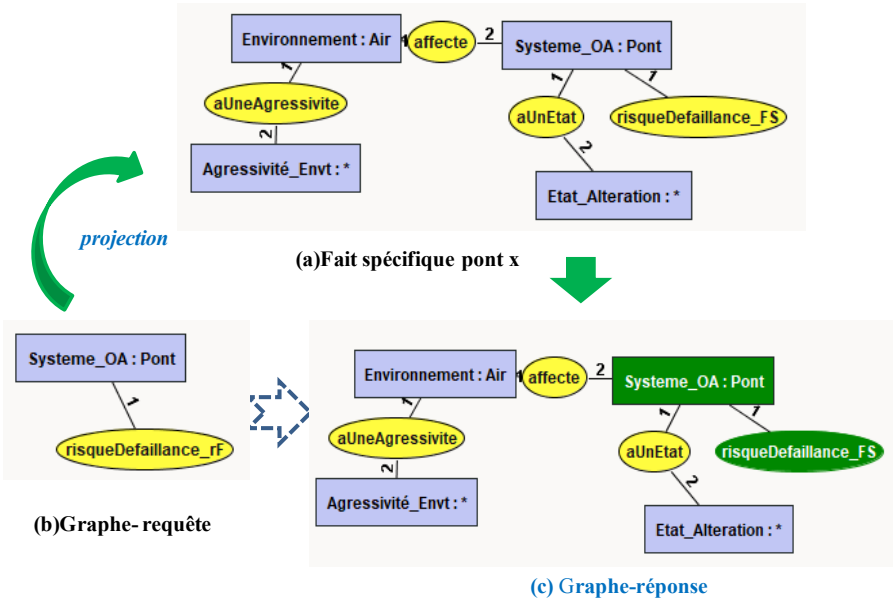


Figure 2.15 : *Interrogation de fait spécifique par projection de requête (a, b, c)*

Sur la figure (2.15c), le graphe vert est l'entrée du processus d'interrogation de la base de Faits, qui indique l'état d'un ouvrage ayant connu des altérations.

Nous avons traité ci-dessus la question de l'analyse qualitative de l'ouvrage existant à travers l'exploitation des projections sur une base de Fait formelle implémentée. Sur la figure 2.16 nous allons maintenant montrer comment quantifier le scénario d'évolution des notes de l'état de système en combinant la projection de requête avec l'inférence de la règle Rc# (fig.2.11, §2.5.2.3). La requête (fig.2.16b) proposée dans ce cadre s'appuie sur les valeurs du temps pour retrouver les notes d'état de l'ouvrage et les scénarios possibles d'altération du système au cours du temps. La figure 2.16 présente le résultat de la projection de requête (fig.2.16b) sur le graphe de Fait spécifique du paragraphe précédent (fig.2.13, §2.5.2.3) : la figure 2.16(a) montre le graphe de requête, (b) est un graphe de fait illustrant la réponse de la requête projetée.

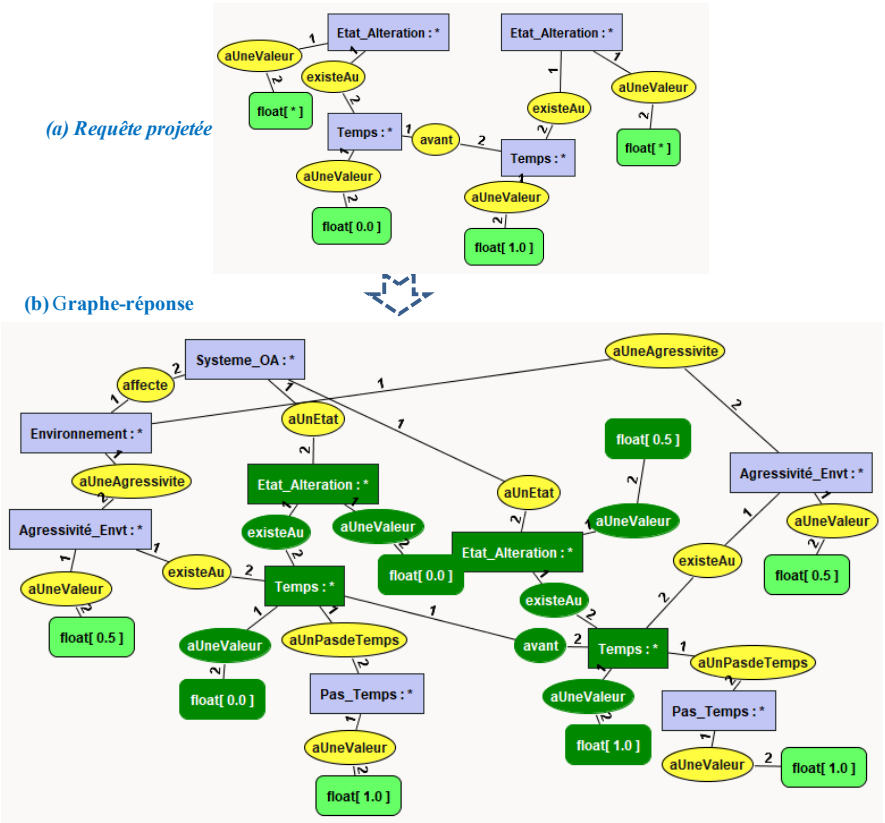


Figure 2.16 : *Historique de l'évolution de l'état d'altération de système d'ouvrage reconstitué par la projection de requête*

La projection de la requête (fig.2.16a) combinée à l'inférence de la règle Rc# montre que l'évolution du vieillissement pendant une durée d'exploitation t = 1an s'est traduite par une altération légère de l'état d'ouvrage, A(t)= 0.5 (fig.2.16b). Nous constatons à travers cette illustration (fig.2.16b), qu'il est possible de retrouver la note précédente de l'état d'ouvrage ainsi que le pas de temps ($\Delta t=1$) de déclenchement du processus de vieillissement. Ceci est capital dans la pratique de l'ingénierie forensique dans la mesure où la recherche des circonstances des situations de défaillances d'ouvrages nécessite le recours à des questionnements possibilistes à partir des connaissances disponibles [NEW 11, BRE 12].

Les exemples ci-dessus montrent comment le recours aux inférences proposées par les Graphes Conceptuels permet de réaliser des raisonnements suivant deux logiques couramment employées pour le diagnostic des systèmes de génie civil [BOI 00, PEY 06b, BRE 03, TAL 08]. Cela montre l'intérêt des opérations sur les graphes (simulation des règles expertes, projection de requêtes) lorsque les Faits sont préalablement structurés et implémentés. Le bénéfice de ceci est de trouver des explications pertinentes sur les situations de défaillances récentes sur des ouvrages peu documentés en s'appuyant sur le principe de similarité des Faits [TAI 18, BRE18]. Dans d'autres contextes d'applications comme nous en discuterons au chapitre 4, les projections de requêtes peuvent être associées à l'inférence des règles expertes pour construire des enchaînements de Faits similaires. A partir de la structure de la base de connaissances et des opérations sur les graphes présentés, nous allons maintenant exposer la procédure proposée dans notre approche pour l'analyse des défaillances sur les ponts existants.

2.5.4-Procédure proposée pour l'analyse de défaillances

Les illustrations présentées au paragraphe (2.5.3) permettent de justifier l'efficacité des raisonnements logiques à l'aide des Graphes Conceptuels. Cet outil de modélisation de connaissances d'ouvrages exploité dans cette thèse dans le cadre de l'analyse de défaillance des ponts est applicable à plusieurs domaines du génie civil. L'introduction de cette approche dans une vision de diagnostic systématique d'ouvrages existants permet de développer une vision d'expertise technique en trois dimensions.

2.5.4.1- Approche proposée pour l'analyse de défaillances des ponts en 3D

En génie civil, le diagnostic d'ouvrages existants est entendu comme : « un moyen consistant à identifier les causes probables des défaillances à l'aide des raisonnements logiques fondés sur un ensemble d'informations sur l'ouvrage » [AFN 01]. Boissier D. 2000 [BOI 00] a montré la nécessité d'évaluer la sûreté d'ouvrages en service suivant une vision de diagnostic systémique de systèmes en détérioration. Cette vision du diagnostic repose sur une évaluation multicritère des performances intégrant la dimension temporelle impactant la condition de composants, comme explicité sur la fig.2.17 [BOI 00] :

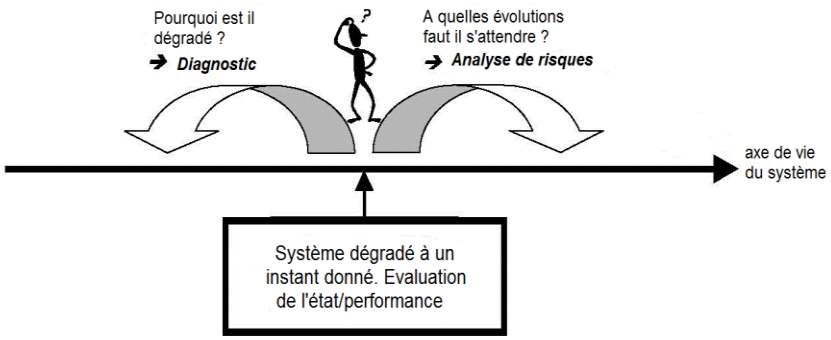


Figure 2.17 : *Vision de diagnostic de systèmes dégradés [BOI 00]*

L'idée de la vision proposée par l'auteur [BOI 00] comme illustrée (fig.2.17), est de comprendre :

- d'une part (en aval), le comportement de l'ouvrage en analysant tout ce qui peut conduire à la défaillance, et
- d'autre part (en amont), de réévaluer la réponse de l'ouvrage aux sollicitations pour connaître les raisons des défaillances survenues.

Cette vision de diagnostic nous est utile, mais nécessite d'être développée pour intégrer toutes les dimensions d'analyse de défaillances d'ouvrages en contexte d'incertitudes multiples (§2.1). Dans la mesure où notre priorité est d'éviter les situations de défaillances (récurrentes), notre idée à ce stade de la modélisation, est de considérer simultanément un ensemble restreint de champs d'application en diagnostic d'ouvrages. Ceci va permettre de mieux comprendre la manifestation des défaillances sur les ponts afin de développer l'axe de la surveillance (ou monitoring) des ponts en cours de détérioration. Nous avons inscrit cette ambition suivant trois dimensions d'analyse des défaillances de systèmes (D1, D2, D3). La figure 2.18 schématise la manière dont ces trois dimensions (D1, D2, D3) vont être développées dans notre approche pour répondre aux besoins du diagnostic des ponts en service (§2.0).

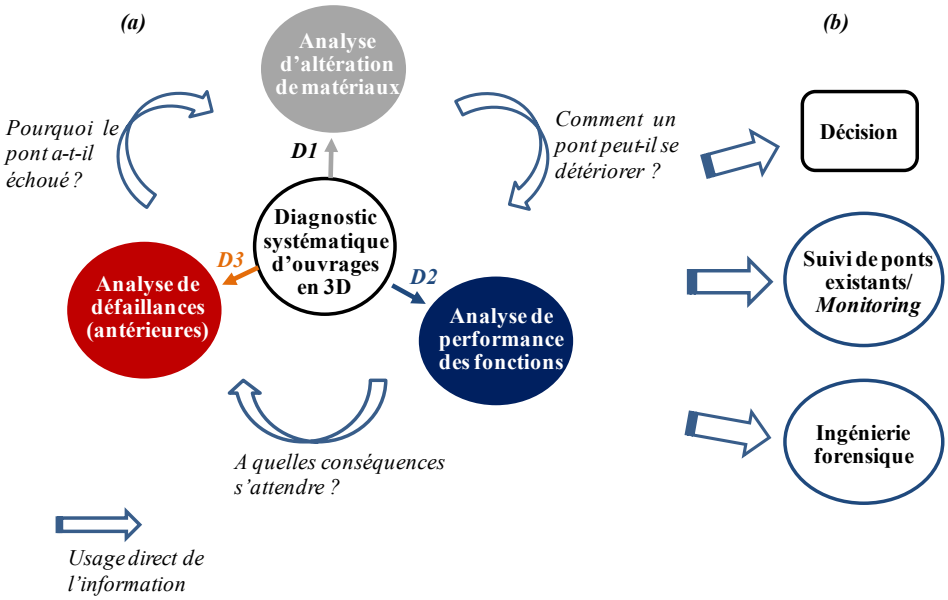


Figure 2.18 : *Approche proposée pour l'analyse de défaillances des ponts en 3D*

La figure 2.18 (a) schématise les trois axes de notre approche pour l'analyse de défaillances. Sur la figure 2.18(b) nous avons explicité les sous-domaines d'usage immédiat d'informations provenant de l'analyse de défaillances des ponts. Cette approche qui s'adapte au contexte de l'étude et aux raisonnements basés sur la théorie des graphes conceptuels est explicitée comme suit :

- la première dimension (D1), consiste à identifier et à analyser l'occurrence des processus d'altération de matériaux en se basant sur la modélisation logique d'une

combinaison des Faits. L'objectif va être de mesurer les conséquences des conditions défavorables de l'environnement et de la qualité des matériaux sur les propriétés des matériaux au cours du temps ;

- la deuxième dimension (D2), consiste en l'analyse fonctionnelle pour comprendre de quelle manière les ponts peuvent se trouver dans des situations de défaillance. Cette analyse va s'appuyer sur des simulations logiques et sémantique des variables de conditions d'états d'altération de matériaux et des états limites des fonctions ;
- la troisième dimension (D3) vise à analyser les défaillances antérieures par le recours à l'interprétation des bases structurées et formalisées des Faits spécifiques des ponts sélectionnés. Cette analyse va déboucher sur des leçons apprises sur les échecs du passé et des bonnes pratiques, ainsi que des propositions d'actions plus pertinentes d'anticipation pour le futur.

Les dimensions D1 et D2 consistent en des raisonnements déterministes exploitant le modèle de simulations prédictives M2. La finalité de ces simulations est la mise en place d'une base relationnelle de Faits, des états d'altération, états de performances des fonctions et des situations de défaillances possibles des composants des ponts en cours de détérioration (chapitre 4.2). La dimension D3 consiste en l'application des pratiques de l'ingénierie forensique par le déploiement des projections de requêtes sur la base relationnelle de Faits spécifiques implémentée (chapitre 4, partie 3). Cela permet d'affiner l'exploitation de la connaissance dont l'on dispose sur le domaine étudié, en enrichissant les Faits avec des variables qualitatives et quantitatives. La mise en œuvre de cette approche d'analyse des défaillances repose sur une démarche couplée d'analyse forensique classique des défaillances et les simulations des Faits structurés. Il s'agit d'une démarche en deux phases (fig.2.19).

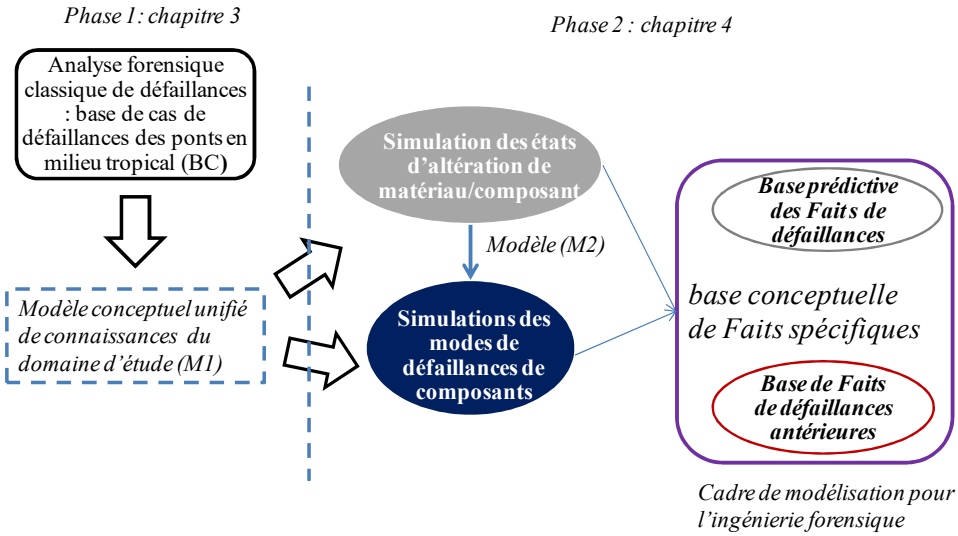


Figure 2.19 : *Phases de mise en œuvre de l'approche d'analyse des défaillances en 3D*

La phase 1 d'analyse forensique classique de défaillances correspond à l'étape d'acquisition d'informations sur les ponts (investigation, statistiques) qui va être mise en œuvre au chapitre 3 (§3.2). Cette étape a déjà explicitée en (§2.4.2). La phase 2 correspond à celle de l'exploitation du modèle conceptuel unifié des connaissances du domaine d'étude (voir §2.4.6). L'exploitation de la base des Faits (DBF) va être possible par le recours aux opérations des Graphes Conceptuels que nous venons d'illustrer par les applications ci-dessus (§2.5.2). Cette base servira d'outil d'aide au diagnostic d'ouvrages en cours de détérioration préconisé dans ce travail de thèse (voir chapitre 4, partie 4).

2.6- Synthèse du chapitre

Pour répondre aux enjeux de gestion patrimoniale dans un contexte spécifique d'incertitudes (§2.1), l'approche de modélisation holistique développée dans ce travail de thèse se révèle nécessaire. Les intérêts sous-jacents sont bien sûr d'améliorer *in fine* l'efficacité des pratiques des acteurs et la sûreté des ouvrages existants. Ce chapitre a explicité les notions d'incertitudes associées aux pratiques de gestion patrimoniale et aux ouvrages existants, puis a apporté des contributions originales pour leur prise en compte dans la pratique.

Plusieurs questions ont été posées dans ce chapitre, au chapitre 1 (§1.6) et dans l'introduction générale, telles que : 1) *En quoi consistent les incertitudes associées aux lacunes de manque de données et comment y répondre ? 2) Comment identifier et expliquer l'occurrence des facteurs de risque qui conduisent à des défaillances sur les ponts existants ? 3) Comment considérer simultanément tous les sous-domaines en interaction afin de construire un modèle complet et pertinent ? 4) Comment identifier et expliquer les défaillances d'ouvrages non documentés ? 5) Comment partager et enrichir l'information entre les experts des sous-domaines en interaction* ?

L'exploitation des capacités des Graphes Conceptuels illustrées dans ce chapitre a permis de justifier l'intérêt de l'approche proposée pour décrire et manipuler les connaissances du domaine des ponts. Une illustration sur la simulation du vieillissement des états d'ouvrages à des fins d'inspection (monitoring) a été présentée et montre comment l'information utile est transmise entre les sous-domaines en interaction (exemple, environnement-matériaux/système d'ouvrage). La figure 1.20 résume les six étapes de l'approche développée pour la modélisation.

Les paragraphes (§2.3.3.3 ; §2.5.1 à §2.5.2) traitent les questions 1-2-3 et 5 (formaliser, structurer l'information, identifier et simuler). Le paragraphe (§2.5.3) répond à la fois aux questions 2-3-4 et 5 à travers les simulations sur des Faits structurés (prédiction, quantification, analyse possibiliste…). Les retombées de cette approche consistent en la capitalisation et la structuration des connaissances utiles enrichissant ainsi l'expertise et les décisions des acteurs. Ces illustrations justifient également la compatibilité de la logique de description de la théorie des Graphes Conceptuels avec la plate-forme logicielle CoGui. Cela permet de construire des modèles plus pertinents, capables de répondre aux objectifs de cette

thèse et aux besoins de décisions en exploitation de patrimoine de ponts. Grâce aux illustrations des extraits de modélisation présentées dans ce chapitre (§2.5), nous pouvons justifier les capacités des Graphes Conceptuels par trois avantages essentiels : la transcription de connaissances en langage naturel des experts, la manipulation intuitive et facile, la réalisation des inférences et des projections graphique visuelles à l'aide des règles expertes et des requêtes graphiques.

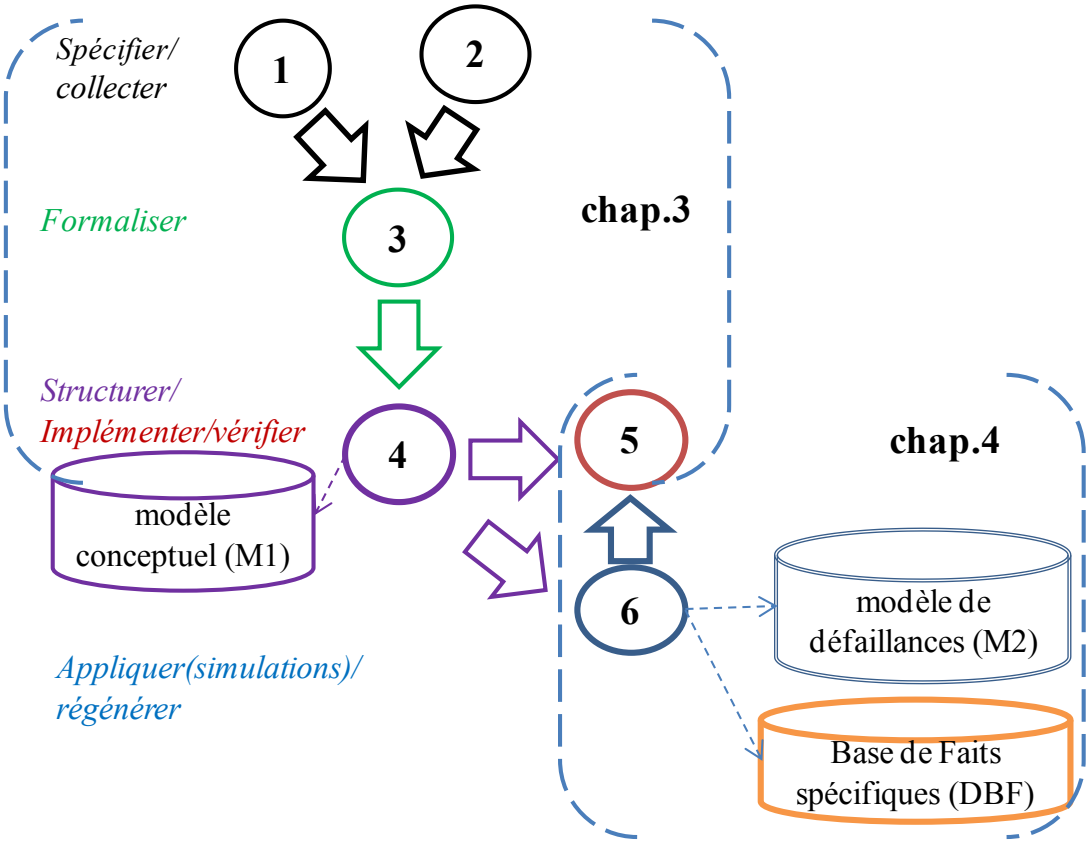


Figure 2.20 : *Résumé des étapes de modélisation*

Les étapes 1 à 5 présentées dans la figure 2.20 vont être développées dans le chapitre 3 (modèle conceptuel unifié du domaine). Ce chapitre formalisera les connaissances relatives aux ponts pour construire le modèle conceptuel du domaine : ensemble des concepts et des relations entre concepts, graphes de Faits, structuration de règles génériques et simulation.

Dans le chapitre 4, nous établirons l'ensemble des règles expertes relatives aux sous-domaines (analyse fonctionnelle, matériaux, risque…), l'implémentation (étape 5) étant partagée entre chapitre 3 (pour les concepts) et chapitre 4. Enfin, nous procéderons à la description des faits et à l'exploitation des simulations (étape 6).

Chapitre 3 Modèle conceptuel unifiant les connaissances des ponts pour améliorer l'efficacité des pratiques d'exploitation, cas des pays tropicaux-Br3KM

Afin d'améliorer les pratiques des acteurs dans le domaine de l'ingénierie et de la gestion patrimoniale des ponts, la construction d'un modèle unifiant les connaissances du domaine est devenue une nécessité. Au chapitre 1 (§1.2) et 2 (§2.1), nous avons illustré les difficultés auxquelles les experts et les décideurs font face durant le cycle de vie des ouvrages de génie civil. Avec les bases de modélisation développées au chapitre 2, ce chapitre 3, tel qu'introduit en conclusion du chapitre 2, développe le modèle unifié (M1) du domaine d'étude (Br3KM). Ce chapitre se compose de quatre parties : la première partie explicite les sous-domaines d'applications et les sources d'acquisition de l'information. La deuxième partie consiste en l'acquisition d'informations et élabore le vocabulaire du domaine en passant par un traitement sémantique de l'information. La troisième partie développe le modèle d'organisation des connaissances (concepts, relations, règles) et leur implémentation dans la plate-forme logicielle CoGui. La quatrième et dernière partie fournit une synthèse sur les contributions originales de cette modélisation et les possibilités d'exploitation de la modélisation Br3KM. Ce chapitre vise à :

- montrer comment valoriser certaines approches techniques exposées au chapitre 1 (§1.4) dans le contexte d'acquisition et de validation d'informations sur les ponts ;
- structurer une vision d'organisation homogène des sous-domaines pour faciliter le transfert de l'information entre experts ;
- structurer l'ensemble des concepts génériques et des relations correspondantes pour rassembler un grand nombre de sous-domaine en interaction dans ce domaine de gestion des ponts (voir chap.2, §2.5) ;
- illustrer comment procéder à l'évaluation de performance de fonction d'un composant de pont par l'application de la logique du premier ordre des Graphes Conceptuels.

3.1- Domaine d'étude et objectifs de la modélisation Br3KM

3.1.1-Objectifs de la modélisation Br3KM

L'obtention de données sur les cas de défaillances antérieures pour des ouvrages mal documentés, nécessite généralement beaucoup de temps et des efforts importants de récupération de documentation. Le propos ci-dessus peut être illustré par les cas des défaillances des ponts Mouyondzi (2012) et Bas-Kouilou (2013) dans la mesure où l'insuffisance d'informations n'a pas permis aux experts de mener des investigations (voir

chapitre 1, partie 1.2). L'un des principaux intérêts de la modélisation Br3KM est de prendre acte du besoin de connaissances utiles pour développer des modèles de raisonnements en génie civil. Cette modélisation a pour cible les enjeux de gestion des ponts en milieu tropical afin de considérer le manque d'informations suffisantes sur les défaillances des ponts dans ce contexte spécifique.

La description des informations sur les ponts en cours de détérioration et ceux ayant connu des défaillances dans ce contexte (des pays tropicaux), est nécessaire afin d'enrichir le savoir et les modes de travail des experts. Les objectifs de cet outil (Br3KM) sont (liste non exhaustive) :

- améliorer la communication entre experts grâce à un cadre de partage formel de vocabulaire commun et contrôlé des connaissances du domaine ;
- faciliter la transparence du processus de raisonnement et le consensus entre experts dans le traitement des problèmes complexes (par exemple lors de l'analyse comparative de défaillances…) ;
- rendre disponible les connaissances factuelles (Faits) sur les situations de défaillances des ponts en milieu tropical pour l'apprentissage et l'amélioration de l'expertise (pour l'ingénierie forensique, l'évaluation de sûreté des ponts…) ;
- faciliter l'identification et la compréhension des sources d'altération des ouvrages, pour suivre l'évolution de leur performance au cours du temps et aider à prendre des décisions nécessaires ;
- générer des connaissances lorsque de nouveaux cas de défaillances sont survenus afin de faire évoluer l'outil mis en place.

Le paragraphe §3.1.2 explicite le domaine global de la modélisation et ses sous-domaines d'application considérés dans ce travail de thèse.

3.1.2- Domaine et sous-domaines de la modélisation Br3KM

Le domaine d'étude (Di) couvert par cette modélisation (Br3KM), consiste en l'« ingénierie d'ouvrages d'art existants (ponts et ouvrages connexes) et leurs pratiques de gestion ». Ce domaine de connaissances défini à partir de la littérature sur l'ingénierie des infrastructures des ponts [AKT 03, DE-L 04, WEN 09], rassemble sept champs d'application spécifiques. La figure 3.1 illustre ces sept sous-domaines en interaction organisés et unifiés de façon globale afin d'homogénéiser les échanges entre les spécialistes et les non spécialistes :

- la « **science mécanique et la technologie de construction** » (D1), couvre les connaissances sur les structures des ouvrages existants (ponts, tunnels…), et les problèmes liés à leur cycle de vie (conception, exécution, exploitation). Ce champ couvre ce qui relève des modes constructifs et des typologies d'ouvrages (par exemple pont suspendu, pont cantilever...).
- la « **science des matériaux** » (D2) couvre les connaissances sur les matériaux des composants des ponts (nature, propriétés physiques et mécaniques), leurs processus de

dégradation sous l'effet de l'environnement naturel (par exemple le vieillissement naturel, la corrosion...) ou de l'usage (trafic, actions mécaniques...) et les états d'altération induits au fil du temps.

- la « **sûreté et l'analyse de risques d'ouvrages** » (D3) couvrent les connaissances relatives à la fonctionnalité, à la sécurité, aux performances, à la maintenabilité et aux défaillances des ouvrages. Ce champ couvre tout ce qui relève du fonctionnement de l'ouvrage en tant que système regroupant de multiples composants aux fonctions diverses, et des interactions entre composants.
- l'« **analyse de défaillances et l'ingénierie forensique** » (D4) couvrent les connaissances identifiant les sources (facteurs de risques) à l'origine des situations de défaillances, notamment celles décrivant les processus/scenarios de défaillances.
- la « **gestion de la maintenance des ponts et la formation des techniciens** » (D5), couvre les connaissances sur les aspects budgétaires, les stratégies de maintenance et d'allocation des moyens, la planification des interventions et les coûts d'exploitation [ORC 08, O'CO 13, FRA 04].
- l'« **environnement des ponts** » (D6), couvre les connaissances sur les conditions extérieures (phénomènes naturels, chargement, trafic, crues, poussées de terrain…), dont les actions sur les ouvrages dans un contexte spécifique contribuent à leur vieillissement rapide ou accélèrent leurs mécanismes de défaillances.
- l'« **inspection, l'évaluation et le diagnostic des ponts/tunnels**» (D7) couvrent les connaissances sur les méthodes de diagnostic (ou d'inspection), les données de mesures, les décisions, les actions de maintenance et leur effet [HEL 13].

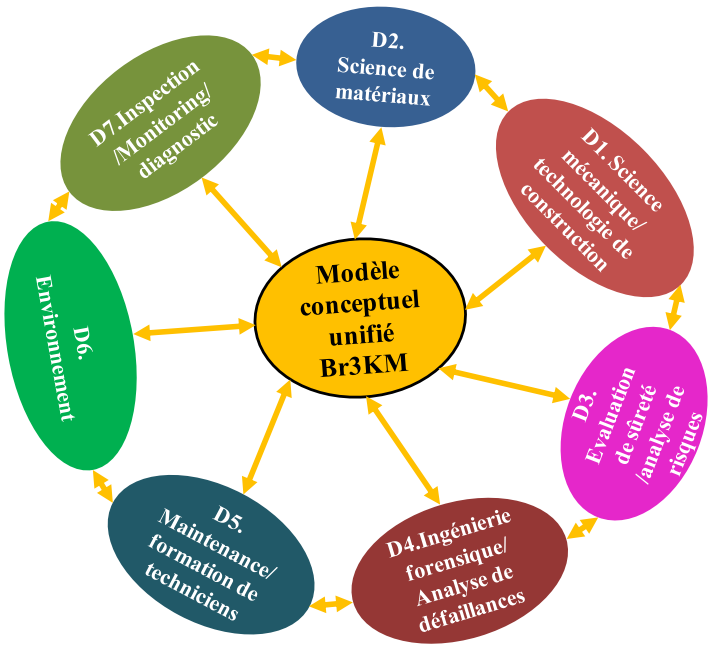


Figure 3.1 : *Vision globale de l'organisation du domaine des constructions*

La figure 3.1 illustre notre proposition d'organisation homogène du domaine afin de faciliter les échanges entre les acteurs. Les flèches dans les deux sens consistent en des relations que nous déterminerons à l'étape du traitement de l'information (§3.2.4). A titre d'illustration, d'un côté, la connaissance de l'interaction entre la science des matériaux et la science mécha-technologique, est utile pour l'identification des sources des défaillances dues aux défauts de matériaux. De l'autre côté, l'interaction entre la science des matériaux et l'inspection d'ouvrage (monitoring), consiste en l'identification des processus d'altération des composants d'ouvrages. Cette organisation intégrant les différents sous-domaines et leurs interactions, permet de pallier aux insuffisances de modélisation parcellaire constatées dans les modèles disponibles [HEL 13, LIU 16, WAN 09a, ZHA 15, DAV 16]. Aussi, dans un contexte d'exploitation réelle tel qu'exposé au chapitre 1 (§1.2), cette vision de l'organisation du domaine pourra servir de moyen adéquat pour pallier aux difficultés de partage d'informations dans un domaine technique. Cette structuration formelle sera traduite à travers le modèle M1 de la modélisation **Br3KM** et fondée sur le formalisme des Graphes Conceptuels. L'intérêt de cette organisation est illustré dans ce chapitre (§3.5).

A ce stade de modélisation, nous venons de répondre à la question 3 « *Comment considérer simultanément tous ces domaines afin de construire un modèle complet et pertinent ?»* rappelée en conclusion du chapitre 2 (§2.6). La détermination des sous-domaines (fig.3.1) permet de prendre en compte les difficultés souvent rencontrées au cours de l'acquisition d'informations en termes d'identification de la nature de l'information à recueillir, et des moyens d'acquisition à déployer [FER 92]. Dans la partie suivante, nous introduisons l'étape d'acquisition de l'information sur les ponts en explicitant les sources essentielles.

3.1.3- Sources et processus d'acquisition de l'information sur les ponts existants

Les données (informations) nécessaires à la modélisation Br3KM ont été collectées ou produites à partir de six sources :

- la littérature (pièces de conception, rapport de construction des ouvrages, rapports d'inspection, dessins…) ;
- les modèles mécaniques et d'analyse de système (modélisation structurelle et fonctionnelle) [BAR 11] ;
- l'expertise (sur la base d'auscultation, données d'observations et d'élicitation de dires d'experts) et l'ingénierie forensique [COO 08, BAR 11] ;
- les bases de défaillance dans le monde (NYSDOT, NBI, MRGenCi, Failure Wiki 2013) [LEE 13b, CAI 07, BRE 12] ;
- les journaux (*Brueckenweb*[10] *; BridgeForum*[11] *; Bridgeweb*[12]) ;
- les bases de connaissances ontologiques disponibles [HEL 13, LIU16, DAV16].

[10]www.bruckenweb.de (défaillances des ouvrages dans le monde, 1999-2018)
[11] www.bridgeforum.org/dir/collapse
[12] https://www.bridgeweb.com/issue/details/141

En pratique, les deux premiers moyens nous ont permis de produire des informations sur les ouvrages, leur environnement, leurs mécanismes de défaillances et leurs fonctions: classification des ponts, décomposition, etc. Les trois suivants ont permis de collecter les informations sur les défaillances des ponts en milieu tropical. Le champ d'ingénierie forensique déployé à ce stade permet de tirer les leçons sur les situations de défaillances dans ce milieu afin d'enrichir le modèle conceptuel (M1). Le dernier a permis la réutilisation de certaines connaissances génériques (concept, relation) déjà formalisées dans d'autres modèles de connaissances disponibles (ontologies de domaine, modèle BIM, voir chapitre 1.5).

Nous abordons dans la partie 3.2 suivante le processus de collecte des données sur les ponts existants et leurs défaillances potentielles (sources et conséquences). Les données collectées vont être décrites progressivement de manière explicite et sémantique en traduisant les termes de base via un vocabulaire structuré. Dans les paragraphes § 3.2.1 à 3.2.4, une investigation approfondie va être menée sur les défauts des ponts dans le monde puis en contexte tropical. Un accent particulier va être mis sur les pratiques de l'ingénierie forensique et des approches telles que l'analyse de systèmes pour constituer une base de cas de défaillances sur les ponts en milieu tropical (§ 3.2.3).

3.2- Identification et analyse forensique des défauts sur les ponts existants

Un **pont** est un système de génie civil, dont la fonction consiste principalement au franchissement des obstacles par-le-dessus, devant assurer deux fonctions d'états limites (voir chapitre 1, §1.4) : la *continuité* de la voie et la *sécurité* du trafic supérieur » [MOR 00]. Les familles de ponts peuvent être définies de multiples manières selon les critères employés [SID 17, MOR 00, HAG 17] :

- la nature de la voie, qui permet d'identifier trois classes de pont : pont routier, pont rail et passerelle piétonne,
- les matériaux employés pour la construction (béton armé, béton précontraint, acier, bois...), permettant d'identifier les ponts selon des critères physiques (pont en bois…),
- l'intégration du pont dans le réseau de transport, permettant de classifier les ponts selon la charge maximale admise et le gabarit des véhicules qui peuvent passer,
- la géométrie caractéristique de l'ouvrage, permettant de classifier les ponts selon le nombre de travées, la longueur totale de l'ouvrage ou la portée de la plus grande travée,
- la structure mécanique, qui permet d'identifier les ponts selon le critère de mode de fonctionnement mécanique (par exemple, pont en arc, pont hauban…),
- la nature du franchissement : voie d'eau, zone urbaine, autre voie routière, voire autre pont...
- etc.

En lien avec les sous-domaines de la figure 3.1, nous privilégierons une classification qui s'appuie sur deux critères essentiels : le mode de fonctionnement mécanique, et le matériau employé pour la construction.

Le mode de fonctionnement mécanique d'un ouvrage est un critère associé au schéma statique de l'ouvrage concerné. En d'autres termes, c'est un mode d'action, qui représente la manière selon laquelle les contraintes mécaniques induites par les actions extérieures (gravité, trafic, actions climatiques) sont supportées par l'ouvrage et réparties entre ses différents composants. Il se traduit par trois modes génériques de reprise d'efforts (flexion, traction, et compression), et conduit à une classification selon trois grands types de ponts :

- ponts en arc (arc supérieur, arc intermédiaire, arc inférieur),
- ponts à poutres (dalle monolithique, poutre-dalle, treillis…)
- pont suspendu (pont hauban, pont à câble).

Le **matériau**, représente, une substance constituant l'identité physique d'un composant et ses performances. Selon le matériau utilisé le plus largement pour les composants majeurs de l'ouvrage, les ponts se distinguent en cinq grandes familles :

- ponts en maçonnerie,
- ponts en bois,
- ponts en bétons (béton armé, béton précontraint, béton à haute performance,…),
- ponts en bois (bois local, bois industriels)
- ponts en matériaux mixtes (acier-béton, composite, bois-acier…).

Suivant cette classification, nous organiserons ces familles de ponts en deux classes génériques (concepts au sommet ou types) à différents niveaux dans le modèle conceptuel (M1) : les trois grands types de ponts identifiés selon leur mode d'action vont être explicités au premier niveau de la hiérarchie par le concept générique « Système_OA » (= système d'ouvrages d'art). Les cinq grandes familles des ponts identifiables suivant leur nature physique, vont être explicitées par le concept générique « Matériau ». Cette classe générique « Matériau » regroupera également, les autres matériaux constituant certains composants dans les ponts, y compris le sol de massif de terrain en place. Dans ce qui suit, l'acquisition d'informations sur les ponts consistera au couplage d'approches issues des champs techniques explicitées sur la figure 3.1 (analyse forensique, modélisation fonctionnelle…).

L'identification et l'analyse forensique des défauts sur les ponts dans cette partie consistent en l'analyse structurale et fonctionnelle de système en s'appuyant sur les dires d'experts pour expliciter les détériorations possibles ainsi que leurs mécanismes sources. Ceci va également faire appel à des statistiques sur les cas observés pour argumenter les hypothèses de raisonnements (mécanistes, physiques…). Afin d'inscrire cet examen dans la logique de description taxonomique d'informations sur les situations de défaillances, nous procédons dans un premier temps à une identification des types de détérioration selon le type constructif et physique des ponts « mode d'action, matériaux » (§3.2.1). Ensuite, dans le second temps nous approfondissons cette description en intégrant d'autres critères tels que, le degré d'altération, l'ampleur des dommages afin de parvenir à la compréhension des raisons des détériorations sur les ponts en milieu tropical (§3.2.2). Le bénéficie de cette manière d'investiguer les défauts des constructions est d'intégrer au préalable la logique de

formalisation de connaissance préconisée dans cette modélisation (voir chapitre 2, §2.3.3.2). Pour faciliter la compréhension du vocabulaire technique dans ce qui suit, il nous convient d'expliciter le lexique du terme « processus d'altération ».

Dans [ICO 93], un processus d'altération correspond à un mécanisme : « processus physique (mécanique, chimique, hydraulique…) comprenant un enchaînement de causes et d'effets qui conduisent à la dégradation des caractéristiques des matériaux et des propriétés des ouvrages ». Dans [HEL 13, BIE 07], un processus de détérioration est : « un processus d'un matériau, d'un élément ou d'une structure qui conduit à un défaut ». Dans [ISO 02], un processus d'altération est abordé en termes de détérioration : « un processus qui affecte négativement la performance structurelle y compris la sûreté dans le temps due aux actions : chimiques, physiques ou biologiques naturelles, environnementales normales ou sévères…».

De ces définitions, nous retenons trois idées liées au terme « processus d'altération ». La première idée réside dans l'identification des sources d'altération des matériaux/composant interagissant avec l'environnement [ISO 02]. La seconde idée est liée à la connaissance des effets de l'enchaînement de propagation en deux phases du processus d'altération qui se traduit par des symptômes visibles : une phase d'initiation où aucun symptôme n'est visible, et une phase de propagation dans laquelle la manifestation de la détérioration se traduit par des symptômes [TUU88]. La troisième idée est le fait qu'un processus consiste en la diminution progressive ou brutale du niveau de performance de composants jusqu'à déclencher une défaillance. Notre intérêt pour ce terme réside dans le besoin de simulation des effets de facteurs de risque (ou d'agressivité) pour en déduire les conséquences sur les composants et leur fonctionnalité. De cette discussion, le terme « processus d'altération » est considéré comme suit :

> *Un processus d'altération est un processus qui peut affecter un composant, et conduit à une situation de défaillances.*

3.2.1- Détériorations et défaillances des ponts suivant le type constructif

3.2.1.1- Détériorations et défaillances des ponts en arc

Les ponts en arc sont des structures (système) historiquement construites en maçonnerie. C'est un type de pont fonctionnant mécaniquement en compression et en flexion, de manière telle que l'ossature porteuse de tablier fonctionne en flexion-compression et les appuis en compression. Il est constitué de deux composants principaux lui permettant généralement de franchir l'obstacle en une seule ou en plusieurs travée (s) :

(a) un tablier arqué, qui consiste en une ossature courbée (qualifié d'arche, sous forme de poutre continue en béton, en métal ou d'une pièce solidaire en maçonnerie), et

supporte les efforts sous forme de sollicitations principalement en compression composée. Selon les conditions de terrain, un tablier arqué peut être supérieur (tablier au-dessus de l'arc), intermédiaire ou inférieur (tablier situé dans la hauteur ou au-dessous de l'arc et soutenu par des éléments d'assemblage « suspentes, pilettes »). Chaque ossature typique peut être continue ou discontinue selon la présence d'une articulation au milieu de l'ouverture de l'obstacle franchi (figure 3.2). (b) des appuis inclinés (en rive) pouvant se présenter sous forme d'articulation ou d'encastrement. Les figures 3.2 et 3.3 illustrent des images (fig.3.2) et un schéma mécanique de mode de fonctionnement de pont en arc (fig.3.3).

(a) pont en arc à tablier intermédiaire (pont Fouta, Congo)

(b) pont en arc à tablier supérieur (pont Stainforth,UK)



Figure 3.2 : *Extrait d'illustration de ponts en arc*

(a) mode d'action d'un pont en arc

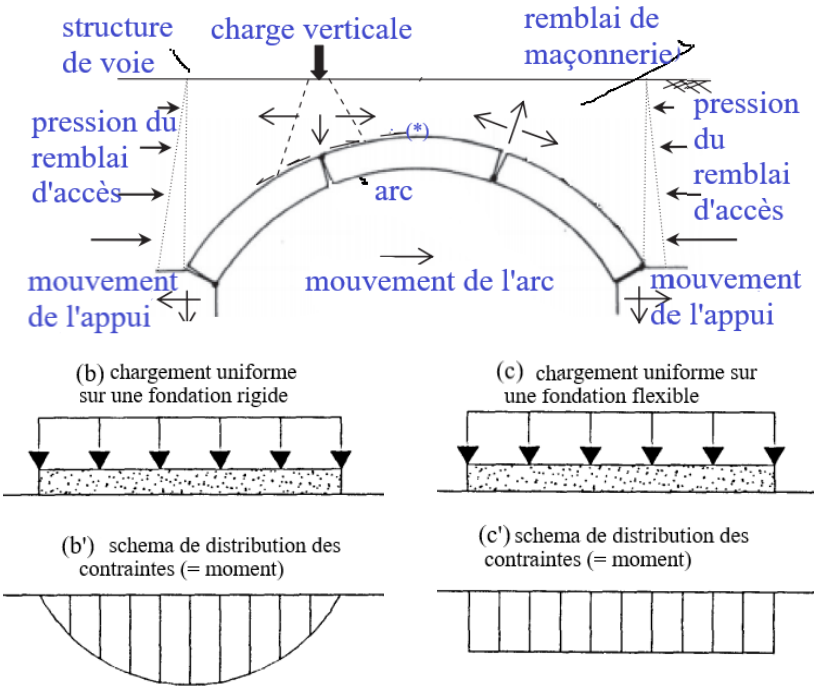


Figure 3.3 : *Illustration de mode de fonctionnement de ponts en arc [SAR 16]*

(*) : contraintes générées par le frottement entre le massif de sol d'appui et l'arc (voûte).

De façon mécanique, les ponts en arc sont généralement confrontés à trois faits particuliers qui peuvent engendrer des dysfonctionnements [PAG89, MEL 91] : (i) les sollicitations appliquées peuvent exercer sur les appuis inclinés aux extrémités un effort trop grand (a priori oblique) qui tend à les écarter en provoquant une ouverture et une perte de compression dans la voûte (tablier arqué, cas du pont sur la figure 3.3a). (ii) les efforts introduits sur ces appuis d'extrémité constituent des poussées importantes telles que, en cas de déplacement d'un appui, l'ouvrage soit mis en situation de défaillance (du fait d'une modification significative des efforts internes, et donc de la stabilité, figure 3.3a). (iii) un choc soudain sur une partie du tablier arqué (voûte) qui rompt aussi la compression du fait de l'insuffisance de réponse de la structure (matériau). La figure 3.3a illustre ces faits relatifs au comportement mécaniquement des ponts en parc (cas du pont, fig.3.2b). Elle (fig.3.3a) matérialise deux hypothèses :

- l'interaction entre le massif d'appui (remblai de sol en place) et la structure peut entrainer des détériorations lorsqu'un déplacement inacceptable se produit au niveau de l'appui,
- différents défauts peuvent se produire dans le pont (fig.3.2b) lorsqu'un chargement important est concentré en un point de la surface de roulement du tablier arqué remblayé en terre (par exemple au quart de la portée d'une arche) [PAG 89, PAG 95, MEL 91] :

- un mécanisme à quatre charnières, qui se manifeste lorsque la charge appliquée au quart de la portée d'une arche, induit quatre fissures ou points de charnière qui se développent progressivement avec l'augmentation de la charge. [PAG 95] a indiqué que ce cas peut être observé lorsque la voûte de l'arche est réalisée avec des matériaux de moindre qualité.
- une rupture de la maçonnerie, qui peut être causée par les efforts de compression exercés sur une partie relativement petite d'une section présentant une flexion importante. Les auteurs [PAG 89, PAG 95, FIS 01] estiment que ce type de détérioration se produit dans les arcs en maçonnerie ayant une résistance mécanique médiocre ou dans le cas des arcs trop élancés (minces par rapport à la travée).
- la chute des briques de maçonnerie causée par le cisaillement des tronçons de la voûte sous l'effet d'une charge plus élevée.

Si l'on s'intéresse aux propriétés des matériaux, le tablier dans ce pont (arc) peut aussi céder du fait de la perte d'un appui entraîné par un processus d'altération du matériau (érosion ou affouillement, rupture du support...). Les figures 3.3 (b et b') illustrent le cas où la fondation d'appui est une structure rigide induisant une limitation de liberté de mouvement du tablier. Les figures 3.3 (c et c') montrent le cas où cette fondation est flexible avec donc une tolérance de liberté de mouvement du tablier. Suite à la discussion exposée ci-dessus, quatre faits particuliers expliquant la perte des fonctions dans les ponts en arc peuvent être répertoriés comme suit :

- perte de capacité en compression de la voûte,
- perte de stabilité de l'appui (par exemple, le déplacement horizontale de culée),
- rupture de la structure de voie (par exemple, la rupture de la maçonnerie),
- déformation de la structure de voie (par exemple, la perte d'uni de chaussée).

Les deux premiers types de situations de défaillances sont liés au dépassement de l'état limite ultime (ELU) vis-à-vis d'une fonction de sécurité, le troisième type concerne la fonction d'état limite de durabilité (ELD) et le dernier type est lié à la fonction d'état limite de service (ELS). La figure 3.4 illustre un cas d'altération de pont en arc maçonné, qui a entraîné la perte des fonctions de stabilité de l'appui et du tablier. Il s'agit du pont Crane construit en 1957 près de Feltham (Royaume-Uni), dont la défaillance a été enregistrée le 14 novembre 2009 suite aux altérations visibles sur l'ouvrage (rupture des composants de culée, du tablier arqué).

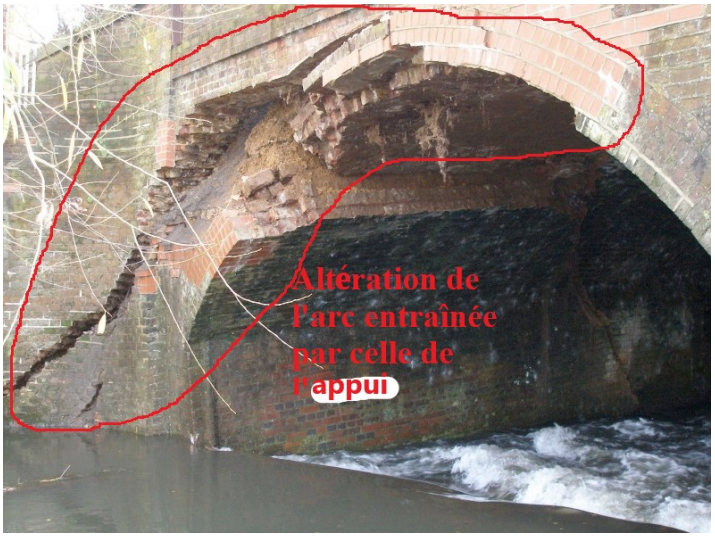


Figure 3.4 : *Illustration d'un cas d'altération de pont en arc [RAI 09]*

Pour les experts de l'investigation, la source primaire des défaillances enregistrées relevait d'un processus d'érosion externe sous la culée, déclenché par des inondations fréquentes [RAI 09]. Dans ce rapport [RAI 09], le défaut du profil de la voie de circulation a été indiqué comme premier symptôme de l'altération du pont.

Pour les ponts maçonnés en arcs, les principaux types d'altérations couramment rencontrées d'après [CAL 12, FIS 01, KWO 99, BIE 07] sont : fissuration, rupture de maçonnerie, effritement, désintégration, etc.

3.2.1.2- Détériorations et défaillances des ponts à poutres

Les ponts à poutres sont des ponts dont le tablier dit « poutre », supporte mécaniquement les efforts de sollicitation via un comportement en flexion. En pratique, un tablier poutre peut prendre différentes formes structurelles classifiables en 4 classes structurales, qui constituent également des sous-familles de ponts relevant de la famille des

ponts à poutres : dalle monolithique, poutre-dalle, poutre-caissons, poutre-treillis. Suivant ces classes de tablier, l'ossature porteuse pour chaque sous-type de tablier peut être à travée unique ou multi travées, à poutre simplement supportée ou à poutres continues.

D'un point de vue mécanique, chaque type de tablier peut connaître des situations de défaillances résultant de divers processus, notamment suivant le mode de sollicitation et la forme géométrique de la structure. Les défauts dans les ponts monolithiques étant similaires à ceux dans les ponts à poutres-dalles, nous souhaitons illustrer dans ce qui suit un échantillon des trois autres types constructifs de pont et leurs détériorations possibles : poutres-treillis, poutres-caissons, et poutres-dalle.

- *Cas des ponts poutres-treillis*

Le tablier de pont à poutres treillis (ossature porteuse) est complété par des poutres latérales triangulées, souvent construites en acier. Ces poutres sont composées de, (a) membrures, (b) structure de triangulation (diagonales et/ou des contreventements) et (c) platelage de couverture. La figure 3.5 illustre ce type de pont où (a) est une vue longitudinale et (b) une vue fonctionnelle du pont.

(a) *coupe transversale de pont-treillis* (b) *vue du pont en service*

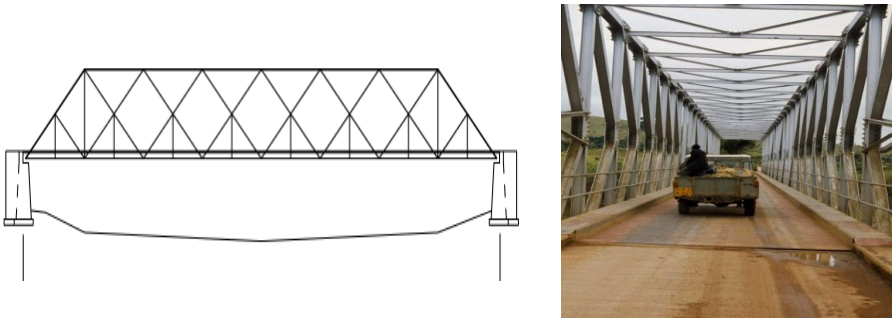


Figure 3.5 : *Extrait de pont à poutre-treillis*

Dans les ponts à poutres treillis, la présence d'un trop grand effort de sollicitation (effort de compression ou de traction excessif) au niveau des nœuds des membrures et des diagonales peut entrainer des fissurations et des ruptures des éléments d'assemblage (goussets…). La manifestation de ces contraintes peut par la suite provoquer une déformation des diagonales qui se traduira par l'instabilité de la structure métallique (perte de support métallique). Ceci conduit généralement à une chaîne de surcharge par compression ou tension provoquant plusieurs détériorations structurelles. Les causes pour de tels faits sont nombreuses.

Par exemple, pour le cas de la défaillance du pont I-35W, de Minneapolis (Minnesota, USA), survenue le 1er aout 2007 (fig.3.6), les causes indiquées par les experts après l'accident, étaient les erreurs de conception, l'insuffisance d'entretien et de suivi [LIA 09]. Cet ouvrage mis en service en 1967 était un pont en arc de treillis portant huit voies de circulation à double sens. Cet ouvrage présenté dès les années 90 comme étant « structurellement défectueux »,

était en réparation au moment de la catastrophe. D'après ces explications, nous pouvons estimer que la raison d'une telle défaillance est la combinaison de l'insuffisance en capacité structurelle de l'ouvrage (matériau et/ou action, par exemple un gousset sous dimensionné) et de problème organisationnel (manque de maintenance, erreur de calcul…). La figure 3.5 illustre un extrait de cas de défaillances des ponts treillis.

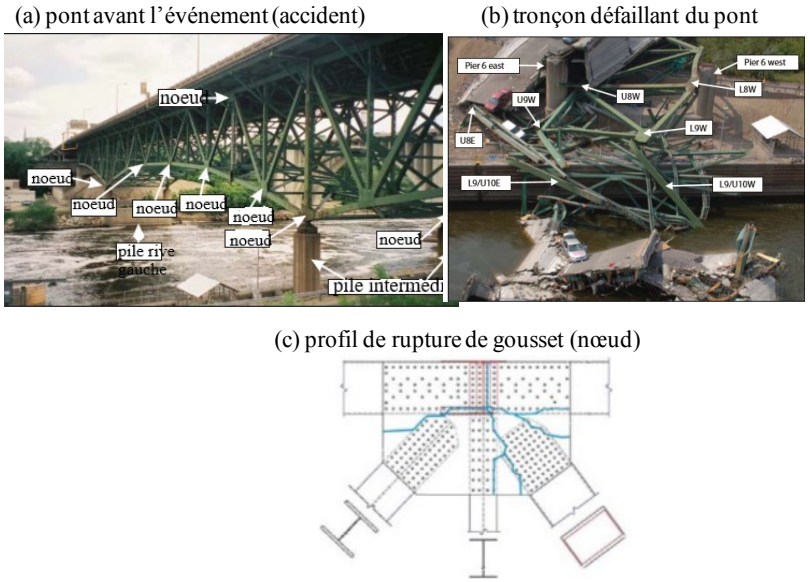


Figure 3.6 : *Extrait de détérioration/ défaillance de pont treillis*

La figure 3.6 (a) montre le pont en état de fonctionnement. La figure 3.5 (b) illustre le pont en situation de défaillance. Cette situation résultait de la rupture brutale d'un gousset d'assemblage de l'ossature en arc-treillis (fig.3.6 c), qui a également entraîné la défaillance d'autres goussets certainement affectés par une altération antérieure.

- *Cas des ponts poutres avec tablier en caisson*

Les ponts à poutres à tablier de caissons peuvent être en béton précontraint (avec précontrainte interne et/ou externe) ou en acier (structure métallique). Ce sous-type de pont à poutre présente une grande résistance à la torsion par rapport aux autres tabliers de ponts à poutres. Pour les ponts de types poutres-caissons en béton, il existe généralement deux principaux types de tablier poutres-caissons adjacents et un tablier poutres-caissons à segments. Le tablier poutres-caissons adjacent est constitué de plusieurs poutres en caisson de grande longueur alignées transversalement [CAI 11]. Ces caissons sont renforcés par des précontraintes individuelles reliées les unes aux autres par des clés de cisaillement injectées et des câbles de post-tension. Le tablier poutres-caissons segmenté est constitué de plusieurs segments alignés longitudinalement sur toute la longueur du pont. Les caissons dans ce cas sont souvent reliés par des clés de cisaillement avec une post-tension longitudinale connectés par des joints remplis d'un matériau secondaire (par exemple, l'époxy). Les clés de cisaillement et les câbles de post tension, dans les deux types de tablier, assurent la répartition

des charges de service entre les faisceaux/segments adjacents. La figure 3.7 présente un extrait de ce type de pont avec les détails constructifs de tablier : (a) illustre un type de pont poutre-caisson métallique, (b) présente une section transversale du tablier poutres-caissons en béton précontraint, (c) schématise le dispositif mécanique de renforcement des poutres-caissons avec des précontraintes et (d) illustre un dispositif constructif des poutres-caissons avec précontraintes externes.

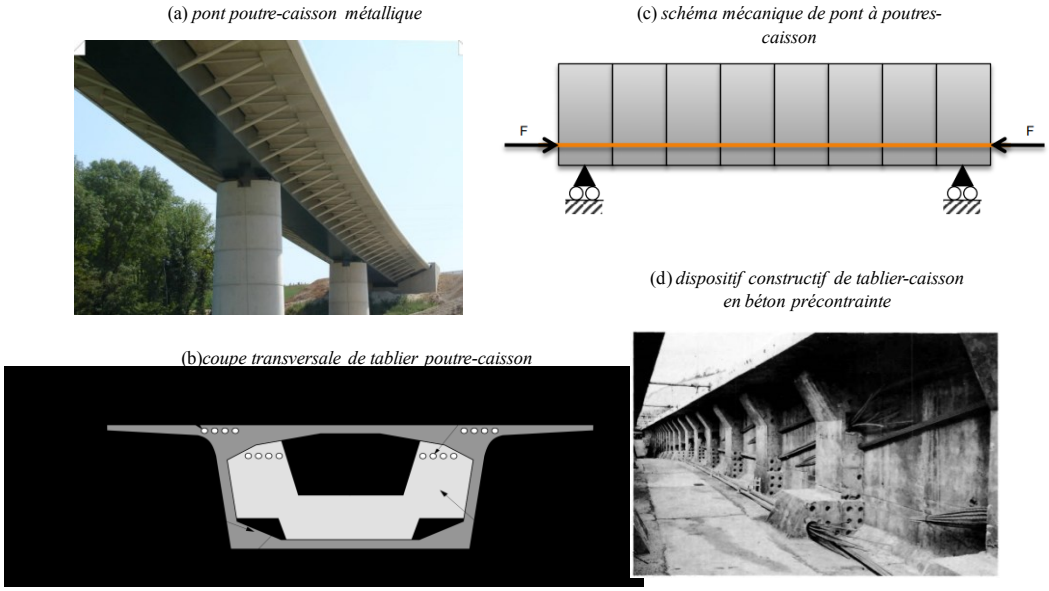


Figure 3.7 : *Illustration des détails constructifs d'un pont à poutres-caissons [MDO 05]*

Les principales détériorations dans ces deux types de tablier sont souvent facilitées par les défauts d'imperméabilité des joints entre caissons ou des câbles de précontraintes qui risquent d'exposer la structure à d'autres effets de sollicitations externes. Russell H. [RUS 09] et des experts dans le rapport technique [MDO 05] ont identifié quatre facteurs primaires conduisant à des situations de défaillances dans les ponts poutres-caissons en béton : les détails de raccordement entre caissons, l'inclinaison du tablier (caisson), le déplacement inacceptable des faisceaux dus à des contraintes excessives et la détérioration des torons de précontraintes. D'autres causes peuvent être les variations de températures, l'insuffisance de renforcement des joints, la libération prématurée des fils de précontraintes pendant le durcissement du béton, la perte de précontrainte et le retrait du béton au jeune âge. D'après [NAI 10b], la défaillance du pont I-70 survenue le 27 décembre 2005 à Washington (Pennsylvanie, USA) est le résultat d'un processus de corrosion très avancé des torons de précontraintes ayant provoqué la perte de précontrainte. Ce processus de corrosion a été occasionné par des erreurs de conception et d'exécution : (a) des fuites d'eau entre la poutre et la surface du tablier au-dessus du pont favorisées par l'absence de barrière imperméable sur le pont, (b) l'insuffisance d'enrobage révélée par l'écaillage du béton, etc. Pour le cas de tablier poutres-caissons métalliques, les principales détériorations qui conduisent à des situations de défaillances résultent souvent d'un chargement thermique trop important et des défauts d'alignement des caissons. L'illustration sur la figure 3.8 fait état d'une des défaillances de

pont à poutres-caissons métalliques survenues pendant l'exécution dans les années 1960 [BRI 09]. L'ouvrage concerné est le pont de Cleddau à Milford Haven (au pays de Galles, année 1960), pour lequel les facteurs liés à la défaillance ont été les erreurs dans la prise de décision.



Figure 3.8 : *Extrait de défaillance d'un pont à poutres-caissons [BRI 09]*

La défaillance enregistrée sur ce pont (fig.3.8) correspondait à une déformation excessive de type flambage du diaphragme au-dessus des poutres (caissons à porte-à-faux). Les erreurs de conception ont été révélées par la faible épaisseur de la poutre de tablier.

- *Pont à poutre-mixte (de type bipoutres)*

L'ossature porteuse d'un tablier de pont à poutres-mixte est constituée d'une poutre-dalle dans laquelle les deux composants d'assemblage se partagent les fonctions à assurer. Une dalle supérieure dite « de compression » assure la couverture des poutres et fonctionne en compression, la structure inférieure de poutraison fonctionne en flexion. Cette dernière est souvent constituée de poutres principales (ou maîtresses) dans la direction longitudinale, complétées par des poutres secondaires (dites aussi entretoises) qui assurent la stabilité des poutres maîtresses. La figure 3.9 présente un exemple de pont à poutres-mixtes (pont du Djoué, Congo).

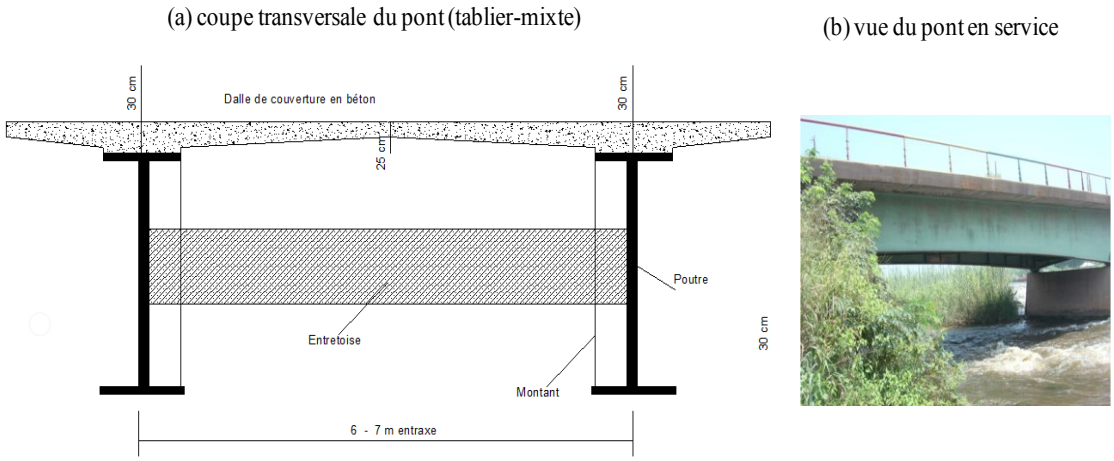
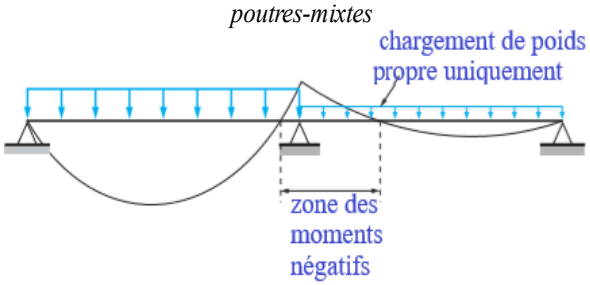


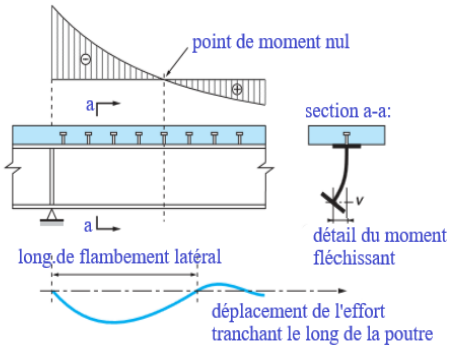
Figure 3.9 : *Illustration d'un type constructif de pont à poutres-mixtes*

La figure 3.9 (a) illustre la coupe de la structure du tablier mixte du pont et la figure 3.9(b) montre une vue du pont en service. L'un des principaux défauts dans ce sous-type de pont à poutres, est la perte de résistance au déversement des profilés d'acier comme nous pouvons le voir sur la figure 3.10 (a, b, c).

(a) *Comportement mécaniquement de pont à poutres-mixtes*



(b) *diagramme de moment (chargement)*



(c) détérioration/défaillance dalle tablier mixte pont Djiri 2 (-06/2013)



(d) fissuration de la partie inférieure (liaison culée/dalle)



Figure 3.10 : *Illustration des défauts de pont à poutres-mixtes*

Comme exposé précédemment, un pont à poutres-mixtes peut être dans une situation de défaillance suite à la perte de stabilité des profilés métalliques (poutres maîtresses). Cette situation peut survenir en cas d'application de combinaison défavorable de charges variables d'exploitation à une travée sur deux dans la zone dite de moment négatif, c'est-à-dire de part et d'autre d'un appui intermédiaire (fig.3.9a). Le résultat de cette combinaison défavorable de charges se traduit par une déformation latérale (flambement) de la semelle inférieure de la poutre maîtresse (profilé). Dans ce cas, le maintien apporté par la dalle de compression entraînera une distorsion de la section métallique de l'ensemble du profilé (fig.3.9b) [ARI 04].

Ce défaut peut se manifester en particulier dans les tabliers à poutres continues ou avec une poutre en porte-à-faux pour deux raisons : la mauvaise répartition des efforts due au non-respect du profil de la voie de circulation sur le pont (erreur de conception et d'exécution), et l'insuffisance de la liaison assurant la collaboration entre les profilés métalliques et la dalle en béton (défaut d'adhérence, inserts insuffisants...).

Un cas typique de défaillance est celle du pont Jiri 2 (juin 2013, Congo), survenue 3 ans après la mise en service. D'après l'enquête des services du ministère des travaux publics, la défaillance sur cet ouvrage est due aux erreurs d'exécution. Ces erreurs relevaient du non-respect du profil de la dalle de compression. Ce défaut, associé à la condition topographique du site (entrée du pont avec une rampe d'accès du côté de la ville de Brazzaville), a favorisé une mauvaise introduction et répartition des charges au niveau du tablier. La mauvaise répartition de ce chargement sur l'ossature du tablier se traduite par le cisaillement de la dalle supérieure au droit de la semelle supérieure de la poutre maîtresse droite (voir fig.3.10 c, d). Cette situation de défaillance relevant de la fonction de service « assurer le trafic », a eu pour conséquence l'indisponibilité de l'ouvrage pendant une durée de quatre mois pour les réparations [NDI 18].

3.2.1.3- Détériorations et défaillances de pont à câbles

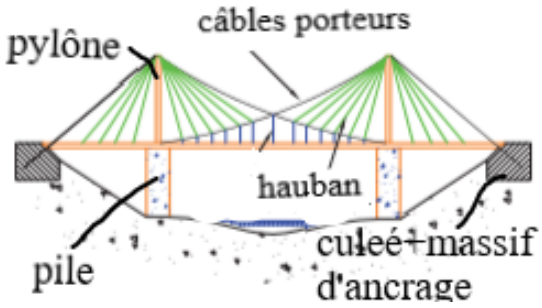
Le principe de ce type de pont est de transformer les sollicitations pour que s'exercent majoritairement des efforts de traction, repris par une suspente et/ou un ensemble de câbles porteurs. Les ponts à câbles sont des structures souples, susceptibles de se déformer suffisamment pour reporter les efforts qui leur sont appliqués à des composants possédant une meilleure aptitude à leur résister et, en définitive, à les transmettre au sol. Dans cette famille de ponts (suspendu ou à haubans), les câbles (suspente ou haubans) constituent un composant majeur, travaillant en traction pour reprendre les chargements introduits dans un tablier rigide au travers des suspentes verticales. Ces câbles prenant appui sur les têtes de pylônes/piles qui transmettent une partie des charges de la structure dans des massifs situés aux extrémités du pont.

Les pylônes/piles peuvent être en acier ou en béton, et sont soumis à d'importants efforts de compression transmis par les câbles de suspension ou les haubans. Selon le mode de fixation des câbles et du type de liaison des pieds de pylônes/pile, ces appuis peuvent également être soumis à d'autres efforts : effort transversal au point d'attache des haubans dans le cas de câbles discontinus, effort de flexion en pied dans le cas de pylônes encastrés dans un massif de sol.

Le tablier dans ce type de pont est constitué d'une ossature porteuse (rigide) empêchant la vibration du tablier sous l'effet des vents violents. Pour cette ossature de tablier, les efforts sont très largement réduits grâce à la répartition des surcharges sur l'ensemble des suspentes (câbles), ce qui assure la stabilité de la structure. Un aspect essentiel est celui des phases de construction au cours desquelles le cheminement des efforts diffère de celui qui existe dans le

pont fini [HOP 84, LCP 89]. Cependant, ce travail se focalisant sur les ponts existants, en phase de service, nous ne non développerons pas plus ce point dans cette description. La figure 3.11 illustre les types courants des ponts suspendus (a, b).

(a) illustration d'un type de pont à hauban



(b) illustration d'un type de pont suspendu à câbles

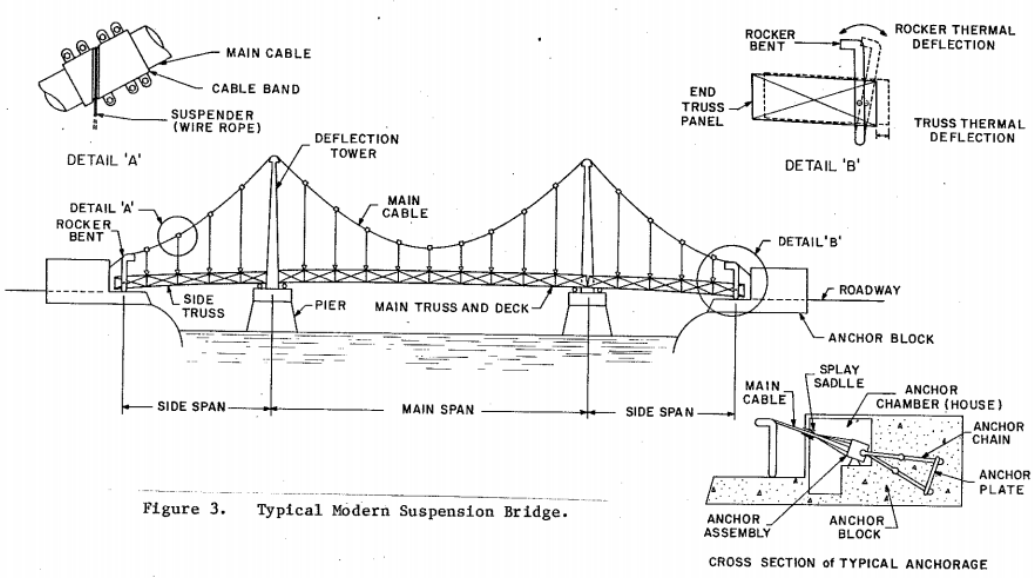


Figure 3.11 : *Illustratif du schéma de pont à câbles suspendus [LCP 89, HOP 84]*

Le principal défaut dans cette famille de ponts, est la perte possible de capacité stabilisant le pont contre les efforts trop grands de torsions qui risquent de provoquer une situation de défaillance précoce. Ce fait a été enregistré sur le pont Tacoma qui a connu une défaillance six mois après sa mise en service (01/07/1940). D'après plusieurs chercheurs, cette défaillance se traduit par un phénomène d'aéro-élasticité suite à l'introduction d'une instabilité aérodynamique dans l'ossature du tablier par l'action du vent (vitesse de 40km/h à 60km/h) [ROS 84, PET 94, FEL 97]. Un autre cas de défaillance est celui du pont Sully sur Loire le 16 juin 1985 suite à la fragilité des câbles en aciers. Ce pont construit en 1859 s'est effondré soudainement par suite de la rupture d'un étrier en barre de 50mm de diamètre supportant un

câble de suspension, qui entraîna la rupture du câble de suspension et des membrures de poutre treillis.

Cette rupture est due à la propagation du défaut de filetage d'un acier à très faible ténacité (i.e. capacité à résister à la fissuration), des défauts de tirants d'attache de câble de tête, et de la détérioration des suspentes [MAR 12]. La figure 3.12 montre un extrait de situations de défaillances sur les ponts suspendus.

(a) état du pont Loire à la défaillance (16/06/1985) (b) détails de la défaillance sur pont Loire



(c) *torsion du tablier suspendu –pont Tacoma*

(d) *défaillance totale du pont Tacoma (07/11/1940)*

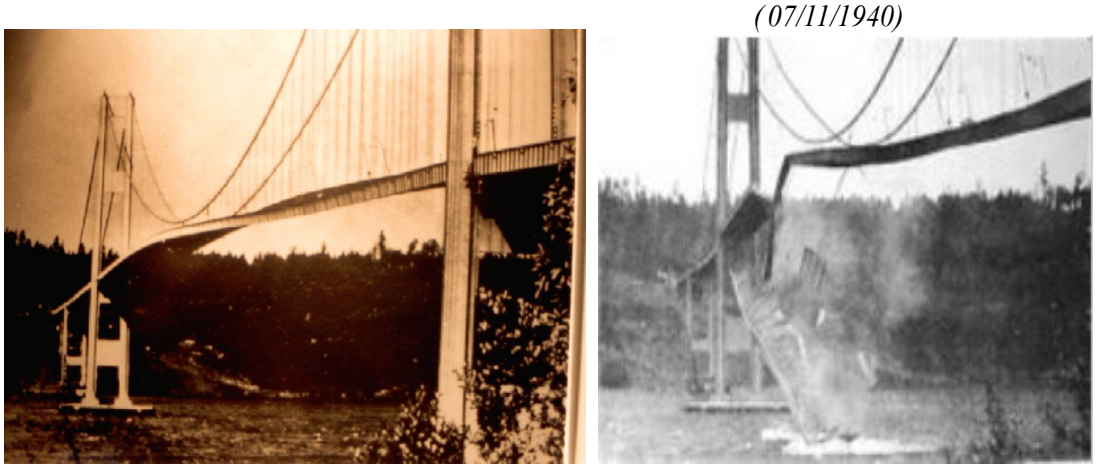


Figure 3.12 : *Extrait de cas de défaillance des ponts à câbles, (a, b) [MAR 12], (c, d) [ROS 84, PET 94, FEL 97]*

La figure 3.12 (a) présente la situation de défaillance globale du pont. La figure 3.12(b) explique les raisons de la fragilité des aciers de câbles de suspension au travers d'une courbe de variation température-capacité de l'acier. La figure 3.12 (c) montre le début de la déformation du tablier suite à l'effort du vent, et la figure 3.12 (d) illustre l'effondrement total du pont (défaillance globale).

Comme nous venons de constater par ces exemples, les sources de détérioration des ponts sont multiples. Elles concernent non seulement les défauts de la structure mécanique de

l'ouvrage, mais aussi les processus d'altération des matériaux et les conditions de terrain d'appui (§3.2.2).

3.2.2-Détériorations et défaillances des ponts suivant l'état des matériaux

Les détériorations identifiées suivant le type constructif de pont (§3.2.1), montrent qu'il existe différents processus d'altération des composants de pont liés au matériau. Suivant le matériau constructif principal (maçonnerie, bois, acier, béton…), il existe différents des processus d'altération : la corrosion (acier, béton armé), la carbonatation (béton, maçonnerie), le vieillissement naturel/usure (béton, acier, maçonnerie, bois), la pourriture (bois), les altérations physico-chimiques (maçonnerie)... En ce qui concerne les matériaux constructifs secondaires (composite, bitume…) les principaux processus d'altération concernent l'orniérage et l'usure. Pour les sols de terrain d'appui, les processus d'altération concernent l'érosion externe des berges ou des piles en rivière (affouillement) et l'érosion interne des berges de culées [HON 12, AND 15].

Ces processus une fois activé, et associés à d'autres facteurs de l'environnement conduisent à la diminution voire la perte de performances des ouvrages (fonction). Ces processus, une fois activés et associés à d'autres facteurs de l'environnement conduisent à la diminution voire à la perte de performances des composants et des ouvrages (fonction). Suivant le type de matériau (ce qui inclut ses propriétés) et l'agressivité de l'environnement (air, rivière, trafic…), un processus d'altération peut se propager en quatre étapes qui s'observent par des symptômes visibles jusqu'à la diminution complète de la performance [TUU 82, SIL 04,BIE 07] : faible altération (fissuration), altération modérée (éclatement…), altération alarmante (diminution de l'épaisseur ou de la section du composant), altération critique (déformation permanente ou excessive). Pour les cas de défaillances explicitées précédemment (fig.3.4, fig.3.6b, fig.3.12a/b), nous pouvons estimer que les composants de ces ponts étaient déjà dans un état d'altération allant du niveau alarmant à critique au moment de la défaillance. Les processus d'altération concernés ont été, la corrosion (fig.3.6b, fig.3.12a/b) et l'affouillement (fig.3.4). Pour une description plus détaillée sur la manifestation d'un processus d'altération des matériaux de génie civil (phase d'initiation, phase de propagation), le lecteur pourra consulter les détails dans [TUU82, BIE 07, HON 12].

L'intérêt de la description des informations des parties (§3.2.1, §3.2.2) est illustré à l'étape de formalisation (§3.3). Dans ce qui suit (§3.2.3), notre objectif va être de constituer une base des défaillances des ponts en milieu tropical. Nous allons nous appuyer sur la pratique de l'ingénierie forensique pour faire une analyse statistique des cas observés afin de les documenter au mieux et les intégrer dans la modélisation.

3.2.3- Base statistique des détériorations des ponts en milieu tropical

Le recueil d'informations sur les altérations des ponts existants suivant le type constructif et le matériau principal a permis d'identifier les sources et les types de défaillances prédominantes pour chaque famille de pont (§3.2.1, §3.2.2). Le prototype d'illustration de la

base de cas des détériorations/défauts de ponts en milieu tropical sous forme de tableau (Rex, tab.3.4, §3.2.2.3.3) a été élaboré à partir de quatre sources d'informations : les rapports techniques sur les études de cas, les bases de données mondiales et régionales (par exemple, MRGenCi), la presse locale[13] et les journaux sur internet[14] (voir §3.1.3). Dans une première étape, en tant que preuve de concept, seuls 50 cas de défaillance ont été analysés. Le processus de collecte d'informations a consisté en deux phases : identification des cas, traitement des données.

La phase d'identification a consisté en la reconnaissance des cas (12 cas) au niveau national du Congo, et dans d'autres pays tropicaux (au niveau sous régional : Cameroun, Congo RDC, Madagascar, Nigeria et mondial : Inde, Haïti, Vietnam). Le tableau 3.3 présente les statistiques des 50 cas sélectionnés (§3.2.3.1).

La phase de traitement de données a consisté à faire une sélection de cas afin de retenir ceux suffisamment documentés. C'est le cas par exemple, des détériorations/défauts dont les sources potentielles ne sont pas documentées. Les 50 cas sélectionnés ont ensuite été traités en référençant pour chaque cas six types de données : lieu, nature du pont (type constructif, matériau), dates, phase du cycle de vie de l'ouvrage, constats (sources primaires de détérioration, niveau/ampleur de défaillance, les conséquences enregistres en termes de pertes humaines, matérielles…), source de l'information. Pour la documentation finale de la base de cas (tableau 3.5, §3.2.3.3), nous avons trouvé intéressant d'avoir un format simplifié qui permet une meilleure lisibilité en intégrant le champ « source d'information » dans celui de « nature d'ouvrages ». La notion de pertes humaines n'étant pas au cœur de notre modélisation, nous ne préconisons pas de détailler la classification suivant ce critère. La phase du cycle de vie n'est pas également prise en compte dans le prototype de la base de cas puisque notre travail se focalise uniquement sur la phase d'exploitation. Cette base de 50 cas (extrait illustré §3.2.3.3) est disponible sous forme de Rex (retour d'expérience) en annexe 2.

Nous présentons dans ce qui suit, les résultats de l'analyse statistique de ces 50 cas retenus. Les données sur ces cas sont décrites suivant cinq critères permettant d'identifier les facteurs défavorables à l'origine des défaillances : détériorations selon le type constructif, détériorations selon le matériau constitutif, détériorations par « lieu, date et mode de défaillance», détériorations suivant les sources environnementales et humaines « source physique, chimique…», et les conséquences enregistrées.

3.2.3.1- Analyse des données des détériorations suivant le type de pont

Parmi les cinquante cas de détériorations identifiées, 4% (2 cas) sont des ponts en arc, 90% (45 cas) sont des ponts à poutres (treillis, poutres-dalles, poutres-caissons), 6% (3 cas) sont des ponts suspendus (à câbles). Les situations de défaillances enregistrées pour chaque

[13] https://afrique.lalibre.be/28733/effondrement-dun-pont-reliant-la-rdc-a-louganda/
[14] http://joegoauk-pointofview.blogspot.com/2012/02/bridge-collapsed-at-codli-mines.html

famille de ponts sont proches de celles explicités au (§3.2.1) dans la description des ponts selon leur mode mécanique : perte de capacité en compression, perte de stabilité (horizontale ou verticale), perte de liaisons d'appui, perte de capacité en traction, etc. Le tableau 3.1 présente les statistiques de ces cas de détériorations et de défaillances par type constructif de pont et par pays.

Tableau 3.1 : Détériorations/ défaillances par type constructif

Pays	Pont arc	Pont poutres	Pont suspendu
Brésil	0%	8%	0%
Cameroun	0%	12%	0%
Congo	0%	20%	0%
Congo RDC	0%	8%	0%
Inde	4%	20%	0%
Madagascar	0%	6%	0%
Nigeria	0%	8%	0%
Haïti	0%	6%	0%
Vietnam	0%	2%	6%
Total	**4%**	**90%**	**6%**

Il convient de noter que les circonstances de ces défauts (détérioration /situation de défaillances) ne sont pas uniquement attribuées au mode constructif de l'ouvrage, mais aussi au type de matériau constructif utilisé. Les données par rapport à ce critère de classification (type de matériau), montrent que, 46% des cas concernent l'acier, 38% sont liés au béton (armé, précontraint), 14% sont attribués aux matériaux-mixtes (acier-béton, acier-bois), contre 2% des ponts en bois et 0% (cas) des ponts en maçonnerie. Le tableau 3.2 illustre cette répartition par pays.

Tableau 3.2 : Détériorations/ défaillances suivant le matériau constitutif

Pays	Maçonnerie	Bois	Béton	Acier	Mat. mixte
Brésil	0%	0%	4%	2%	2%
Cameroun	0%	2%	6%	4%	0%
Congo	0%	0%	2%	12%	6%
Congo RDC	0%	0%	2%	0%	6%
Inde	0%	0%	8%	16%	0%
Madagascar	0%	0%	2%	4%	0%
Nigeria	0%	0%	8%	0%	0%
Haïti	0%	0%	4%	2%	0%
Vietnam	0%	0%	2%	6%	0%
Total	**0%**	**2%**	**38%**	**46%**	**14%**

Les grandes proportions des cas liés à l'acier et au béton sur ce tableau (3.2) peuvent nous amener à attribuer l'origine de ces détériorations d'après [IMH 04], au facteur humain : insuffisance d'informations sur ces nouveaux matériaux par rapport à la maçonnerie et au bois utilisés dans les anciennes constructions. C'est le cas par exemple des défaillances totales enregistrées sur les ponts au Congo, Cameroun et au Congo RDC, pour lesquelles l'absence de

données sur les constructions n'a pas permis aux experts de mener des investigations (a priori de façon formelle).

A fins d'améliorer la modélisation et, à terme, les décisions des acteurs, les situations de défaillances sont également décrites en termes de « niveau de défaillance ». Ce terme « niveau de défaillance » qualifie une situation de défaillances en termes de degré de dommages pour le composant ou l'ouvrage détérioré. Une défaillance totale correspond au fait qu'un ou plusieurs composants structurels sont détériorés ou effondrés rendant la structure incapable de rester en service ou nécessitant un remplacement (global). C'est le cas du pont Mouyondzi (Congo), du pont Lubiriha au Congo RDC, du pont Ghneh (Vietnam), du pont Akapa-Nike (Nigéria), du pont Jhua (Inde), etc. Une défaillance partielle couvre les composants ou les ouvrages détériorés et ayant perdu une des fonctions prévues, mais qui restent néanmoins en service. C'est le cas de l'échantillon des ponts exploités dans le contexte local du Congo (chapitre 1, §1.2). Le tableau 3.3 donne la répartition du nombre de cas de détérioration par pays, suivant la phase de vie de l'ouvrage et suivant le degré de défaillances.

Tableau 3.3 : Statistique des détériorations des 50 cas de ponts

Pays	Période de	Phase de vie de l'ouvrage		Niveau de défaillances	
	détérioration	exécution	exploitation	défaillance partielle	défaillance totale
Brésil	2007-2014	1	3	2	2
Cameroun	2004-2017	0	6	1	5
Congo	2009-2018	0	10	7	3
Congo RDC	2015-2017	0	4	1	3
Inde	1991-2018	0	12	4	8
Madagascar	2012-2018	0	3	0	3
Nigeria	2012-2017	0	4	0	4
Haïti	2008-2018	0	3	1	2
Vietnam	2007-2017	1	3	1	3
Total		**2**	**48**	**17**	**33**

Les statistiques indicatives données dans le tableau 3.3, montrent que les situations de défaillances les plus fréquentes sont en phase d'exploitation des ponts (96%), tandis que 4% sont en phase de construction. Suivant la littérature scientifique et l'expertise (§3.1.3 ; 3.2.3), cela pourrait s'expliquer en partie par le nombre important des ponts en cours de détérioration et d'exploitation sans entretien adéquat dans certains pays en tropicaux, a priori par manque d'informations et des contraintes budgétaires. Par rapport à nos critères de classification (§3.2.3), la grande proportion des défaillances en phase d'exploitation renforce les conclusions d'autres recherches disponibles à ce sujet. Par exemple, dans la base de D. Imhof [IMH 04], la proportion des défaillances des ponts en phase d'exploitation représente 68% contre 32% pendant la construction. L'intérêt de la modélisation Br3KM qui s'intéresse à la quantification des états de ponts mal documentés paraît donc justifiable dans ce contexte spécifique des pays tropicaux. Le paragraphe §3.2.3.2 donne les détails sur les sources de détériorations et de défaillances des ponts dans les neuf pays tropicaux (tab.3.1) : conditions climatiques, effets de l'environnement, pratiques de construction et d'exploitation, niveau ou ampleur de défaillance…

3.2.3.2- Sources des défaillances sur les ponts en milieu tropical

Les causes de défaillances dans cette description sont réparties en processus d'altération de matériaux (corrosion, affouillement, vieillissement naturel/usure, pourriture, érosion interne), erreurs humaines (surcharges, défaut conception, insuffisance d'entretien), facteurs extrêmes (inondation, collision, vent violent, séisme, vandalisme, feu). Nous signalons aussi le fait que pour la majorité des cas identifiés, les erreurs humaines sont dues aux connaissances limitées sur les modes de construction et sur les matériaux (béton ou acier) et à l'insuffisance de communication (voir chapitre 1 « §1.2 », chapitre 2 « §2.1 »). La connaissance limitée sur les matériaux se réfère à leurs propriétés, voire à l'évolution de leurs capacités au cours du temps. Par exemple, les joints de dilatation dans un pont poutres-caissons (en béton précontraint ou en acier), s'ils sont mal exécutés ou peu entretenus, peuvent permettre l'introduction d'eau sous la structure. La conséquence de l'action de cette eau dans la structure étant l'accélération d'un processus de corrosion s'il a été déjà actif [TUU 82]. Parmi les 50 cas identifiés, l'examen statistique montre que les détériorations potentielles pour cet échantillon de ponts en milieu tropical sont en grande majorité liées à différents facteurs défavorables : les processus d'altération des matériaux (58%), devant les erreurs humaines (22%) et les facteurs extrêmes (20%). La figure 3.13 illustre cette description de façon détaillée, (a) les causes de détérioration et (b) la répartition des situations de défaillances par degré (mode).

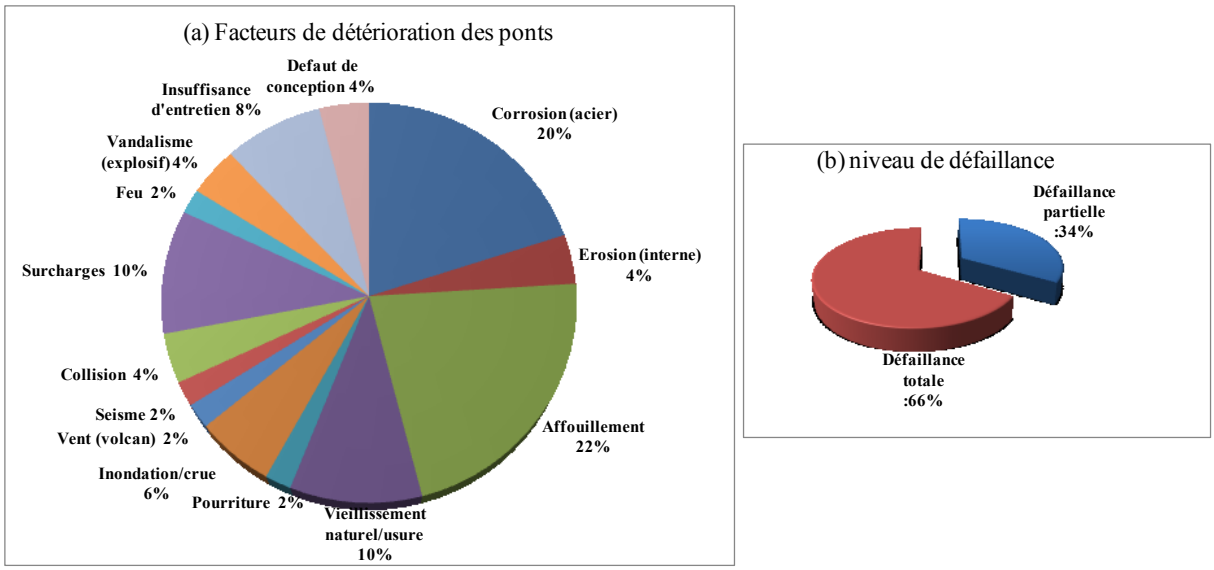


Figure 3.13 : *Facteurs primaires associés à la détérioration des ponts en milieu tropical*

Cette figure (3.13) montre une prédominance des facteurs primaires de détérioration des ponts en milieu tropical. Ces facteurs sont essentiellement liés aux effets de l'environnement local (corrosion 20%, vieillissement rapide/usure 10%, pourriture 2%, érosion interne 2%), aux effets des aléas du climat tropical (affouillement 22%), etc. Cela justifie en partie les raisons de dégradation précoce des performances de certains ouvrages d'art en milieu tropical (introduction générale, chapitre 1, §1.2).

Les facteurs ayant conduit aux situations de défaillances sont de trois natures : les causes externes (trafic, évènement météorologique…), les causes internes (condition de matériaux, état de performance…), et l'insuffisance d'informations (ce qui inclut l'insuffisance de connaissances utiles aux raisonnements, les erreurs humaines…). Dans [IMH 04], l'analyse de l'auteur pour tous les types de ponts est : aléas naturel (29%), erreurs de conception (21%), accidents (18%), surcharge (10%), erreurs humaines (10%), connaissances limitées (10%), corrosion (2%). La description que nous avons retenue regroupe sous le concept « erreur humaine » les surcharges, les connaissances limitées et les erreurs humaines. Une telle classification est essentielle pour élaborer au mieux le vocabulaire technique et faciliter par la suite la tâche de formalisation des connaissances (§3.2.4, §3.3). Au chapitre 2 (§2.5.2.2), nous avons décrit les scénarios du processus de vieillissement naturel faisant passer le système d'ouvrage, d'un état initial à un état final ou intermédiaire. Dans l'application de la modélisation Br3KM au chapitre 4, il sera exposé la manière dont les simulations numériques décrivent les processus potentiels d'altération identifiés dans cette analyse statistique (corrosion, affouillement des berges). Comme nous venons de constater à partir des statistiques présentées, l'absence des mesures d'anticipation des détériorations s'est traduite par des défaillances enregistrées. Ces défaillances se sont matérialisées par diverses conséquences en termes de dommages de structure, de décès/blessures et des coûts d'exploitation.

3.2.3.3- Illustration des conséquences des défaillances sur les ponts en milieu tropical

Les conséquences d'une défaillance ont été indiquées comme l'un des indicateurs de prise de décision, pour l'amélioration des pratiques (conception, exécution) et pour l'apprentissage. Elles sont essentielles d'après plusieurs chercheurs, pour l'évaluation qualitative et quantitative en ingénierie forensique [BRE 14, BOL 09]. La quantification des coûts de réparation et des décès/blessures n'est pas abordée dans le cadre de la thèse en raison de l'insuffisance d'informations. Aussi, pour des soucis de qualités d'images, nous illustrons cinq cas d'identification des ponts en situations de défaillance (figure 3.14, fig.3.15). Pour le reste des cas, les images sont consultables dans les journaux indiqués (pour certains cas mis en ligne, voir § 3.1.3, §3.2.3 et Rex en annexe 1).

Cas n°1: pont Jhua (Inde, 11/08/2007) Cas n°2: pont Montrouis (Haïti, 06/08/2007)



Figure 3.14 : *des défaillances causées par l'affouillement et détériorations*

Cas n°3: pont Mouyondzi (Congo, 21/04/2012)



Cas n°4: pont Lubiriha (Congo RDC, 12/2018)



Cas n°5: pont Da Dang (Vietnam, 26/06/2009)



Figure 3.15 : *Des défaillances causées par la corrosion, la collision/surcharges*

Les constats sur les huit cas illustrés en figure 3.14 permettent de tirer les leçons suivantes :

Pour les cas 1et 2(fig.3.14), le processus d'affouillement et l'insuffisance d'entretien ont été identifiés comme les sources primaires ayant provoquées les situations de défaillances enregistrées sur ces ponts illustrés. Les conséquences sur ces deux cas ont été la perte (cas n°1) ou la mise en indisponibilité (cas n°2) d'ouvrages. Contrairement aux cas 1 et 2, les défaillances sur les ponts des cas 3, 4 et 5 (fig.3.15) ont été principalement provoquées par les collisions, les surcharges associées à des processus de corrosion déjà actifs sur la structure. D'autres facteurs tels que l'insuffisance d'entretien ont été cités comme des facteurs contribuant au processus d'altération (corrosion).

Pour le cas n°3, il s'agit d'un pont à poutre en acier, construit en 1967 pour connecter la gare Bouansa (ancienne le Bris). La défaillance (ici un effondrement) de cet ouvrage s'est produite soudainement le 24 avril 2012 suite à la collision d'un camion sur les éléments métalliques. Le processus de corrosion et l'insuffisance d'entretien (ou de maintenance) ont été signalé comme des causes potentielles ayant contribué à la défaillance. Les dommages dues à cette défaillance ont été des pertes de vie et des blessés (5 morts, 11 blessés), des pertes matérielles (2 véhicules entraînés dans la rivière) et la perte de l'ouvrage. Le cas n°4 représente un pont en acier avec platelage en bois. Cet ouvrage très sollicité reliait l'Est du Congo RDC à l'Ouganda. Les facteurs identifiés comme les causes primaires de défaillances sont un processus de corrosion avancée associé à l'insuffisance d'entretien, qui à la suite d'une surcharge de camion, ont entraîné la défaillance du pont. Les dommages relevés, comme on peut le voir sur les figures 3.14 (cas 1) et 3.15 (cas 3, 4 et 5), sont les pertes de l'ouvrage

(tablier), matérielles (camion). Cela a conduit à la mise en indisponibilité de l'ouvrage au trafic. Le cas n°5 est un pont en acier (métallique suspendu sur des appuis courants) pour lequel la défaillance a été provoquée par la combinaison d'un processus de corrosion avancée des composants, de l'insuffisance de l'entretien et d'une surcharge du camion. Les dommages quantifiés ont été la perte de vie (9 décès), la perte du tablier (rupture) et du camion.

La discussion précédente met en évidence l'hypothèse selon laquelle, les ouvrages de génie civil, suivant leur matériau constitutif et les conditions de l'environnement local (trafic, évènement météorologique…) peuvent être exposés à des processus d'altération similaires [BRI 05]. Le tableau 3.4 illustre l'extrait du Rex des cas de détérioration/défaillances des ponts en milieu tropical construite à partir des cas investigués.

Tableau 3.4 : Extrait du Rex sur les cas de défaillances des ponts en milieu tropical

Description du pont		**Date**	**Constats**	
Pays	**type constructif / matériau**		**causes primaires**	**défaillances**
Cameroun	Pont métallique (Matomb) 1*	21/10/2016	Vieillissement/ Affouillement/ Insuffisance d'entretien	Effondrement global : Structure emportée par les eaux Effondrement global du tablier : Rupture de tablier.
Congo	Pont à poutres treillis (Mouyondzi) 2*	21/04/2012	Collision de camion/corrosion/ Insuffisance d'entretien	Basculement de la charpente supérieure, Tassement différentiel des appuis. (5morts, 11bessés, perte de la structure)
Congo RDC	Pont mixte acier-bois (Lubiriha) 3*	01/12/2018	Vieillissement/ surcharges/vent/ Insuffisance d'entretien	Effondrement total (perte de l'ouvrage) Basculement du tablier et des appuis Effondrement global.
Inde	Pont en arc de béton (Jhua) 4*	11/08/2007	Affouillement en rivière/ Insuffisance d'entretien	Perte des tronçons de tablier (= travées)*
Vietnam	Pont à câbles métallique (DA Dang) 5*	27/06/2009	Surcharge camion Corrosion Insuffisance d'entretien	Effondrement global : Rupture du tablier Rupture des câbles de Suspension Bilan : 09 morts.

*** travée** : tronçon d'un pont assurant la liaison de tablier entre deux appuis (pour les ponts à poutres et suspendus, on parlera d'arche pour les ponts en arc).

1*…5* : références web disponibles dans le Rex complet en annexe 2.

Les données de cette analyse statistiques des détériorations/défaillances de ponts vont être valorisées dans les étapes d'élaboration du vocabulaire et de formalisation de

connaissances. Cela permet de mettre en exergue notre démarche holistique pour l'analyse de défaillance par la mobilisation de plusieurs outils techniques : cas de la pratique d'ingénierie forensique mise en œuvre dans cette partie.

En raison du caractère hétérogène des informations sur les défaillances, provenant de plusieurs sources (§3.2), leur traitement sémantique est nécessaire pour développer notre modélisation. L'homogénéisation du vocabulaire est un préambule à la construction du modèle de connaissance. Dans le paragraphe suivant nous allons procéder à la définition et la structuration du vocabulaire du domaine de manière à sélectionner les termes nécessaires à la modélisation.

3.2.4-Bilan du vocabulaire des connaissances

Pour pallier les limites sémantiques des informations obtenues (par exemple lié à l'ambigüité sémantique des termes), ce vocabulaire permet d'établir un lexique des connaissances en langage naturel afin de faciliter leurs formalisation (voir étape 2, chapitre 2 §2.4.2). Ce vocabulaire s'appuie sur les principes de construction d'Ontologie de domaine [OLS 95]. L'élaboration du vocabulaire repose sur une démarche en cinq sous étapes : établir une liste des termes pertinents par sous-domaine, opérer le choix des principaux concepts, puis les ordonner en catégories ou groupes de concepts, construire l'architecture du lexique (format), compléter le lexique avec d'autres sources de connaissances si nécessaire.

3.2.4.1- Liste des principaux termes par sous-domaine

Les informations issues des investigations sur les défaillances des ponts en milieu tropical (50 cas) ainsi que des ponts de manière générale, sont regroupées suivant la nature des sous-domaines explicités (tableau 3.5). Cette liste sert d'illustration de quelques termes retenus (liste non exhaustive). Les termes listés vont être exploités pour l'étape d'ordonnancement des concepts (tableau 3.6).

Par exemple, dans la catégorie des termes « matériau », « propriété de matériau » est spécifiée par : résistance mécanique en compression, en traction, en flexion, et au cisaillement, densité maximale sèche, capacité portante de sol. La force limite caractérise la valeur admissible d'une propriété de matériau qualifiant sa qualité en construction (par exemple, la résistance caractéristique en compression pour un béton C25 à 28 jours « Rc28 = 25 MPa ») [AFN 04].

Pour un sol (géotechnique), dans le cas de remblai d'accès au pont (ou de chaussée), la propriété de matériau est décrite par : densité, poids volumique humide, densité sèche maximale Proctor, cohésion, angle de frottement interne, perméabilité (k), etc.

En pratique, le terme « force limite » décrit l'aptitude d'un matériau à contribuer aux performances des composants d'un ouvrage. Ce terme listé dans le sous-domaine D2 permet de faire la corrélation entre les sous-domaines D2 et D3 dans la modélisation.

Tableau 3.5 : Regroupement d'informations par sous-domaine (§3.1.2)

D2 : Science des matériaux	**D1 :Sc. méca/technologie**	**D6 : Environnement**
1. matériau	1. ouvrage d'art	1. environnement
2. propriété de matériau	2. pont	2. rivière
3. résistance mécanique	3. procédure	3. trafic
4. béton	5. exécution	4. air
5. bois	6. câbles	5. surcharge
6. maçonnerie	7. hauban	6. chargement
7. acier	8. composant	7. Facteur extrême
8. sol	9. appuis	8. agressivité
9. force limite	10. géométrie	**D7 : Inspection/monitoring**
10. qualité de matériau	11. qualité technique	1. processus d'altération
D3 : Evaluation sûreté	**D4 : Ingénierie forensique**	2. affouillement
1. performance	1. situation de défaillance	3. vieillissement
2. stabilité	2. perte de stabilité	4. corrosion
3. fonction	3. rupture	5. symptôme
4. capacité portante	4. basculement de tablier	6. durabilité
5. état limite	5. mode de défaillance	**D5 : gestion/maintenance**
6. résister en traction	6. défaut	1. maintenance
7. niveau performance	7. dommage	2. erreurs humaines
8. aptitude de sécurité	8. déformation latérale	3. Ressources
9. résister en compression	9. perte de précontrainte	4. réparation
…	…	…

Pour organiser les termes, nous avons fixé deux critères de choix de concept :

- un terme est déclaré concept au premier niveau quand il admet au moins un concept plus spécifique au niveau suivant. Par exemple, « Matériau » va être sélectionné comme concept de base pour décrire le sous-domaine « D2 » au premier niveau, et « bétons, bois, acier, maçonnerie » au niveau suivant.
- un terme est déclaré sous concept (cible) du concept de base s'il permet de structurer de formaliser au moins un Fait initial dans un sous-domaine d'étude. Par exemple, le terme « Propriété de Matériau » va être sélectionné comme sous-concept cible pour le Fait que la qualité d'un matériau est qualifiée par sa propriété.

La sélection des termes listés (tableau 3.5) consiste en des raisonnements basés sur des hypothèses structurées par des règles génériques. Les règles R3.1 et R3.2 illustrent de quelle

manière ces raisonnements conduisent à un choix pertinent de concepts, qui sont ensuite organisés dans une table formalisée (tableau 3.6).

Règle.3.1 : règle qualifiant un terme en concept de base

Si B et b = deux termes définis sur un même vocabulaire Et si b = renseigne la nature de B, Alors B (et b) est décrit par un terme C qui le qualifie.

Sur la base des exemples de la discussion ci-dessus, l'application de cette règle pour le terme « Matériau » donne le résultat illustré sur la figure 3.16.

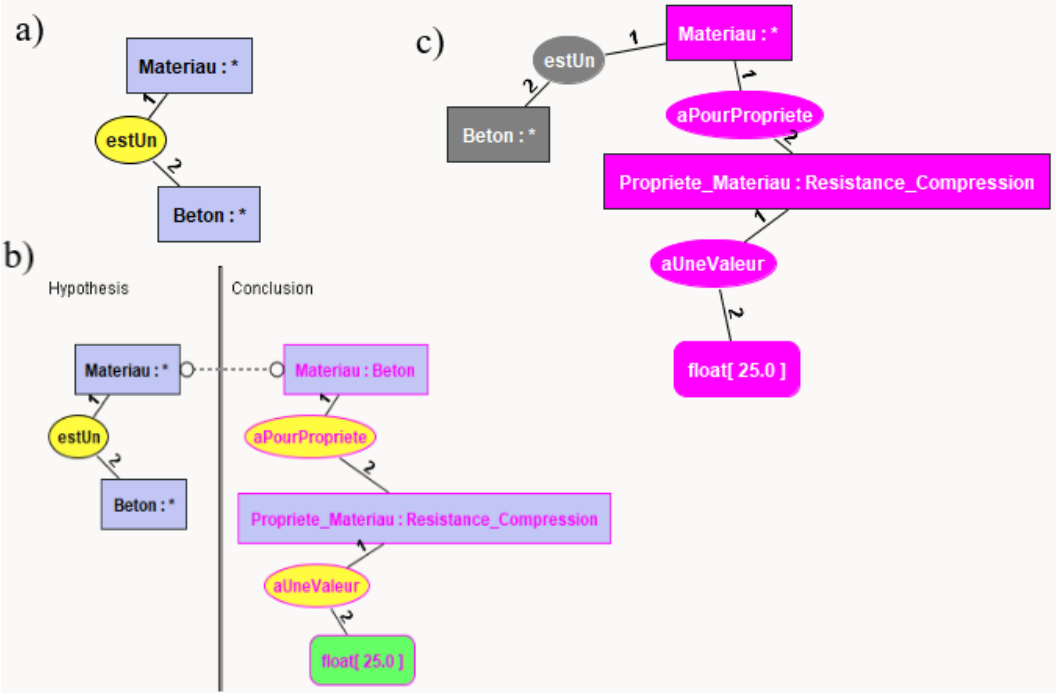


Figure 3.16 : *Graphe de sélection de concept de base, (a) fait initial, (b) règle, (c) fait spécifique*

Le cadre de raisonnement illustré (fig.3.16) formalise la procédure proposée pour la sélection des concepts de base relatifs à la modélisation Br3KM. Le graphe (fig.3.16c) signifie qu'un matériau (i.e. béton) est décrit par la résistance caractéristique en compression de référence (Rc_{28} = 25MPa) permettant sa qualification comme matériau de construction [AFN 04]. Ce graphe (fig.3.16) confirme la sélection du terme « Matériau » comme concept de base du sous-domaine (D2).

Le raisonnement suivant explicite par quelle hypothèse nous avons sélectionné le terme «Système d'ouvrages d'art » comme concept général de base pour décrire le domaine de connaissances des ponts.

Soit (B), « ouvrage d'art » représentant un système de génie civil conçu pour assumer des fonctions. Et (b), « pont » ou « tunnel », un système de génie civil qui doit assurer la fonction de franchissement d'obstacles. L'interprétation sémantique de ces deux définitions révèle :

- d'une part, B et b sont des termes décrits par deux autres termes distincts « système de génie civil, fonction », et
- d'autre part le fait que la notion de système de génie civil est spécialisée dans b par la fonction franchir l'obstacle, alors que dans B cette notion est décrite de façon générale. La figure 3.17 est un ensemble des graphes qui structurent le raisonnement explicité.

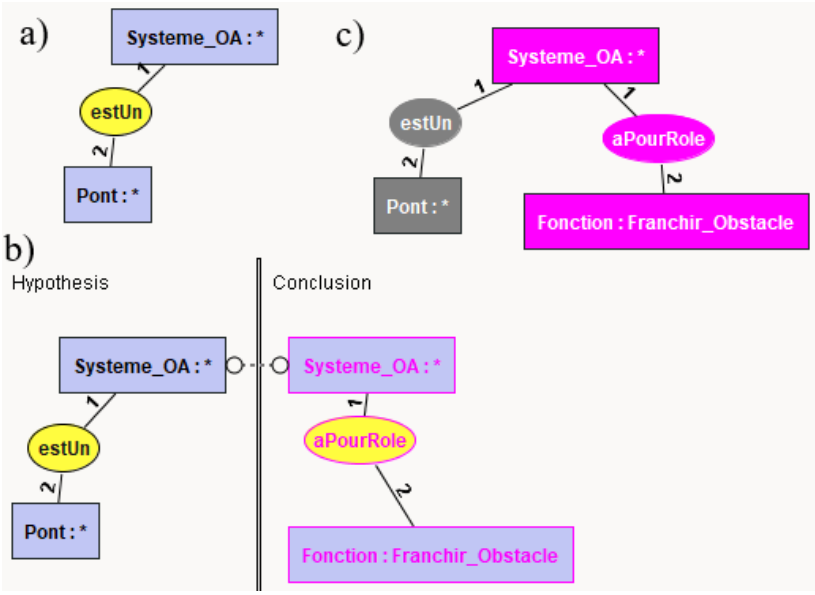


Figure 3.17 : *Graphe pour illustrer le choix du concept général, système d'ouvrage*

La figure 3.17 (c) explicite le fait qu'un système d'ouvrage d'art de type pont est conçu pour assumer la fonction du franchissement d'obstacle. Le graphe sur la figure 3.17 (c) décrit le terme « système d'ouvrage » sur deux niveaux de description, où le niveau 0 correspond à « Système d'ouvrage d'art »(Pont) et le niveau 1à «Fonction » (Franchir l'obstacle). Sur la base des illustrations (fig.3.14 et 3.15), dans cette modélisation, nous considérons deux catégories de concepts génériques : concept générique source (exemple, système d'ouvrage) et concept générique cible (exemple, composant). Le concept générique source décrit le domaine d'étude à un niveau supérieur (i.e. niveau général) par rapport au concept générique cible qui le décrit à un niveau inférieur ou intermédiaire (i.e. niveau détaillé). Afin de prendre en compte l'évolution et la réutilisation de la modélisation Br3KM, le terme « système d'ouvrages d'art » est considéré comme un concept générique type (Système_OA) représentant tout ouvrage de génie civil (pont, tunnel, barrage…) au niveau zéro de description (échelle macro) du modèle

(M1). Br3KM est l'acronyme de « Modèle de connaissances pour les pratiques d'exploitation en trois dimensions des ponts en pays tropicaux ».

Les illustrations des figures 3.16 et 3.17 mettent en évidence la procédure de traitement des termes regroupés (tableau3.5). Huit principaux concepts génériques sont déterminés sur la base de ce traitement pour décrire le domaine d'étude à différents niveaux de modélisation (fig.3.18). Les autres termes (tableau 3.5) décrivant le domaine d'étude de manière détaillée dans chaque niveau de modélisation, sont regroupés par le terme « Autres Concepts » (voir tableau 3.7). Cette description va être explicitée en détail à l'étape de structuration des connaissances du domaine (§3.3).

Le tableau 3.6 illustre un extrait de structuration des principaux concepts de base et le tableau 3.7 présente un extrait d'autres concepts non retenus comme concepts de base.

Tableau 3.6 : Regroupement des concepts par sous-domaine

Désignation des domaines		**Concept générique**	**Sous concept**
domaine général	Br3KM	Système_OA	pont
sous-domaine	D1	Composant	tablier arqué
			câble porteur
	D2	Materiau	béton
			acier
	D4	Situation de défaillance	perte de stabilité au glissement
			rupture de câble
	D5	Activité	exécution
			maintenance
	…	…	…

Tableau 3.7 : Regroupement de concepts selon la position dans la modélisation

Concepts générique (source)	Concept générique (cible)	individu
Système_OA	Fonction	assurer _continuité
	Propriété_Ouvrage	nombre_travée
Composant	Fonction	résister en flexion
	Matériau	béton
	Propriété_Composant	épaisseur _tablier
Fonction	Performance	stabilité horizontale
	Niveau_Performance	coefficient_ sécurité
…	…	…

Sur la base de ces concepts, nous avons élaboré un format de vocabulaire de connaissances du domaine. L'architecture du format de ce vocabulaire (lexique) est issue de la méthode *Methontology (*chapitre 1, §1.5.1.4). Le tableau 3.8 illustre un extrait du vocabulaire des huit principaux concepts décrivant le domaine à l'échelle macro. Le lexique complet est disponible dans l'annexe 3.

Tableau 3.8 : Extrait du lexique des connaissances de l'ingénierie des ponts

n°1	**Concept**	**définition**
1	Système d'ouvrage d'art	est une combinaison de composants en interaction qui satisfont des fonctions spécifiques avec un niveau de performance requis
2	Composant	est une partie (ou un sous-système) qui en interaction avec d'autres, forme un système pour assurer des fonctions spécifiques
3	Matériau	est une substance représentant la matière physique d'un composant (ou de système), qui constitue ses performances
4	Fonction	est ce qu'un système ou un composant doit satisfaire en respectant une exigence de performance donnée
5	Activité	est un ensemble coordonné de tâches réalisées durant le cycle de vie d'un ouvrage (conception, construction, maintenance)
6	Environnement	est ce qui est externe au système étudié, mais peut changer son état
7	Situation de défaillance	est une situation dans laquelle un système ou un composant perd sa fonction prévue en raison d'un niveau de performance insatisfaisant
8	Processus d'altération	est un processus qui peut affecter un composant, et conduit à une situation de défaillances

A l'issue du traitement de ces connaissances provenant de la pratique d'ingénierie forensique et mécanique (§3.2.1, §3.2.3), il ressort que les connaissances de certains sous-domaines tels que, D1 (composant), D3 (Fonction)…sont incomplètes. Dans ce qui suit, nous présentons les connaissances complémentaires acquises par la pratique de l'analyse de systèmes pour les sous-domaines D1 et D3.

3.2.4.2- Connaissances complémentaires des fonctions et composants des ponts

Comme vu au paragraphe (§3.2.1), l'application des méthodes de l'analyse de système (chapitre 1, §1.4.1.1) a permis d'identifier les fonctions que doivent satisfaire un pont et ses composants. La figure 3.16 illustre un schéma typique de description structurale d'un pont. Les éléments verticaux portant les numéros 2 et 3, sont des appuis avec leurs différentes parties, ce qui inclut les fondations et les appareils d'appui. Ils sont protégés de part et d'autre par un massif de sol d'appui (i.e. terrain d'approche). Les éléments horizontaux (n°1) sont les parties supérieures d'un ouvrage (tablier, poutre, câble de suspente, hauban, structure de voie…).

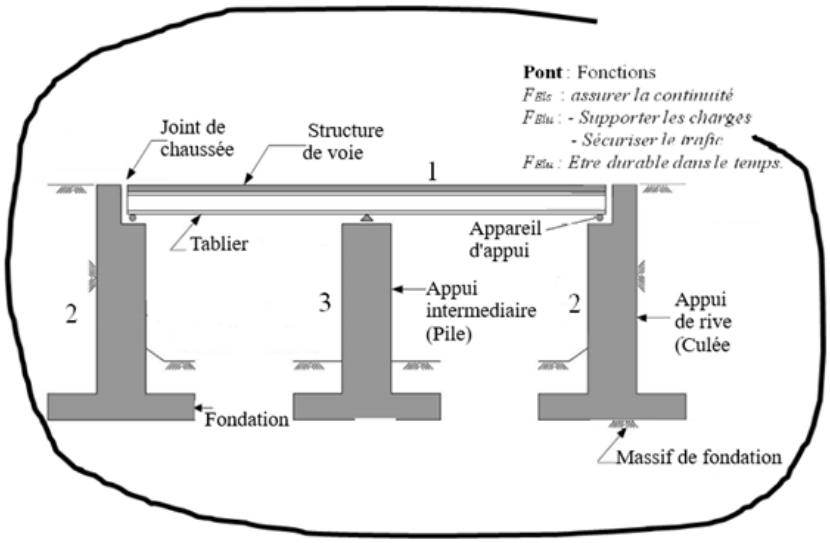


Figure 3.18 : *Illustration de notre vision de description schématique d'un pont typique*

Sur la base de cette description et des travaux disponibles sur la modélisation des ponts, nous proposons une décomposition générique, potentiellement extensible à tout ouvrage de génie civil [CHE 05, EL-T 02, MEM 02, SID 17, MOR 00, HAG 17]. Cette décomposition décrit le système en quatre catégories de composants qui peuvent aussi être décomposés sous forme des parties interdépendantes ou non dans une description relative à une étude précise :

- Composant primaire (= Ca) : partie majeure ou superstructure interagissant avec un composant secondaire pour décrire un système et accomplir ses fonctions (exemple, tablier, câble de suspente, hauban, ferme de poutre treillis…).
- Composant secondaire (Cb) : partie majeure ou substructure dont l'interaction avec le composant primaire permet de satisfaire aux fonctions du système (exemple, appui physique = culée, pile, pylône ; voile ; fondation…).
- Composant d'interface (Cc) : partie d'un système qui assure la liaison (assemblage ou support) de ses parties majeures pour le décrire (exemple, appareil d'appui, gousset, charnière = clef de voûte d'un pont en arc, rivet, massif de fondation, massif d'ancrage…). Le massif de fondation est considéré comme un composant d'interface dans un ouvrage, en ce sens qu'il représente l'adaptation au terrain naturel ou la partie en place d'un appui, qui encastre l'ouvrage dans le sous-sol, pour reprendre les charges du système global ; il assure l'équilibre statique de l'ouvrage au sol et sa réponse aux mouvements de terrain.

Le tableau 3.9 fournit un extrait de l'analyse fonctionnelle interne des ponts et de leurs composants, où chaque composant doit contribuer aux fonctions du système à des niveaux donnés de description. Ces fonctions sont décrites en trois classes correspondant respectivement à aux états limites ELS, ELU et ELD (cf. chapitre 1, §1.4.1.1) :

- Fonction ELS : rôle qu'un système ou un composant doit satisfaire en respectant les ELS (ELS = indice limite relatif aux déplacements…).
- Fonction ELU : rôle qu'un système ou un composant doit satisfaire en respectant les ELU (ELU = indice limite de sécurité).
- Fonction ELD : rôle qu'un système ou un composant doit satisfaire en respectant les ELD (ELD = indice limite d'état d'altération).

Tableau 3.9 : Description des fonctions de ponts et de ses composants

Description générique	**Description spécifique**	**Fonction**	
		Fonction ELS	**Fonction ELU**
Pont	Pont en arc Pont à poutres Pont suspendu	Assurer la continuité du trafic Sécuriser le trafic	Supporter les charges en compression Supporter les charges en flexion Supporter les charges en traction
Composant primaire	Tablier	Assurer le trafic Résister aux déformations excessives	Supporter les charges verticales Contribuer à la résistance au renversement
	Ossature p. tablier	Stabiliser le trafic Reporter les charges aux appuis	Résister aux charges mécaniques/physiques
	Câble de suspente	Stabiliser le tablier suspendu	Résister aux efforts de traction
	Dalle	Stabiliser le trafic	Résister aux charges mécaniques/physiques
	Structure de voie	Assurer le confort du trafic	Limiter les nuisances sonores Garantir l'adhérence du trafic Limiter les stagnations de l'eau
Composant secondaire	Appui (culée, pile)	Transmettre les efforts «N, T» au sol Assurer des déplacements acceptables	Stabiliser l'ouvrage Résister aux poussées horizontales : pressions de terres, pression de l'eau
	Fondation	Transmettre les charges au terrain	Supporter les charges de l'ouvrage Résister au mouvement de terrain/eau
Composant d'interface	Appareil d'appui	assurer les liaisons physiques	Bloquer des degrés de liberté Tolérer des déplacements Transmettre des composantes d'effort
	Gousset	Assembler les pièces de pont	Assurer la rigidité des parties en interaction
	Massif d'ancrage	Encastrer les câbles/hauban	Assurer la stabilité des câbles/haubans
	Diagonale	Assurer la liaison des membrures	Assurer la rigidité des membrures
	Massif du terrain	Assurer l'équilibre de l'ouvrage	Anticiper sur les poussées de terres
		Encastrer l'ouvrage au sous-sol	Supporter les charges de l'ouvrage global
Composant fonctionnel	Dispositif drainage	Contribuer à la protection d'ouvrage	Drainer les eaux
	Dispositif sécurité	Protéger les usagers	Résister aux chocs
Fonction ELD			
		Etre durable	
		Etre exploité sans altération	

D'autres concepts tels que, planning, actions de maintenance (…), déjà explicités aux chapitres précédents (voir définitions encadrées dans chaque chapitre) ou issus d'autres modèles disponibles de connaissances, sont également considérés à cette étape de la modélisation. Pour décrire les connaissances à des fins d'application du modèle conceptuel unifié (M1), nous avons déterminé différentes relations particulières (relations d'influences…). Ces relations sont déterminées à partir d'un raisonnement sur la combinaison des concepts décrivant les sous-domaines en interaction (§3.1.2) [MAE 00, SUG 04]. Le tableau 3.10 illustre les relations entre les principaux concepts génériques de base déterminées.

Tableau 3.10 : Table de relations

(a) concepts décrits par une relation binaire

Niveau de description	**Concept source**	**Relation binaire (arité =2)**		**Concept cible**
		relation (R)	relation (R')	
0	Système_OA	aPourComposant aPourRôle aPourMateriau estDéterioréPar peutEtreDansUne estProduitPar peutEtreAffectéPar	composantDe rôleDe estUtiliséPour détériore impacte produit affecte	Composant Fonction Materiau Processus_Altération Situation_Défaillance Activité Environnement
1	Composant	composantDe doitAssurer faitDe estDéterioréPar peutEtreDansUne estProduitPar peutEtreAffectéPar	estComposéDe peutEtreAsurer estUtiliséPour détériore impacte produit affecte	Système_OA Fonction Materiau Processus_Altération Situation_Défaillance Activité Environnement
2	Matériau	matériauDe doitContribuer estUtiliséPour estAltéréPar estRuinéPar estExploitéPar peutEtreAffectéPar	aPourMatériau - faitDe altère ruine utilise affecte	Système_OA Fonction Composant Processus_Altération Situation_Défaillance Activité Environnement

(b) concepts décrits par la relation ternaire

Niveau de description	**Concept source**	**Relation ternaire (arité =3)**	**Concept cible**
0 à 1	Fonction	fonctionConjointeDe	FonctionELS
			Fonction ELU
	Système d'ouvrage d'art	estComposéDe	Composant_Ca
			Composant_Cb

Le tableau 3.10 présente un extrait de table de concepts, qui consiste en la mise en correspondance des concepts interdépendants, de manière à structurer la connaissance du domaine d'application. Les relations de l'ensemble des concepts peuvent être directement visualisées dans la modélisation (fig.3.20, §3.3.3). Ces relations (binaires, ternaire) permettent de structurer un Fait sous forme de graphes par le triplet « concept source – relation - concept cible » (voir figure 3.17). Elles sont déterminées suivant les principes de règles de similitude et de transitivité (voir chapitre 2, §2.5). Par exemple, la relation « a pour composant » entre Système d'ouvrages d'art et Composant permet de déduire une relation « est composant de ». Le graphe Fait organisant le domaine de l'ingénierie et de gestion des ponts en huit principaux concepts en mobilisant l'illustration du tableau 3.10 est présenté au paragraphe (§3.5) : système, composant, fonction, matériau, environnement, activité, processus d'altération, situation de défaillance. Chaque concept principal va être décrit en détail par des concepts renseignés sous forme de « autres concepts». Après avoir collecté et explicité les connaissances nécessaires pour la modélisation Br3KM, nous passons maintenant à l'étape de formalisation.

3.3- Structuration et implémentation du modèle M1 de la modélisation Br3KM

La structure de modélisation des connaissances du domaine d'étude est composée, du vocabulaire du domaine (lexique), d'un ensemble des Concepts et des Relations (modèle conceptuel unifié de connaissances « M1 »). Elle intègre trois modules (Faits, Règles, Requêtes) pour la structuration des raisonnements en vue des simulations numériques sur les Faits (modèle de simulation des Faits « M2 »). La finalité du modèle « M2 » est une base relationnelle des Faits servant d'outil d'aide au diagnostic et à la décision (chapitre 4). La structure sémantique du modèle Br3KM se traduit par l'équation (11) :

$$Br3KM = \{V, C, R^n, Fct, Re, Qe\} \quad (11)$$

Avec ; V «Vocabulaire du domaine», C « ensemble des Concepts », R^n « ensemble des Relations partitionné, où n l'arité de la relation », Fct « Faits », Re « Règles expertes » et Qe « Requêtes ».

Cette modélisation passe par la formalisation, la structuration des connaissances et l'implémentation du modèle (voir chapitre 2 §2.6). Elle est mise en œuvre en cinq sous étapes :

- Formaliser la connaissance,
- structurer les Faits génériques (concepts, relation, illustration de simulations),
- construire la structure générique unifiée du modèle Br3KM (voir fig.3.25),
- développer les hiérarchies pour les huit principaux concepts en intégrant les autres sous concepts décrivant le domaine (voir fig.3.27),

- développer le cadre de simulation des Faits (règles, requêtes), et en faire des applications afin de déduire des connaissances factuelles (modèle de simulation, base relationnelle de graphes de Faits stockés).

Les paragraphes qui suivent présentent cette modélisation à travers les quatre premières sous étapes. La dernière est développée au chapitre 4 qui est une illustration de l'exploitation du modèle (M1).

3.3.1-Formalisation des connaissances d'ingénierie des ponts

L'étape de formalisation (voir chapitre 2, §2.4) traite de la finesse de description des concepts et des relations suivant l'ordre partiel du formalisme des Graphes Conceptuels. Les figures 3.19,…3.22 illustrent cette description (§3.3.1.1…).

3.3.1.1- Hiérarchie de système d'ouvrages

La formalisation de l'ensemble des concepts hiérarchisés sous le concept « Système d'ouvrage » consiste en une classification suivant le type constructif décrivant les ponts en trois grandes familles d'ouvrages (voir l'intérêt de cette proposition de description des ponts au §3.2).

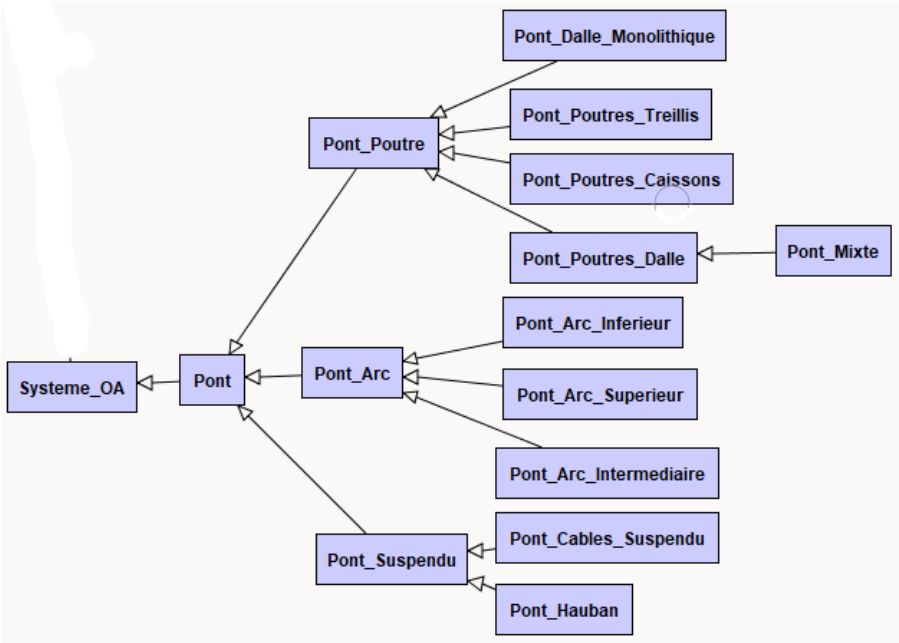


Figure 3.19 : *Description des ponts suivant le type constructif*

3.3.1.2- Description des ouvrages suivant le matériau principal

La formalisation des ouvrages suivant le concept « Matériau » consiste en la description des matériaux suivant deux attributs (natures) : l'attribut « matériau constitutif » classifiant les systèmes d'ouvrages en cinq familles suivant le matériau le plus largement utilisé pour les

composants majeurs. L'attribut « autre matériau » décrit les autres composants dans les systèmes d'ouvrages « i.e. structure voie ou chaussée dans un pont…» (voir §3.2).

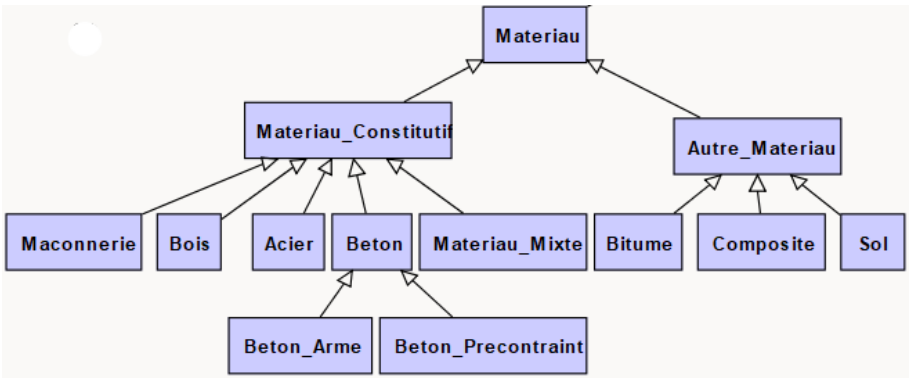


Figure 3.20 : *Description des ouvrages suivants le matériau principal*

3.3.1.3- Description de processus d'altération des matériaux/composant

Les concepts regroupés sous le concept principal « Processus d'altération » sont formalisés suivant la cinétique du processus (processus brutal et processus progressif). L'intérêt de cette description taxonomique est de rassembler un grand nombre de processus d'altération de matériaux/composant en deux groupes pour diverses origines d'initiation (origine chimique, physique, biologique…). Cela est aussi important pour analyser les actions de ces deux types de processus d'altération sur deux échelles de modélisation des scénarios de mécanisme de défaillances d'ouvrage (chapitre 4) : processus d'altération brutale (ouvrage), processus d'altération progressive (matériau/composant).

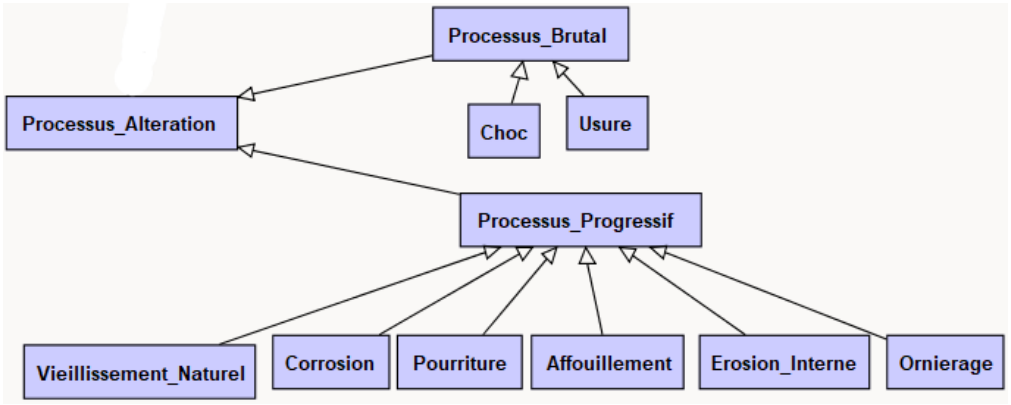


Figure 3.21 : *Description des processus d'altération des matériaux d'ouvrage*

3.3.1.4- Description de l'environnement de système d'ouvrages

La formalisation du concept « Environnement » d'ouvrages consiste en deux classes : la classe « Environnement naturel » permet de considérer les actions dues aux facteurs naturels et certains événements météorologiques dans la modélisation des Faits (inondation, condition de terrain, crues…). La classe « Environnement

d'exploitation » permet d'aborder la modélisation de défaillance engendrée par l'implication des facteurs humains « erreurs humaines, collisions…» et d'autres facteurs externes « chargement excessif …».

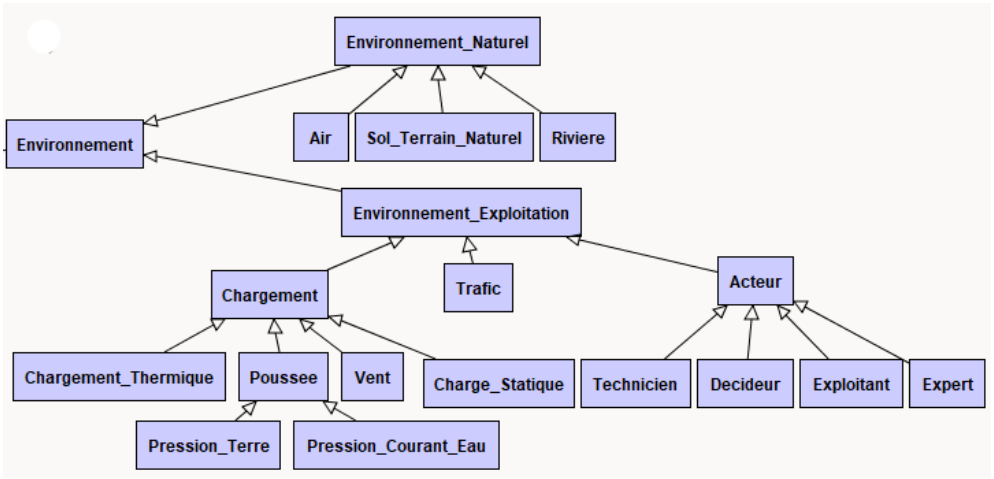


Figure 3.22 : *Description taxonomique de l'environnement d'ouvrages*

3.3.1.5- Relations du domaine pour construire les graphes de faits

La taxonomie des relations consiste en une formalisation suivant trois degré d'arité permettant la modélisation des Faits. La figure 3.23 présente un extrait des trois catégories de relations utilisées dans la thèse : (a) relation unaire, (b) relation binaire et (c) relation ternaire. La table explicitée (tableau 10, § 3.2.4.2) donne plus de détails sur l'utilisation de ces relations.

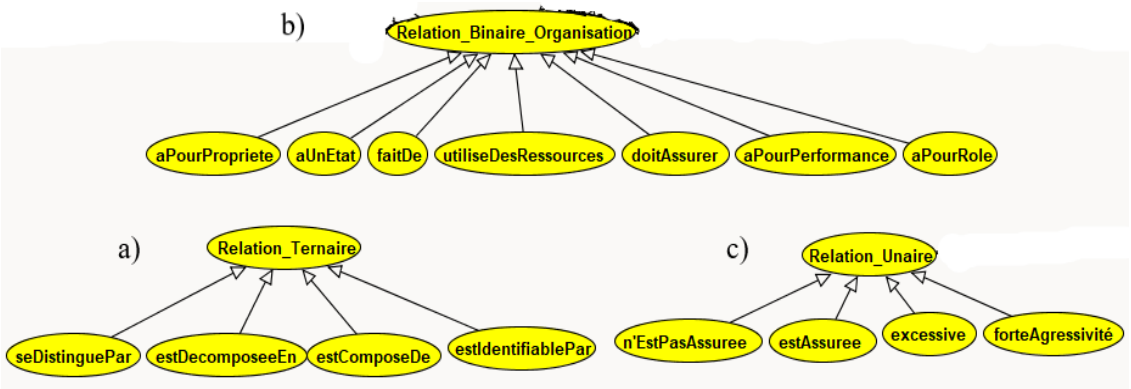


Figure 3.23 : *Illustration des connaissances formalisées sous CoGui*

L'ordre partiel qui s'interprète dans des flèches sur ces figure 3.19,…3.23 signifie que chaque instance du concept générique décrit par une même relation taxonomique (estUn ou sorteDe…), hérite des propriétés (ou sous-concepts) du concept générique (sommet). Par exemple, sur la figure 3.19 la propriété d'ouvrage « i.e. section transversale » est attribuée au concept « pont », et héritée automatiquement par les concepts plus spécifiques «pont arc, pont

poutre, pont poutre-dalle…». Nous montrons maintenant les résultats de l'implémentation de ces connaissances formalisées (§3.3.1).

3.3.2-Illustration de la structure conceptuelle des connaissances implémentées

Les figures 3.24 et 3.25 sont des extraits de cette formalisation en format sémantique dans CoGui : fig.3.24 est un vocabulaire du domaine qui renseigne les considérations explicitées au tableau 3.8 (§3.2.4.1) pour transcrire les Faits en langage naturel. La figure3.25 (a) elle présente dans la fenêtre de gauche la structure conceptuelle ordonnée des concepts, (b) utilisant des relations ordonnées pour structurer la connaissance reposant sur ce vocabulaire.

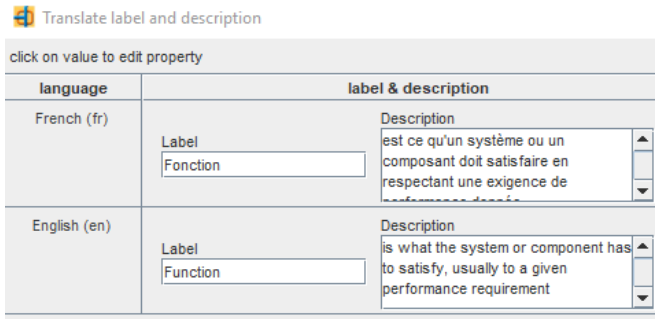


Figure 3.24 : *Extrait du vocabulaire implémenté dans CoGui*

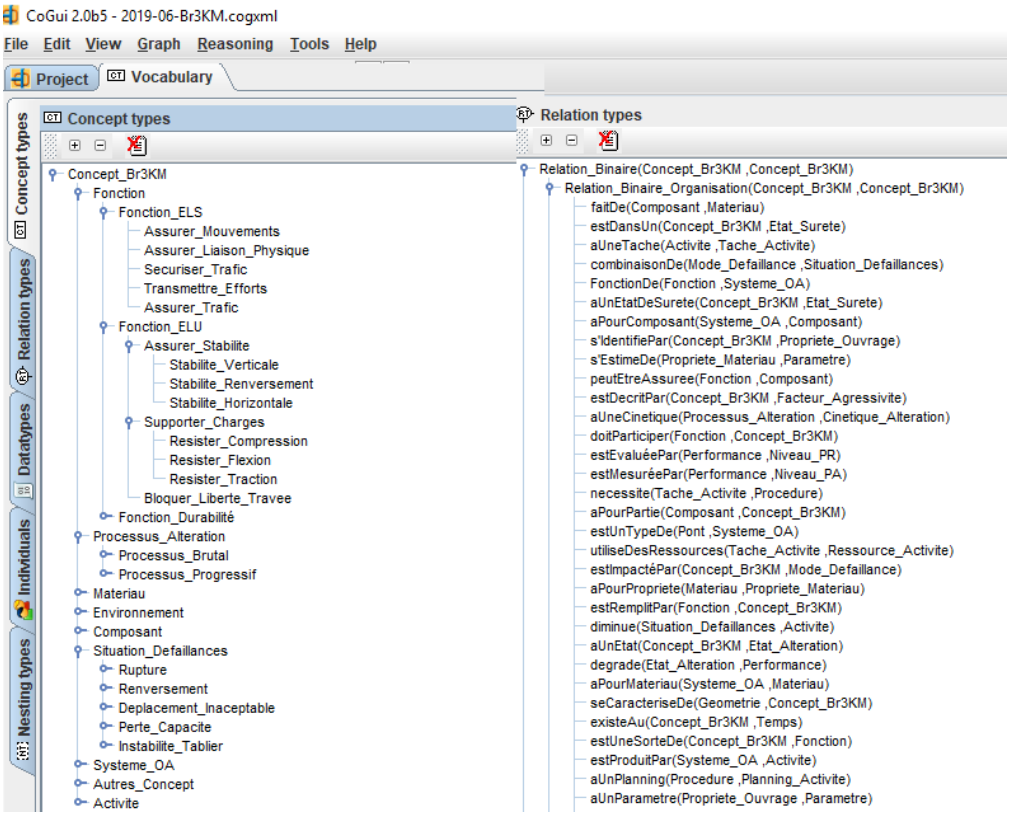


Figure 3.25 : *Illustration de la structure conceptuelle des connaissances sous CoGui*

La fenêtre à gauche conceptualise les connaissances du tableau 3.7 (§3.2.4.1). La fenêtre à droite matérialise la table de relation entre concept source et concept cible (tableau 3.10, §3.2.4.2). Grâce à ces connaissances formalisées disponibles (structure implémentée, format, lexique), nous développons dans ce qui suit la modélisation des Faits génériques correspondant aux huit principaux concepts sélectionnés (tableau 3.7).

3.4- Structuration des Faits génériques

La figure 3.17 (§3.2.4.1) a montré comment est décrit un simple Fait via la structuration de l'interaction entre deux concepts (relation binaire). Dans cette partie nous présentons les résultats de manipulation des connaissances formalisées (figure 3.25) pour structurer des Faits génériques.

3.4.1-Graphes de faits génériques à l'échelle de l'ouvrage et du composant

Un système est explicité comme une combinaison de composant satisfaisant ses fonctions à des niveaux de performances acceptables. La figure 3.26 est un graphe de Fait structurant la connaissance d'un système à l'échelle macro (système global) et à l'échelle micro (composant) : (a) présente le Fait initial explicitant un système d'ouvrages à travers six concepts structurés : Système d'ouvrages, Fonction, Propriété d'ouvrage, Performance, Niveau de performance attendu, Niveau de performance réel. (b) illustre un Fait générique initial décrivant un composant d'ouvrage. Il est structuré par huit concepts dont quatre (sous concepts soulignés) sont hérités du concept «Système d'ouvrages » : Composant, Matériau, Fonction, Propriété de matériau, Performance, Niveau de performance attendu, Niveau de performance réel.

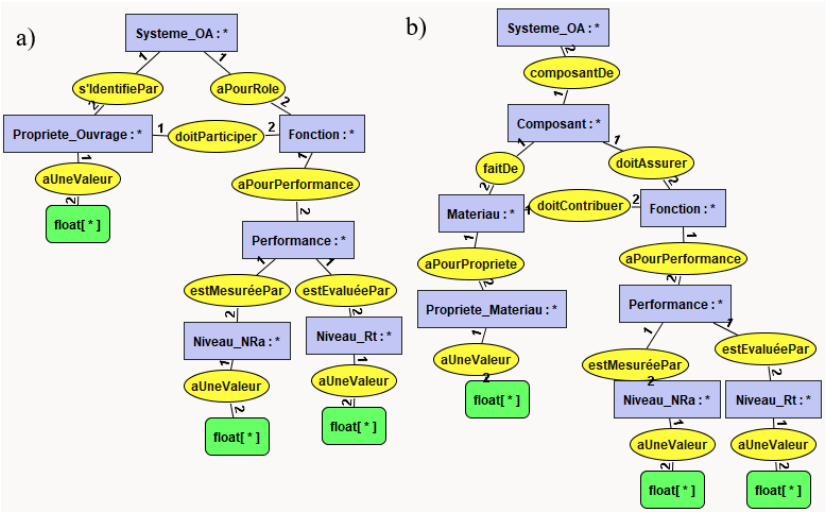


Figure 3.26: *Graphe de faits génériques, (a) à l'échelle de l'ouvrage, (b) à l'échelle du composant*

La figure 3.26(a) schématise la structure générique des connaissances d'un système à l'échelle géométrique. La figure 3.26 (b) matérialise la structure d'un système à l'échelle

composant (matériau). La modélisation de ces deux Faits génériques sous forme de modèle fonctionnel de système intégrant l'environnement est nécessaire pour simuler ses mécanismes de défaillance. Les relations « attachée A » (fig.3.26a) et « doitContribuer » (fig.3.26b) consistent en une corrélation entre les propriétés d'ouvrage ou du matériau et la satisfaction de la performance de la fonction de l'ouvrage ou du composant. Un extrait de modélisation relative à l'analyse fonctionnelle de composant est présenté dans cette partie (§3.4.3).

3.4.2-Graphes de faits génériques de l'environnement et de processus d'altération

La figure 3.27 illustre l'organisation de deux Faits distincts. La figure 3.27 (a) présente le graphe de Fait-environnement de système d'ouvrages. Il est (Fait-environnement) présenté comme tout facteur externe pouvant changer l'état d'un système/composant : environnement, agressivité d'environnement, facteurs d'agressivité (facteur d'agressivité a « i.e. température du milieu naturel », facteur d'agressivité b «i.e. humidité relative »). La figure 3.27(b) décrit le Fait générique du processus d'altération via quatre concepts (processus d'altération, cinétique d'altération, temps, pas de temps) : un processus se manifeste au cours du temps.

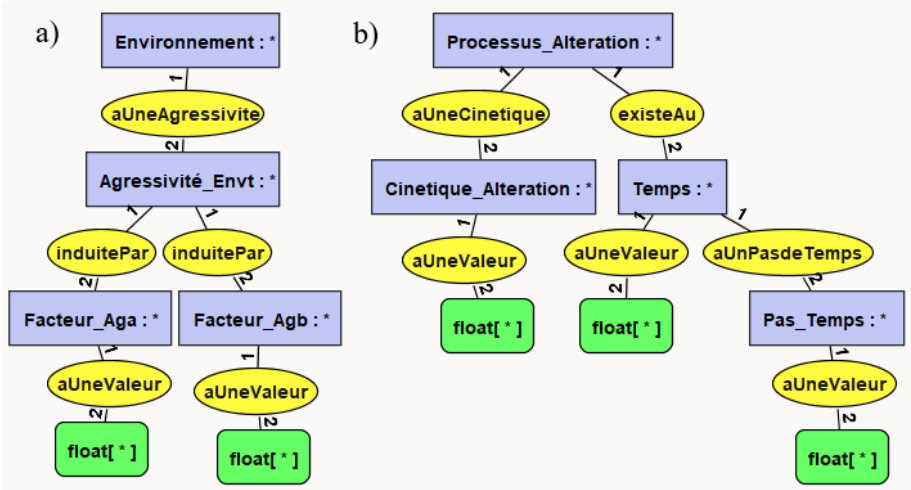


Figure 3.27 : *Graphes de faits générique, (a) à l'échelle de l'environnement, (a) à l'échelle de*

La modélisation de la figure 3.27 (a) permet de quantifier l'agressivité d'un environnement spécifique à un processus d'altération (corrosion, affouillement…). (b) l'intégration du concept « temps » permet de développer un modèle de simulation pour l'analyse des mécanismes de défaillance (scénarios).

La figure 3.28 schématise la structuration des Faits génériques relatifs au concept « Activité », « Situation de défaillance » : (a) est une illustration descriptive des connaissances liées à l'activité en ingénierie d'ouvrages. (b) explicite la manière dont une situation de défaillance est décrite dans cette modélisation.

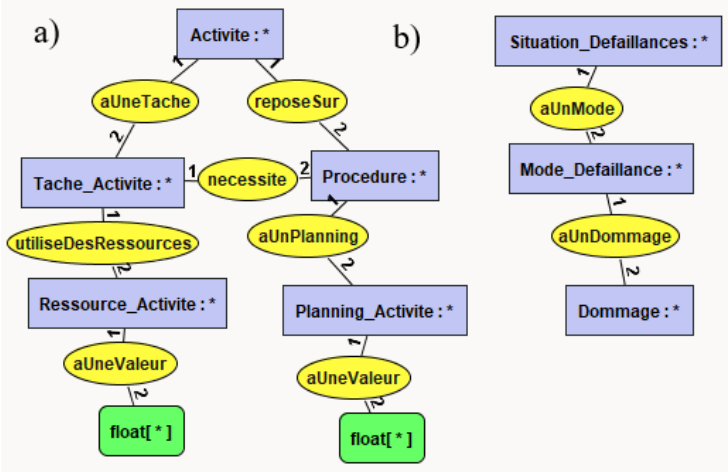


Figure 3.28 : *Graphes de faits générique, (a) activité associée à un ouvrage, (b) défaillance d'ouvrages*

La modélisation (fig.3.28a) permet de simuler les erreurs humaines impliquées dans la conjonction des facteurs de risques de défaillance (environnement, états de performance de système…). La modélisation (fig.3.28b) permet de raisonner sur les causes possibles à l'origine des défaillances d'un ouvrage.

Les Faits génériques illustrés (fig.3.26,…3.28) permettent de développer des modèles spécifiques de simulation pour décrire les états de composant d'ouvrages (prédiction, recherche de l'historique des défaillances passées…). La figure 3.29 illustre un modèle de simulation des scénarios d'évolution des états d'un composant d'ouvrage au cours du temps. Il est le résultat de l'unification d'une partie de graphe de Fait générique « composant-matériau » (fig.3.26b) et de deux graphes de Faits « environnement-agressivité et processus d'altération-cinétique-temps » (fig.3.27).

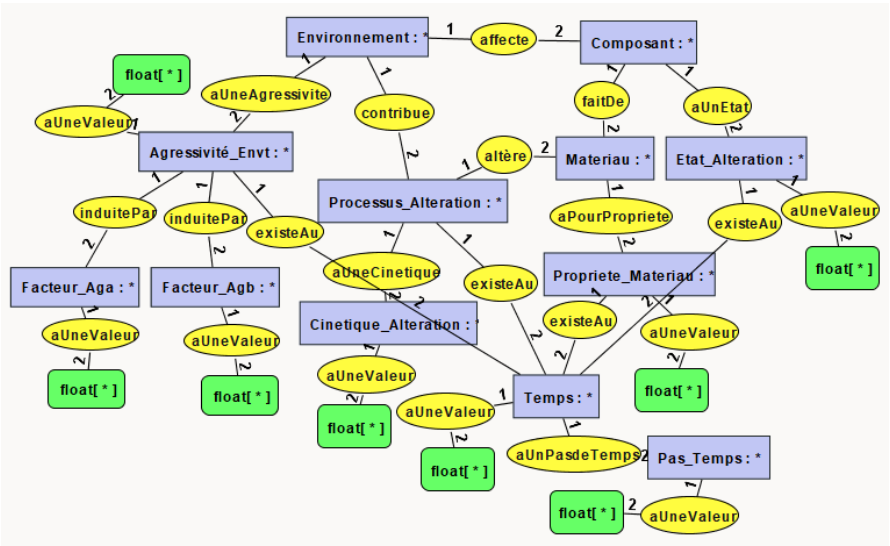


Figure 3.29 : *Modèle de simulation des états de composant d'ouvrage*

Les relations d'influence telles que « affecte, altère, contribue » sur la figure 3.28 sont des liaisons de transfert d'effets défavorables des facteurs externes à travers la structure de l'ouvrage (propriété de matériau, propriété d'ouvrage…). Elles sont déterminées par des lois empiriques (règles expertes), ce qui permet de simuler les scénarios d'altération de composant d'ouvrage soumis aux actions de l'environnement. L'intérêt de cette modélisation sera illustré au chapitre 4 en construisant des règles expertes nécessaires à la simulation.

Nous venons de montrer comment structurer la connaissance du domaine en faisant usage des huit principaux concepts du domaine d'étude (tabl.3.8, §3.2.4.1). Maintenant nous allons l'illustrer par un exemple d'application en contexte d'analyse fonctionnelle de sûreté d'ouvrage à l'échelle de composant d'ouvrage.

3.4.3-Cadre d'analyse fonctionnelle par la logique des Graphes Conceptuels

Nous exploitons le graphe de Fait à l'échelle du composant (fig.3.25b) pour évaluer l'état de sûreté de l'ouvrage « d » ou de son composant « di ». Cette évaluation pour un composant de pont en cours de détérioration repose sur deux règles expertes (génériques) permettant de déduire sa satisfaction ou non à une fonction prévue. La règle (R3.3) intègre une loi déterministe pour l'évaluation de satisfaction de performance (fonctionnalité ou sûreté) d'un système par la comparaison entre le niveau réel de performance « Rt » à un instant et celui attendu NRa (voir équations 7 et 8, chapitre 1, §1.5).

L'état de sûreté « d, di » est définit sur un intervalle dépendant de l'exigence d'états limites de la performance : d $\in$[0, 1] pour une fonction ELU, et d $\in$[0, 3] pour une fonction ELS. Lorsque la mesure du niveau de performance réel, Rt < NRa, d vaut la valeur « 0 » (état de sûreté correspond à une situation de défaillance). Dans le cas contraire, suivant la fonction concernée d vaut la valeur « 1 ou 3 » (correspondant au domaine de sûreté). L'échelle d'évaluation de performance dans cette modélisation est de 4 à 0 « performance excellente, à performance perdue ou absente » (voir outils IQOA, PONTIS, chapitre 1, §1.4).

Règle R3.3a évaluant l'état de sûreté d'un composant : composant en sûreté

Si F = fonction du composant C,
Et si NRa= exigence de satisfaction de F,
Et si Rt = niveau de performance réelle de F,
Et si Rt >NRa
Alors composant C a un état de sûreté = NRa
(Composant en sûreté).

Règle R3.3b évaluant l'état de sûreté d'un composant : composant défaillant

Si F = fonction du composant C,
Et si NRa= exigence de satisfaction de F,
Et si Rt = niveau de performance réelle de F,
Et si Rt < NRa
Alors composant C a un état de sûreté = 0
(Composant défaillant).

La figure 3.30 illustre le graphe générique de la règle experte d'évaluation de la sûreté d'un composant, (a) est une loi déterministe codée déclarant qu'un composant est en sûreté et (b) indique que ce composant est défaillant.

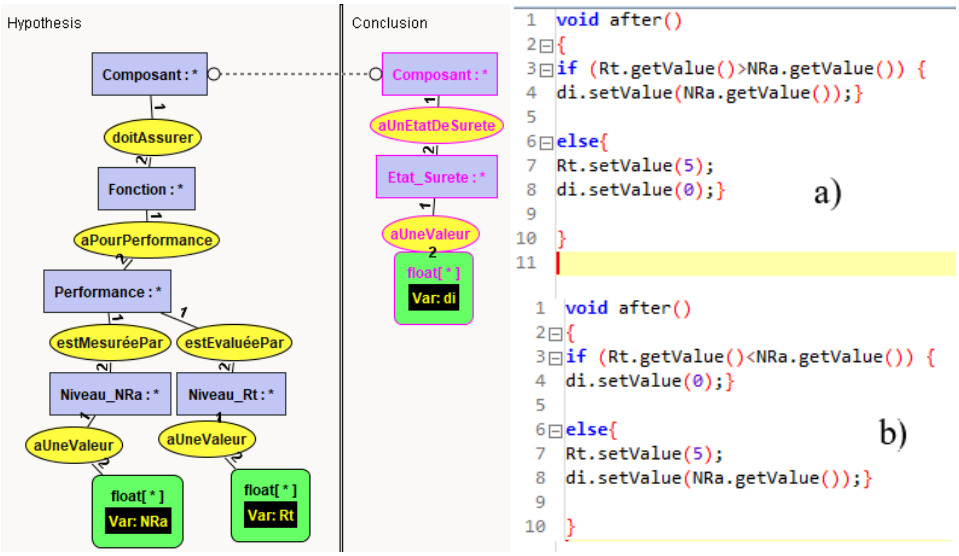


Figure 3.30 : *Graphes d'analyse fonctionnelle d'un composant de pont*

La figure 3.31 présente les résultats de simulation des règles R3.3a et b sur le graphe de Fait initial à l'échelle du composant : (a) présente le graphe de Fait initial instancié à l'échelle du tablier du pont Mouyondzi (Congo). (b) illustre le graphe de la règle R3.3 (a et b) comportant une loi déterministe d'évaluation de sûreté. (c) illustre la simulation de l'état de sûreté d'un composant qui satisfait à sa fonction ELU et (d) montre le cas où ce même composant ne satisfait plus sa fonction.

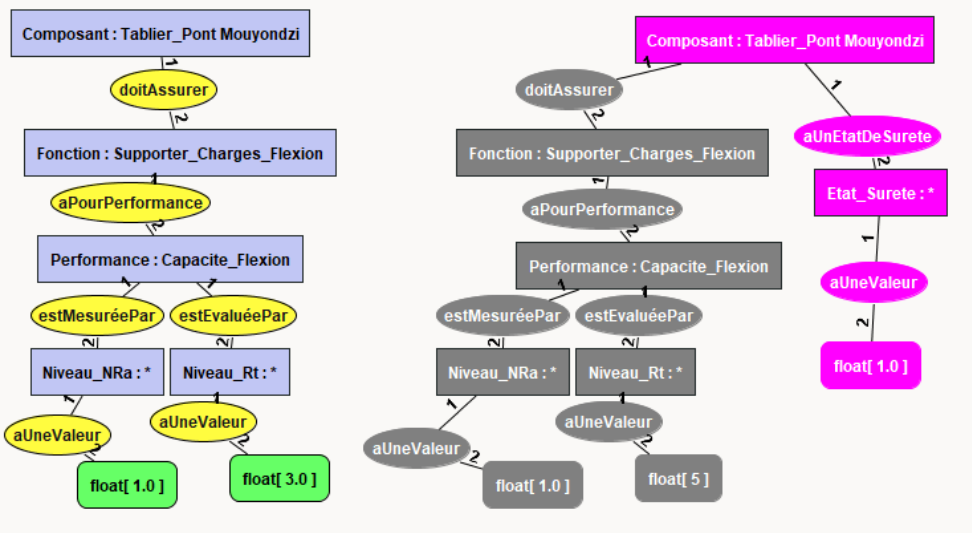


Figure 3.31 : *Graphes d'analyse fonctionnelle d'un composant de pont*

Le graphe à gauche (fig.3.31) illustre le fait initial formalisant le cadre d'analyse fonctionnelle du tablier du pont Mouyondzi où le niveau de performance mesurée est Rt=3. Le graphe à droit signifie que le tablier est en sûreté, c'est à -dire en état de satisfaire sa fonction de support de charge (di=1).

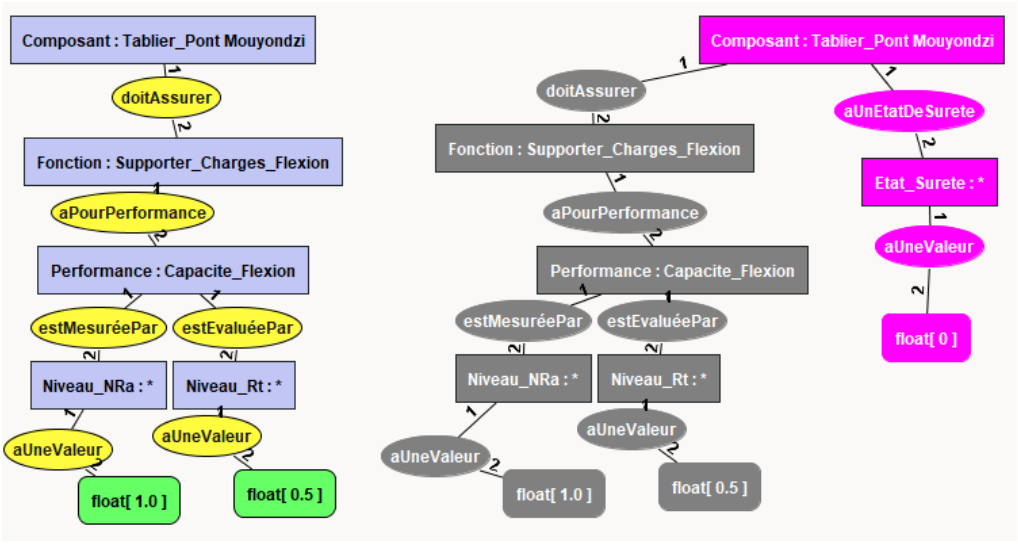


Figure 3.32 : *Graphes d'analyse fonctionnelle d'un composant de pont*

Le graphe à gauche (fig.3.32) indique que la performance mesurée Rt du composant est inférieure à celle attendue, et le graphe à droite explicite le fait que ce composant soit en situation de défaillance et ne satisfait plus sa fonction (di=0).

Ce cadre de simulation montre comment évaluer la performance d'un composant/ouvrage en contexte d'analyse fonctionnelle de sûreté de fonctionnement sans modélisation du processus d'altération/vieillissement des matériaux ou du mode de défaillance d'un composant (fig.3.31

et 3.32). Il montre la pertinence de la modélisation conceptuelle et de simulation d'hypothèses formalisées pour l'analyse de défaillance des ponts (logique AMDEC). Nous présenterons au chapitre 4 (§4.2) le cadre développé pour la simulation des scénarios d'accumulation de dégradation de performance au cours du temps. Cela va servir de complément plus approfondi des illustrations présentées (fig.3.31, 32).

Après avoir montré comment la connaissance du domaine est structurée à travers huit principaux concepts (figures 3.26 …3.32), nous abordons dans ce qui suit la construction du modèle conceptuel unifié de connaissance (M1).

3.5- Organisation et implémentation de la modélisation Br3KM

3.5.1-Unification globale des connaissances organisant le domaine d'étude

L'organisation des connaissances du domaine repose sur des raisonnements logiques consistant en la structuration des principaux concepts du domaine sous un modèle unifié. Cette modélisation est le résultat des illustrations des Faits génériques structurés au paragraphe précédent (§3.4.2). Elle repose sur le principe de transitivité et de similarité pour développer les modèles de connaissance constituant la modélisation Br3KM dans la plate-forme CoGui [SOW 95]. La construction du modèle conceptuel unifié de connaissance « M1 » consiste à l'organisation des connaissances du domaine pour développer une modélisation sous forme d'arborescence taxonomique.

La figure 3.33 illustre l'implémentation de l'organisation de la connaissance nécessaire à la modélisation conceptuelle unifiée (fig.3.35). Elle organise les huit concepts de base (tableau 3.8, §3.2.4.1) en une seule structure unifiée de connaissances permettant de développer des raisonnements dans un contexte d'analyse de défaillance d'ouvrages.

Les concepts sources (ou d'entrée sont « système d'ouvrage» et « composant»). Les autres concepts (i.e. environnement, processus d'altération…) sont intégrés par itération en procédant à des raisonnements basés sur la logique d'analyse des modes de défaillances (AMDEC). Les concepts de sortie sont « situation de défaillance » et « Activité » (exécution, maintenance, conception…). Cette organisation conceptuelle consiste en un Fait générique structurant 28 interactions possibles dans un système de génie civil. La cohérence de cette base de modélisation est justifiée par 20 règles génériques.

Nous venons d'illustrer les extraits de ces règles (§3.4.3). Nous montrons par la figure 3.33 (a), un extrait d'une règle vérifiant la cohérence de la modélisation, les autres règles sont disponibles en annexe 4. La figure 3.33b illustre les concepts sans liaisons d'interaction (avant la structuration). La figure 3.33c montre les deux premières inférences de règles vérifiant la cohérence de l'organisation des concepts, et la figure 3.33d présente l'organisation complètement contrôlée.

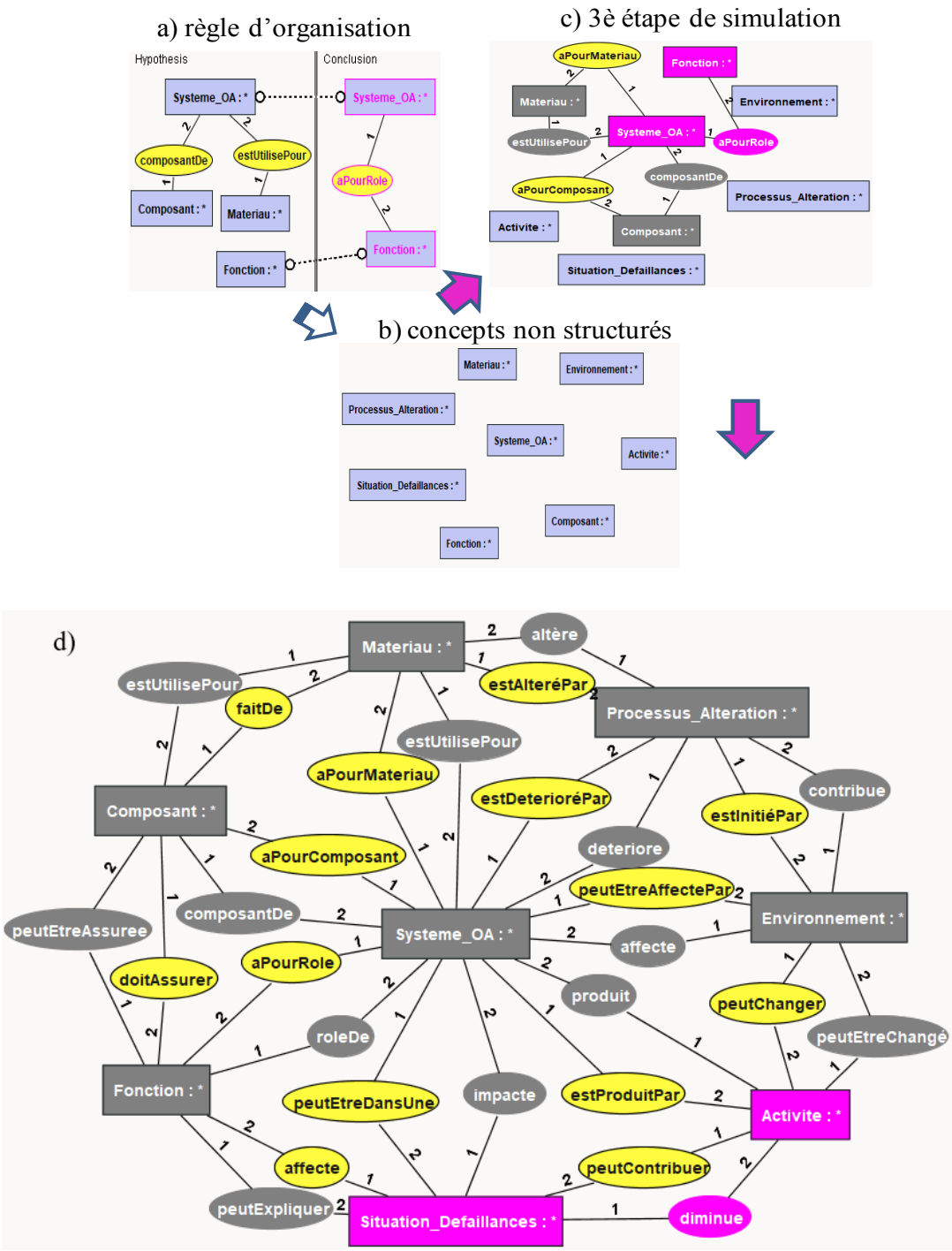


Figure 3.33 : *Illustration de l'organisation unifiée du domaine de l'ingénierie des ponts*

L'unification de connaissances des sous-domaines en interaction sous forme d'une organisation formalisée autour du concept général Système d'ouvrages d'art repose sur deux catégories de raisonnements (déterministe et possibiliste). Ceci est une dimension importante pour disposer d'un modèle plus pertinent permettant de développer le savoir et d'affiner les explications sur les situations.

Les relations entre système, composant, matériau et fonction, sont des relations purement du domaine déjà exploitées dans différentes modélisation existantes [HEL 13, LIU 16]. La particularité de cette proposition d'organisation réside dans la facilitation de la compréhension de la variété d'interactions au sein de l'organisation de système d'ouvrage. Cela permet de développer des axes de raisonnements intuitifs dans un cadre d'analyse de défaillance d'ouvrage, en procédant par exemple à l'identification des interactions d'influence pour orienter la formulation des hypothèses. Par exemple, la relation d'interaction« altère » entre processus d'altération et matériau permet de structurer les hypothèses physiques (lois) pour simuler les effets d'un processus sur les propriétés de matériau. Comme nous pouvons le constater, pour différents points de vue les avantages de cette organisation de connaissance sont multiples par rapport à celle des modèles disponibles dans [HEL 13, LIU 16, ZHA15].

Un aspect significatif de cette organisation est la facilité d'interrogation du modèle par des requêtes construites à partir de graphes. Par exemple pour identifier les interactions au sein de l'organisation d'un système d'ouvrages en contexte d'analyse de ses états, nous avons proposé une requête de projection. La simulation de cette requête sur le Fait (d'organisation du système) permet de localiser les interactions d'influence par lesquelles un ouvrage en service risque d'être affecté au cours de son exploitation. La figure 3.34 est une illustration du résultat de cette projection.

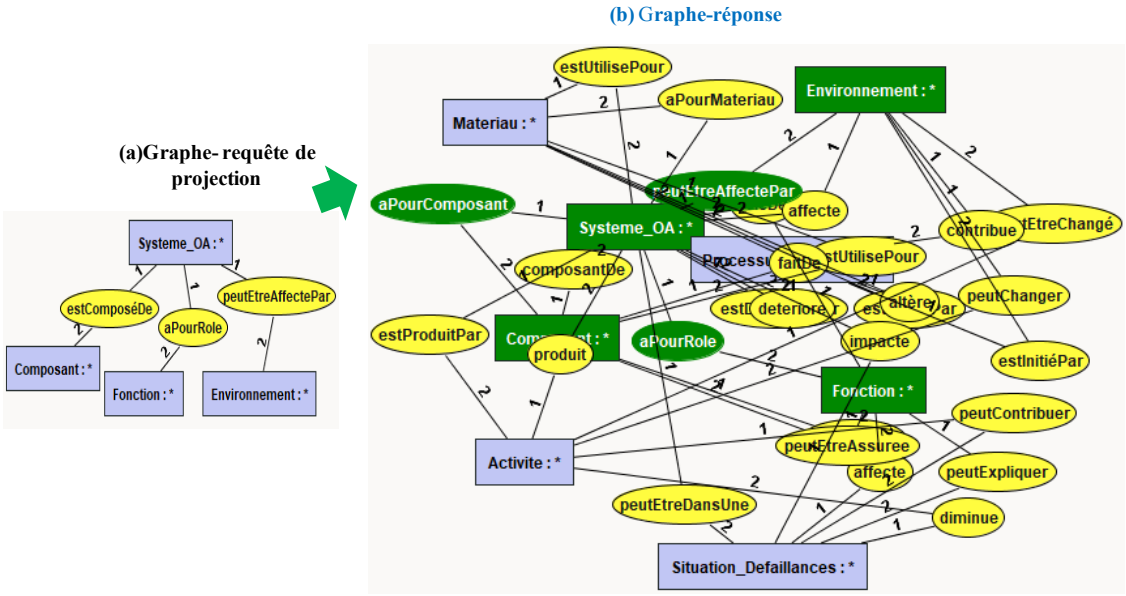


Figure 3.34 : *illustration de l'interrogation du modèle M1*

La figure 3.34a présente un graphe-requête, dont la projection sur le prototype (prémices) de la modélisation (fig.3.33), permet de découvrir de quelle manière un système d'étude est organisé. La figure 3.34 b (en couleur verte) illustre les résultats de cette projection en retraçant la localisation de chaque concept de base organisant le système. Notre modélisation introduit différentes possibilités d'utilisation.

Nous présentons maintenant les résultats de l'implémentation du modèle conceptuel unifié de la modélisation Br3KM.

3.5.2-Implémentation du modèle conceptuel unifié dans la plate-forme CoGui

Les concepts du modèle conceptuel unifiant les connaissances du domaine sont référencés au sommet par l'acronyme de la modélisation « Concept_Br3KM ». Cette formalisation exprime le fait que les connaissances implémentées dans cette modélisation héritent des objectifs de l'ingénierie et de gestion des ponts existants. Comme nous avons indiqué au paragraphe précédent (§3.4, §3.5.1), le modèle conceptuel unifié est constitué de huit principaux concepts du domaine des ponts.

Ce modèle est une illustration taxonomique de l'organisation des connaissances structurée (figure 3.33), où chaque hiérarchie développée de concepts suivant l'ordre partiel permet le transfert de connaissance entre différents systèmes d'ouvrages. La figure 3.35 présente l'architecture de cette modélisation conceptuelle unifiée des connaissances de l'ingénierie et de maintenance de ponts. Le modèle complet est disponible en annexe 4.

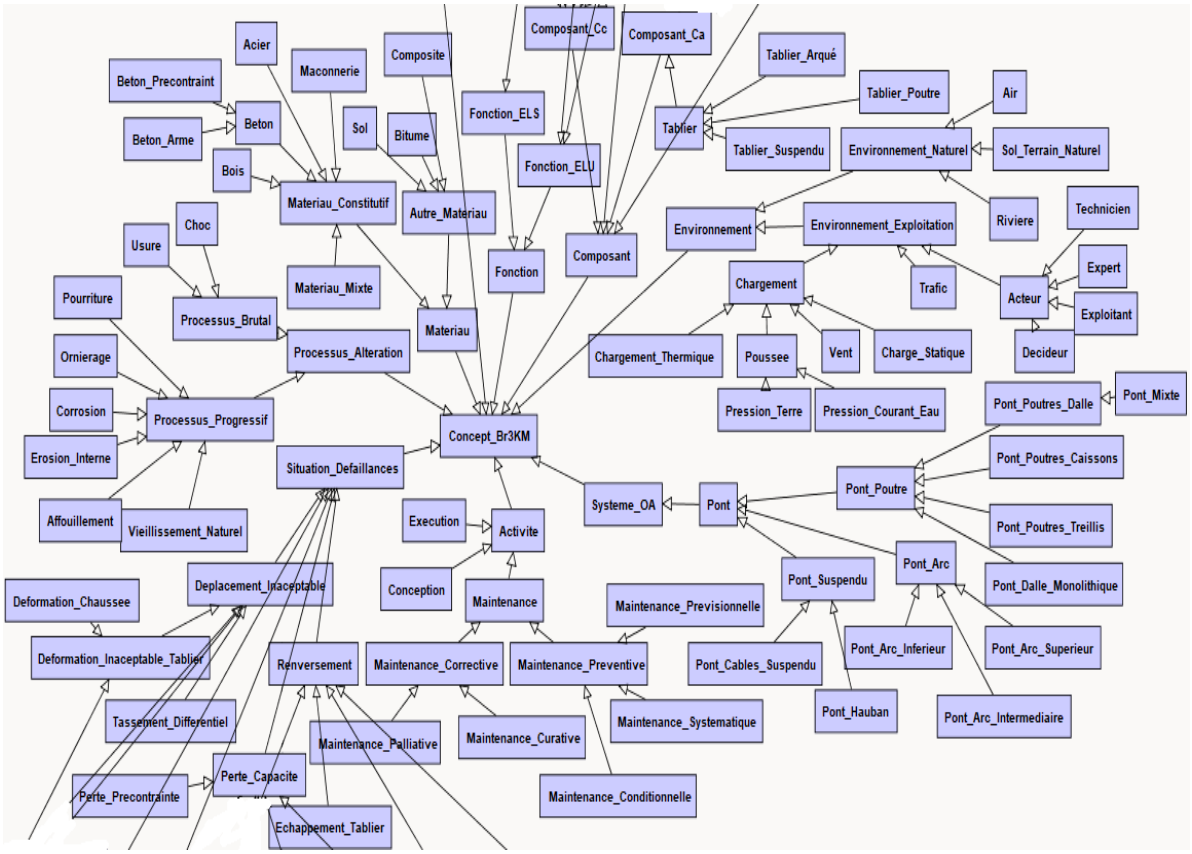


Figure 3.35 : *Extrait du modèle conceptuel unifié (M1) de la modélisation Br3KM*

3.6- Contributions originales et synthèse du chapitre

3.6.1-Contributions originales

Nous venons de développer les bases d'une modélisation, appelée Br3KM, qui offre une vision globale du domaine de l'ingénierie et de gestion des ponts. Cette modélisation considère l'ampleur des champs d'applications, ce qui se traduit par la prise en compte des sous-domaines en interaction. Les principaux atouts de cette modélisation par rapport à celles existantes en génie civil sont :

En termes de contenu, le modèle M1 constituant Br3KM est plus complet avec 5 niveaux de description (profondeur) et 8 concepts principaux organisant la connaissance du domaine. Par exemple, dans [HEL 13], la profondeur n'est que de 3 niveaux avec 6 concepts principaux. Dans [ZHA 15], la profondeur du modèle est de 4 niveaux avec 8 concepts de base. De plus, la considération d'un grand nombre de sous-domaines en interaction est un atout majeur de Br3KM par rapport à tous les modèles examinés au chapitre 1(§1.5).

La modélisation intègre les facteurs variables d'agressivité de l'environnement (vieillissement, corrosion, qualité de matériau…), permettant de construire des modèles de simulations nécessaires aux raisonnements sur des hypothèses physiques (lois sur le vieillissement des matériaux…, chapitre 2 §2.5, chapitre 4). Ceci permet de développer des applications spécifiques dans chaque sous-domaine et d'enrichir la modélisation pour la faire évoluer au fil du cycle de vie des ouvrages.

La modélisation Br3KM propose à travers le modèle conceptuel M1, des concepts très génériques permettant ainsi d'étendre le modèle à d'autres contextes d'exploitation d'ouvrages d'art. Par exemple le concept générique « système d'ouvrages d'art » permet d'intégrer tout type d'ouvrage de génie civil (par exemple les tunnels, les barrages) et étendre la connaissance du domaine avec l'ensemble des concepts intégrés au modèle.

Une dimension très importante provient des connaissances issues principalement des pratiques d'ingénierie forensique qui constitue un champ technique pratiqué dans différents pays et par différents experts. Ce champ technique est fondé sur la recherche des causes, l'amélioration des connaissances, l'éducation, l'apprentissage et l'amélioration des pratiques.

L'innovation de cette modélisation réside aussi en particulier dans l'exploitation facilitée par les Graphes Conceptuels sous la plate-forme CoGui. Ceci est innovant pour développer de multiples applications en génie civil, et n'était pas possible avec les modèles existants dans le contexte de l'analyse d'ouvrages. La prise en compte des facteurs défavorables de l'environnement dans la modélisation est un aspect intéressant pour développer des cadres de simulations pour l'analyse des cas (Faits) postérieurs ou futurs.

3.6.2- Synthèse du chapitre

Les questions posées à l'issue du chapitre 2 étaient les suivantes :

1) Comment considérer simultanément tous les sous domaines afin de construire un modèle complet et pertinent ? 2) Comment identifier et structurer les Faits relatifs à l'analyse des défaillances d'ouvrages non documentés ? 3) Comment enrichir l'information entre les experts des sous-domaines en interaction ?

La question 2 a été traitée en partie à l'étape d'acquisition des connaissances (§3.2), puis complétée à l'étape de structuration des Faits génériques (§3.3.4). Les questions 1 et 3 ont été traitées dans le paragraphe (§3.3.5). L'intérêt d'une telle modélisation conceptuelle unifiée de connaissance est aussi d'aider l'expert à affiner l'identification des sources de défaillances sur les ponts existants, quand il s'appuyait jusqu'alors sur des informations provenant des sources non organisées. Le lien entre l'ensemble des domaines (domaine global et sous-domaines) avec la modélisation Br3KM permet un transfert et une gestion de la connaissance du domaine.

L'adaptation de cette organisation de connaissances en contexte industriel réel pourra servir de moyen d'amélioration des pratiques des experts. Nous avons indiqué aux chapitres 1 et 2, que le caractère hétérogène du format de la connaissance rendait difficile les raisonnements et la communication dans le secteur du génie civil.

La formalisation de l'organisation de la connaissance proposée a permis de lever cette lacune en développant une structure de modélisation implémentée sous forme de Graphes Conceptuels. Ce format conceptuel permet aux experts ou aux ingénieurs de développer des raisonnements et de formaliser des cas concrets. Notre modélisation ouvre vers différentes possibilités d'utilisation.

Nous allons présenter des illustrations d'applications relatives à l'analyse des défaillances des ponts au chapitre 4 pour compléter celles déjà montrées au chapitre 2 (§2.5) et dans ce chapitre (§3.4.3) : modélisation du modèle de simulation (M2) relative à la quantification des scénarios de mécanisme de défaillance des ponts.

Chapitre 4 Exploitation du modèle conceptuel des connaissances de l'ingénierie des ponts pour la simulation des états d'ouvrages et leurs modes de défaillances

Les performances des ponts existants sont constamment affectées au cours de leur exploitation par des facteurs multiples et variés, tels que : les processus d'altération dus aux conditions d'environnement agressif (corrosion, vieillissement naturel des matériaux…), les chargements excessifs, les aléas climatiques, etc. L'interaction de ces facteurs dans un mécanisme conduit à la défaillance des structures et rend souvent difficile l'explication des situations de défaillances survenant sur les ponts existants. Les Graphes Conceptuels ont montré des possibilités plus avancées de raisonnements logiques et de simulations graphiques de variables d'incertitudes en s'appuyant sur des hypothèses appropriées à travers les règles expertes et les opérations logiques (voir chapitre 2 « §2.5 »). Ce chapitre présente les simulations prenant en compte les facteurs défavorables de l'environnement à travers la modélisation Br3KM (chapitre 3, § 3.3.3). L'intérêt est de montrer comment exploiter les connaissances du modèle conceptuel unifié (M1) pour développer un cadre de simulations numériques de manière à améliorer les pratiques de l'ingénierie forensique et de l'évaluation des états d'ouvrages. Cet intérêt va être illustré à travers deux questions essentielles : *(1) Comment expliquer le Fait que la performance d'un pont puisse diminuer au cours du temps suite à l'agressivité de l'environnement* ? *(2) Comment traduire le Fait qu'un pont se trouve dans une situation de défaillances à partir d'un scénario compréhensible ?*

Ce chapitre est découpé en quatre parties. La première partie développe une première base de description de système en contexte d'analyse de défaillances. Nous ne détaillerons pas ici les analyses structurelles, qui s'appuient, encore une fois, sur les lois mécaniques relevant purement de la Résistance des Matériaux. La deuxième partie consiste en l'exploitation de cinq sous-domaines (D1-D2-D3-D6-D7) pour décrire quelques mécanismes de défaillance des composants de pont : processus soudain, processus progressif d'altération. La troisième partie se concentrera sur l'exploitation des résultats des simulations des états de composants de ponts (analyse déterministe) pour constituer un cadre d'aide au diagnostic des ponts en service. Enfin, la quatrième partie présentera l'architecture de l'outil d'aide au diagnostic ainsi que les prémices d'un cadre d'aide à la décision.

4.1- Modèle de simulation pour l'analyse des défaillances des ponts

Le modèle de simulation de scénario de défaillance « M2 » consiste en un ensemble unifié de graphes de Faits génériques issus de six concepts principaux intégrés dans le modèle

conceptuel « M1» (chapitre 3, § 3.4.1) : Système d'ouvrage, Composant, Fonction, Matériau, Environnement, Processus d'altération. La modélisation d'application (M2) développe une procédure d'analyse fonctionnelle à l'échelle de composant pour décrire les scénarios de mécanisme de défaillances d'un système d'ouvrage. Les raisonnements réalisés sur ce modèle reposent sur la logique « AMDEC » discuté au chapitre 1 (§1.4.1.1). La compréhension du modèle (M2) est donnée par le raisonnement global suivant :

Si conditions de l'environnement et qualité des constructions = facteurs de risque,
Et si ces facteurs se manifestent dans l'ouvrage,
Et si système/composant a un mauvais état de performance à un instant t,
Alors après un instant delta t, le système d'ouvrage risque une situation de défaillance.

La figure 4.1 présente le graphe générique du modèle de simulation M2 détaillé sur deux échelles de modélisation (brique élémentaire) : l'échelle 1 décrit le système d'ouvrage au niveau macro (système global) et l'échelle 2 modélise ce système au niveau de composant (voir chapitre 3, § 3.4.1).

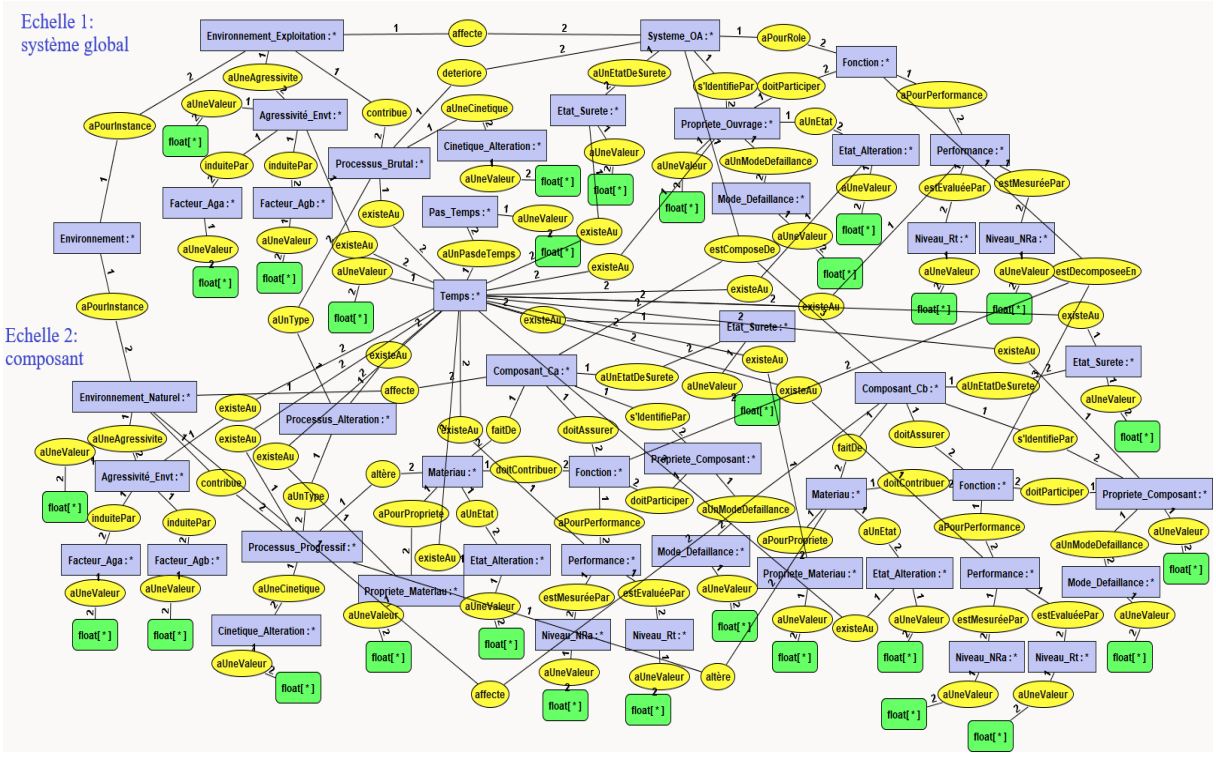


Figure 4.1 : *Modèle global de simulation des états de performance de système (M2)*

Le cadre de simulation est alimenté par l'ensemble de connaissances qui représente tous les facteurs associés au mécanisme de défaillance d'ouvrages en service : l'environnement qui regroupe les facteurs d'agressivité externes est modélisé par deux instances à l'échelle du système et de composant (côté gauche de la figure 4.1). La modélisation à l'échelle du système permet d'analyser les effets des facteurs extrêmes relevant des événements

météorologiques du climat tropical « mouvement de terre, inondation…» et des processus soudains d'altération « choc, usure…». Elle permet également d'analyser à l'échelle du composant, les effets des facteurs d'environnement internes du site de l'ouvrage « action de l'air, de corrosion, d'affouillement…».

Le modèle M2 permet d'identifier les modes de défaillances et les processus d'altération potentiels dans un système d'ouvrage. Il est structuré suivant trois critères de description qui ont permis de rassembler les divers Faits génériques à l'échelle du composant et de système : la fonction, la localisation des parties d'ouvrage et la nature de leurs interactions binaires (hypothèses physiques, possibilistes…). La modélisation de système sous forme de combinaison de deux composants majeurs qui contribuent à ses fonctions sur une même échelle permet de quantifier les scénarios de différents mécanismes de défaillance. Pour les systèmes de type pont, ces deux composants majeurs sont renseigné par le tablier et les appuis, qui permettent d'étendre la description des ponts à différents niveaux de finesse. La relation ternaire « estComposéDe » dans cette description (fig.4.1) représente une liaison physique de transfert d'efforts entre le tablier et l'appui afin de satisfaire à la stabilité du système. Le modèle répond à trois usages en contexte de l'analyse des défaillances :

- une analyse de mode de défaillance particulier de composant pour décrire les scénarios de mécanismes qui dégradent les performances d'ouvrage, ce qui inclut la perte des fonctions prévues (§4.2).
- une analyse prédictive d'altération de matériau de composant qui intègre l'ensemble des facteurs générant la diminution de performance afin de prédire les défaillances possibles de composants d'ouvrages et la perte de leurs fonctions. Les simulations dans ce cadre reposent sur des règles expertes intégrant des lois physiques d'altération de matériau, de réduction des performances… (§4.2).
- la mise en exergue de ces deux atouts du modèle permet de formaliser une base de Faits spécifiques de défaillance d'ouvrages pour poser les bases d'outils d'aide au diagnostic (§4.3).

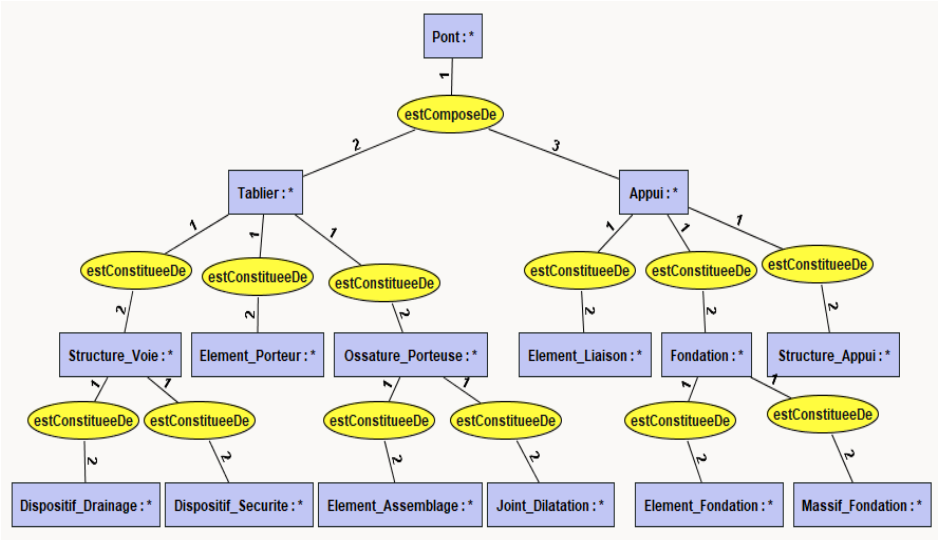
Deux sous-modèles de simulation à l'échelle de composants ont été déduits à partir de la brique élémentaire (fig.4.1) pour faciliter l'interprétation des simulations : le modèle M2.1 pour expliquer les mécanismes de défaillances résultants des processus soudains et M2.2 pour simuler les scenarios de mécanismes de défaillances liées à l'altération progressive de matériaux. Ces deux sous modèles sont disponibles en annexe 5. Le paragraphe suivant illustre une modélisation fonctionnelle générique sur quatre niveaux pour repérer les positions physiques des composants dans un pont ainsi que les fonctions qu'ils doivent assurer.

4.1.1-Modélisation multi échelle de système de type pont

Pour faciliter l'analyse fonctionnelle des cas de défaillances de ponts, nous avons réalisé une description multi-niveaux des principaux composants de pont et de leurs fonctions respectives. La figure 4.2 présente cette illustration : (a) est un graphe de Fait générique qui permet de décrire la structure de tout type de pont (pont arc, pont poutre, pont suspendu) sur

quatre niveaux, (b) est une description multi-niveaux des fonctions qui peuvent être attribuées à chaque composant dans un pont.

(a) graphe de modèle conceptuel multi-niveaux des composants de pont



(b) graphe de modèle conceptuel multi-niveaux des fonctions de pont

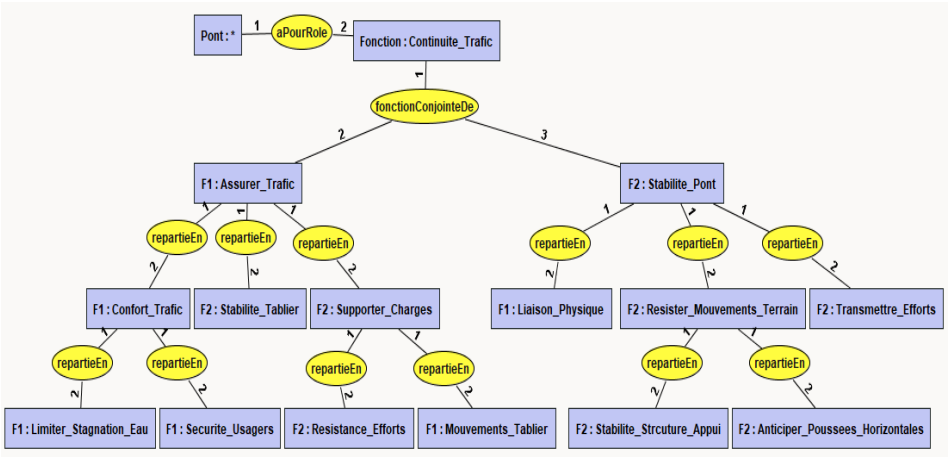


Figure 4.2 : *Modèle conceptuel d'organisation multi niveaux de pont, (a) partonomie des composants, (b) partonomie des fonctions*

Le graphe de Fait présenté (fig.4.2a) est une description partonomique de la structure du pont. Cette modélisation montre le squelette du modèle conceptuel de pont où : chaque composant majeur de première importance assure ses fonctions (mécaniques, de service, de protection, esthétiques…). Le fait qu'un composant majeur soit constitué d'autres sous parties : chacune des parties doit assurer tout ou partie des fonctions du composant père, de manière à ce que l'ensemble des parties corresponde au tout. La figure 4.2 (b) est un graphe de Fait qui met en exergue la description multi-niveaux des fonctions essentielles d'un pont. Nous montrerons au paragraphe 4.2 comment cette décomposition de système est exploitée

pour décrire les mécanismes de défaillances des composants sur des échelles d'études de choix. Cette décomposition d'ouvrage (fig.4.2) est vérifiée à travers la simulation de deux règles génériques : une règle à l'échelle de l'ouvrage (R4.1) et une règle à l'échelle de composant (R4.2).

Règle R4.1 : répartition des fonctions du pont à l'échelle de composant

> **Si** pont a pour rôle = fonction F« continuité du trafic »,
> Et si tablier et appui sont des composants majeurs de l'ouvrage,
> Et si pont est composé de tablier et de l'appui,
> Et si F a pour type, F1 = assurer le trafic et F2= stabiliser le pont,
> **Alors** tablier doit assurer F1 et appui doit assurer F2.

Nous précisions que F1 est une fonction de type ELS, et F2 de type ELU (voir tabl.3.9, chapitre3 §3.2.4.2).

Règle R4.2 : répartition des fonctions d'un composant à l'échelle des sous-composants

> **Si** C1, C2,…Cn = sous-composant du composant majeur de pont,
> Et si Fc1, Fc2…Fcn = fonction que chaque sous-composant doit assurer,
> **Alors** composant de pont doit assurer une fonction Fc au niveau supérieur.

Nous avons spécialisé la règle R4.2 en R4.2a pour décrire les fonctions du tablier et en R4.2b pour celles de l'appui. La figure 4.3 présente les résultats de simulations des règles R4.1 et R4.2a. La règle R4.2b est disponible en annexe 5 : (a) illustre les graphes de ces deux règles. (b) est le résultat de la simulation qui montre comment les fonctions d'un pont sont reparties à travers ses différents composants.

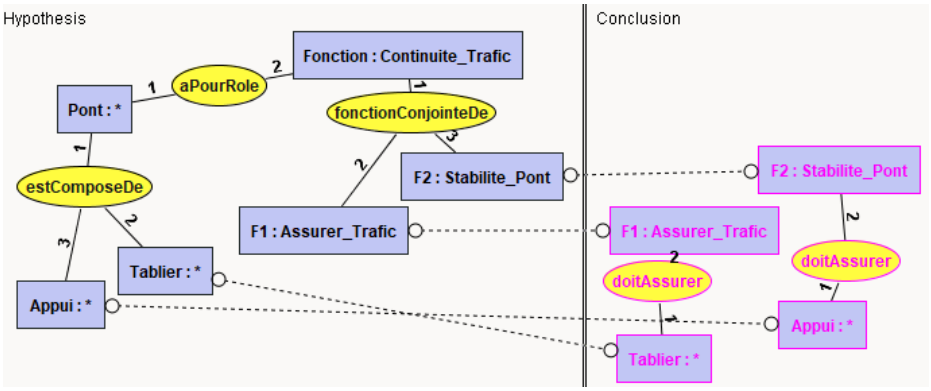


Figure 4.3a : *Graphe de règle de répartition des rôles de pont sur le tablier et l'appui*

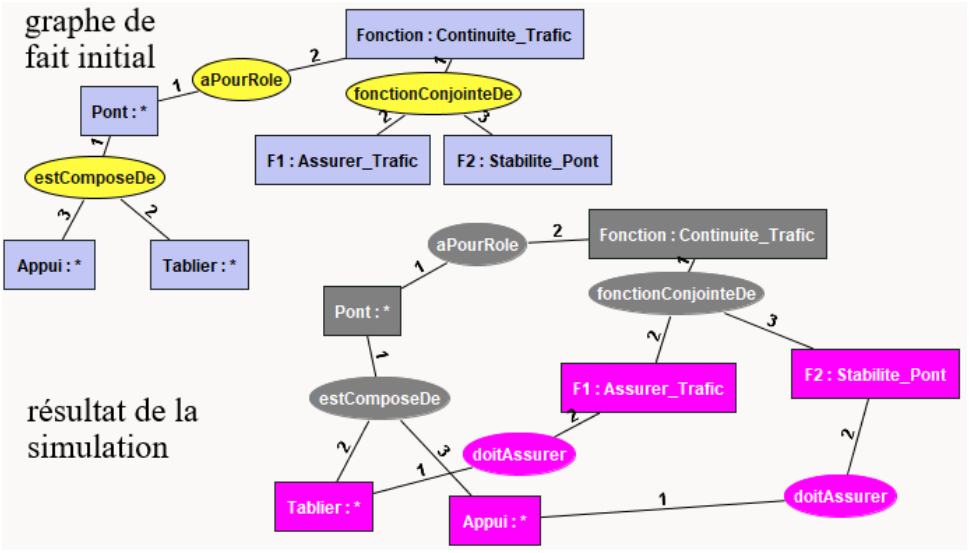


Figure 4.3b : *Modélisation fonctionnelle à l'échelle du pont et des composants*

Le premier graphe (figure 4.3b) est un graphe de Fait initial qui définit le pont sous forme de combinaison de composants (tablier et appui). Le deuxième graphe (figure 4.3b), présente la décomposition physique de l'ouvrage (ponts) en deux composants majeurs (tablier et appui) qui doivent communiquer pour remplir ses fonctions. La figure 4.4 est une illustration de la modélisation des fonctions des parties d'un tablier de pont : (a) présente le graphe de la règle R4.2a (décomposition des fonctions du pont au niveau du tablier), (b) illustre le graphe-Fait de simulation.

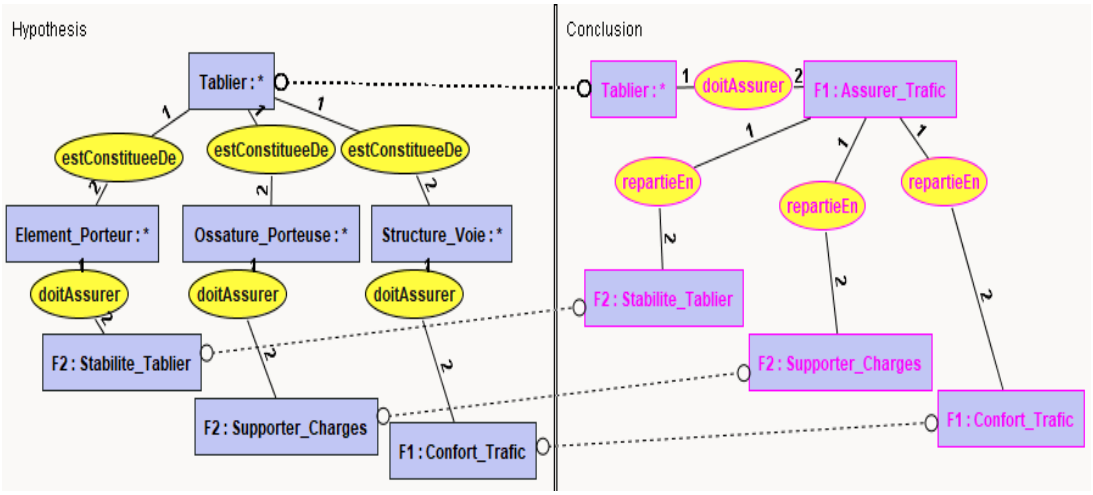


Figure 4.4a : *Graphe de règle R4.2a pour la répartition de la fonction du tablier*

La partie hypothèse (fig.4.4a) signifie que pour les trois grandes familles de ponts, un tablier est constitué au moins de trois sous-composants qui contribuent à sa fonction globale. La partie conclusion (fig.4.3a) illustre le Fait que la fonction d'un tablier de pont « assurer le trafic » soit repartie en trois sous-fonctions assumées par ses sous-composants. Ce raisonnement est matérialisé par le graphe de Fait simulé présenté sur la figure 4.4b.

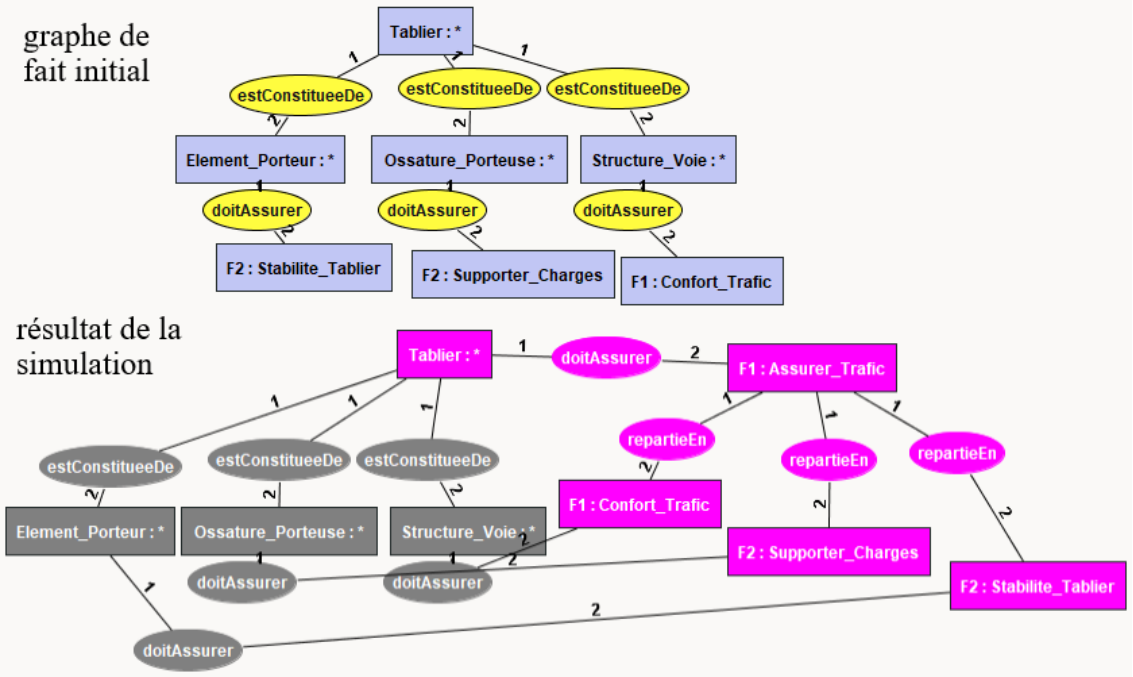


Figure 4.4b : *Graphes de Faits de répartition de la fonction du tablier de pont*

Le premier graphe (fig.4.4b) est un Fait initial qui modélise un tablier de pont en : élément porteur (i.e. poutre maitresse, câble porteur…), ossature porteuse (i.e. dalle, arc/voûte…), et structure de voie (i.e. chaussée et étanchéité sur la dalle de pont…). Le deuxième graphe (fig.4.4b) est une illustration de la simulation de la règle R4.2a sur le Fait initial. Il décrit la manière dont les fonctions d'un tablier de pont se communiquent au sein du système pour satisfaire à la fonction à l'échelle d'un composant.

Pour procéder à la description conceptuelle de mécanismes des cas de défaillance des ponts identifiés, nous présentons le cadre des règles expertes structurées pour réaliser les simulations numériques.

4.1.2-Cadre de règles expertes pour la simulation des facteurs de défaillance

La simulation des règles expertes à travers les deux sous modèles M2.1 et M2.2 issus du modèle global implémenté (fig.4.1) consiste au transfert des variables aléatoires pour aboutir à la réponse du modèle (M2). Cette réponse se traduit par le Fait particulier « situation de défaillance », où : Modèle M2 (environnement, système/composant) = FS.

Deux règles expertes relatives à la simulation du vieillissement des états d'ouvrages et à l'analyse fonctionnelle de composant de pont ont été illustrées au chapitre 2 (§2.5.2) et 3 (§3.4.1). Nous les complétons dans cette partie par deux classes de règles génériques nécessaires à la description des mécanismes de défaillance.

La première classe consiste en deux types de règles génériques pour la simulation de variables de facteurs de défaillance : (1) une règle experte pour estimer l'agressivité de

l'environnement et sa contribution au processus d'altération, (2) une règle experte pour la simulation des actions de processus d'altération sur les matériaux ou de détérioration des propriétés de composants d'ouvrages. La deuxième classe consiste en deux types de règles expertes qui permettent de décrire les mécanismes de défaillance d'un ouvrage à l'échelle locale et à l'échelle globale de système.

4.1.2.1- Règles expertes décrivant l'interaction environnement-processus d'altération

La règle R4.3a quantifie l'agressivité d'un environnement d'ouvrage existant. La règle R4.3b décrit de manière générique la contribution de l'environnement à un processus d'altération. Nous avons fait l'hypothèse qu'un environnement est défavorable lorsque les valeurs prises par ses facteurs dépassent une valeur attendue (ou calculée) vis-à-vis de l'état ou de la propriété d'un composant ou d'un ouvrage. Les variables de facteurs aléatoires de l'environnement sont prises en compte par le recours à des échelles ordinales et discrètes [TAI 11, BAR 11]. Pour chaque scenario de processus conduisant à la défaillance dans un pont, l'agressivité de l'environnement est quantifiée par la variable (α) qui s'obtient par la combinaison d'au moins deux facteurs d'agressivités (voir éq.12). Le tableau 4.1 donne les détails sur l'échelle retenue pour qualifier l'agressivité de l'environnement par rapport à la cinétique de processus d'altération (K) d'un composant d'ouvrages [ENR 99, QIN 03, TAL 06].

Tableau 4.1 : Echelle de corrélation des grandeurs α et K

Echelle numérique	Description des grandeurs	
	α (agressivité)	K (cinétique)
0	pas agressif	Nulle
0.5	agressivité faible	lente
1	agressivité moyenne	très lente
2	forte agressivité	Modérée
3	très forte agressivité	rapide
4	agressivité extrême	très rapide

La quantification de la valeur de α suivant chaque environnement d'interaction au système d'ouvrage repose sur la méthode dite des facteurs d'après ISO 15686 [ISO 1] citée dans [TAL 06] :

α = facteur d'agresivité_Ag.a **x** facteur d'agresivité_Ag.b **x**… (12)

Cette équation est une formule générale pour quantifier la valeur d'alpha. Le tableau 4.2 présente les échelles de valeurs des facteurs d'agressivité (a, b) pour tenir compte des conditions climatiques et/ou d'usage des ouvrages en cours d'exploitation [TAL 06, ROE 01].

Tableau 4.2 : Echelles d'interaction entre les facteurs d'agressivité (a, b)

Echelle d'intervalle des facteurs a et b (notes d'alpha,α)	Cas des facteurs d'agressivités (HR, Te)	Effets sur l'environnement d'ouvrages
1	10< Te < 20°C, HR< 20%	effet faible
2	20 <Te < 40°C, 20<HR≤ 40%	effet défavorable
3	40<Te < 80°C, 40<HR≤ 70%	effet très défavorable
4	80<Te≤100°C, 70≤HR≤ 100%	aléa extrême

Les facteurs d'agressivité (a, b) (i.e. température, humidité relative, vitesse de trafic…) sont introduits dans chaque règle experte correspondante au processus d'altération modélisé. Les notes d'échelles indiquées sur le tableau 4.2 (première colonne) correspondantes aux valeurs réelles (voir l'exemple, colonne au milieu du tableau). Nous renvoyons le lecteur dans [TAL 06, ISO 05] pour plus de détails sur l'application de la méthode des facteurs et dans [TAI 11, BAR 11] sur l'utilisation des échelles de calcul en modélisation d'ouvrages.

Règle générique R4.3a : évaluation de l'agressivité de l'environnement

Si α = agressivité de l'environnement,
Et si *i* = valeur critique d'alpha (α),
Et si facteurs a et b décrivent (α),
Et si valeur de la combinaison des facteurs a et b > *i,*
Alors l'environnent a une agressivité et α = f (a,b).

La règle générique R4.3b écrite ci-après matérialise le lien de contribution de l'environnement à la cinétique du processus d'altération.

Règle R4.3b : contribution de l'environnement à un processus d'altération

Si α= agressivité de l'environnement,
Et s'il existe un processus d'altération de cinétique = K
Et si cet environnement interagit avec ce processus,
Alors cet environnement contribue au processus K= f(α).

Nous illustrons l'intérêt de ces deux règles sur trois processus potentiels d'altération : processus de corrosion (acier), processus d'affouillement de berges d'appui et le choc de véhicule sur les composants de pont.

- *Contribution de l'environnement au processus de corrosion (acier)*

Le processus de corrosion est l'un des processus potentiels identifiés sur les cas de défaillance des ponts en milieu tropical (voir chapitre 3, partie 2). Le processus de corrosion modélisé dans cette application est celui lié à l'altération des composants de pont en acier

(métalliques) sous les effets de l'agressivité de l'air naturel. Il est décrit par l'augmentation des facteurs contributifs température «Te » et humidité relative « HR » [PHI 98, STR 90, GRA 90]. L'action d'un tel processus au cours du temps se traduit par un changement de propriété de matériaux (résistance, module) : perte de protection (immunité), diminution de résistance. L'agressivité de l'environnement « air » vis-à-vis de ce processus de corrosion est modélisée par la formule (éq.13) :

$$\alpha = f(HR,Te) \qquad (13)$$

La règle R4.3a spécialisée pour décrire le processus de corrosion s'écrit :

R4.3a$_1$: estimation de l'agressivité de l'air vis-à-vis du processus de corrosion

> Si α quantifie l'agressivité de l'air,
> Et si α = f(HR,Te) > i (i= 0.5, 1.5, 2, 3),
> Alors l'environnement (air) est agressif et α = valeur de (HR,Te).

La figure 4.5 illustre les graphes des règles R.4.3a' et R4.3b'.

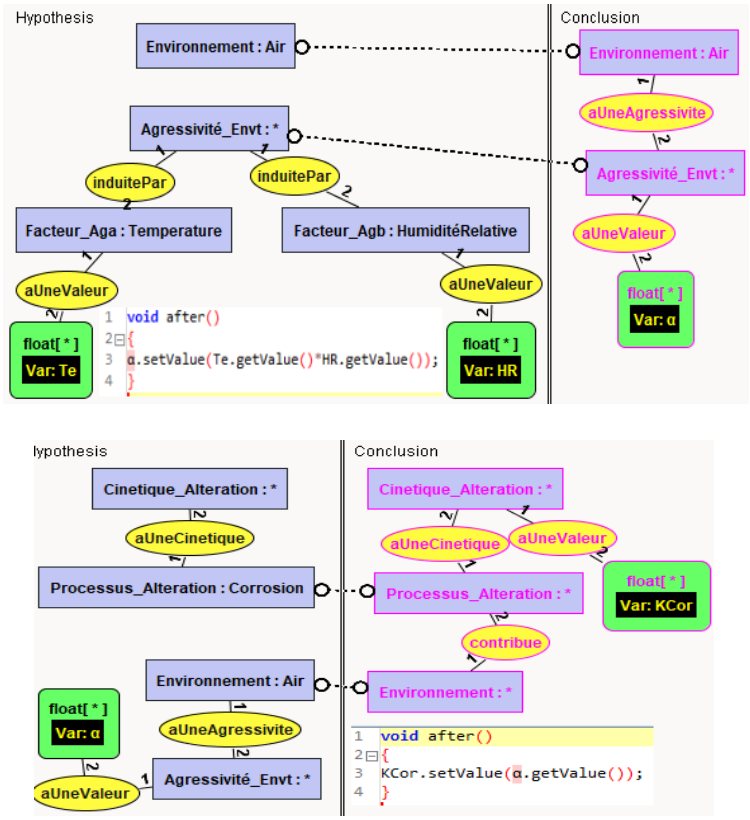
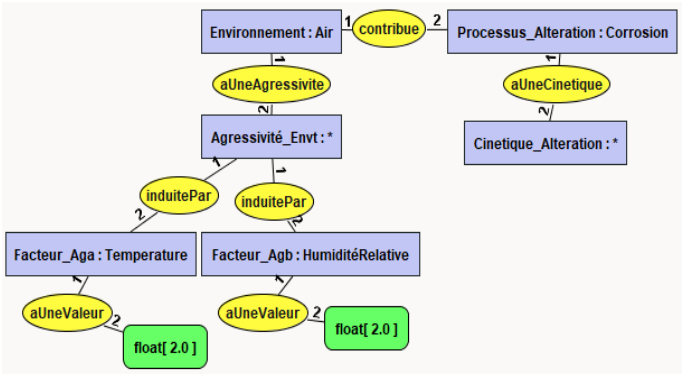


Figure 4.5 : *Graphes des règles, R4.3a' et R4.3b' appliquées au processus de corrosion*

La figure 4.6 présente le cadre de simulation du fait (environnement-processus de corrosion) : (a) graphe initial et (b) graphe de fait simulé. L'action des facteurs HR et Te est considérée comme extrême (HR*Te = 4), ce qui correspond à la contribution au niveau 2 de l'échelle d'intervalle pour chacun des facteurs HR et Te. Les scores pour chaque facteur sont calculés d'après les procédures d'évaluation de risque dans la norme ISO/CEI 31010 [ISO 09].

(a) graphe de fait initial : environnement contribue à la corrosion



(b) graphe de fait simulé

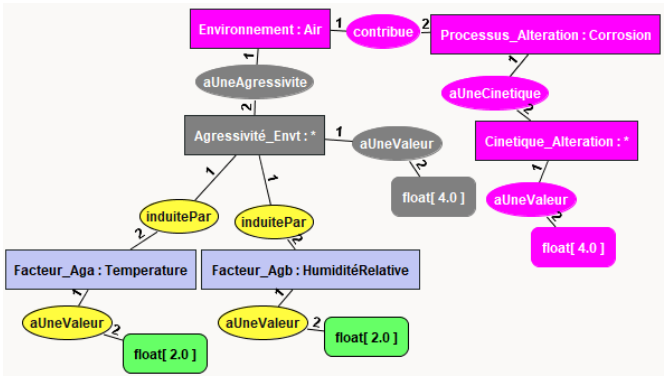


Figure 4.6 : *Graphe de simulation, (a) fait initial, (b) fait simulé de la contribution de l'air au processus de corrosion*

Le résultat de la simulation sur la figure 4.6 montre que la manifestation du processus de corrosion est activée par l'action de l'environnement « air ». $\alpha = 4$ représente l'action extrême de la température et de l'humidité relative vis-à-vis du processus de corrosion (valeur de cinétique KCor = 4).

- *Contribution de l'environnement au processus d'affouillement de berges de pont*

L'affouillement de berges (rivière) de pont est un processus d'érosion externe qui consiste en l'extraction et à l'entraînement de particules de massif de sol/fondation de l'appui sous l'action du courant d'eau. Le scénario de propagation de ce processus d'affouillement est complexifié par l'implication de plusieurs facteurs/paramètres qui peuvent être couplés [MAD 12, HON 12]. La description de la dégradation de l'interaction entre le massif de sol de

fondation d'un pont et ses appuis vis-à-vis de l'affouillement fait référence aux discussions dans [HAB 84, PLA 98]. Dans cette modélisation, ce processus est décrit par deux facteurs qui mesurent son agressivité vis-à-vis de la fonction de stabilité horizontale des appuis de pont : la vitesse du courant d'eau (V_i) et la hauteur des crues (h_{cr}). L'agressivité de l'environnement « rivière » par rapport à ce processus d'affouillement déterminée par la formule suivante (éq.14) :

$$\alpha = f(V_i, h_{cr}) \qquad (14)$$

La règle R4.3a spécialisée pour structurée l'équation (14) est réécrite comme suit :

R4.3a$_2$: agressivité d'une rivière vis-à-vis du processus d'affouillement de berges

> Si α quantifie l'agressivité d'une rivière (crues)
> Et si $\alpha = f(V_i, h_{cr}) > i$ (valeur critique),
> Alors la rivière est agressive et α = valeur de (V_i, h_{cr}).

La figure 4.7 illustre le cadre de simulation pour décrire la contribution de l'environnement « rivière » au processus d'affouillement local : (a) graphes conceptuels des règles, (b) graphe-Fait initial et (c) résultat de la simulation.

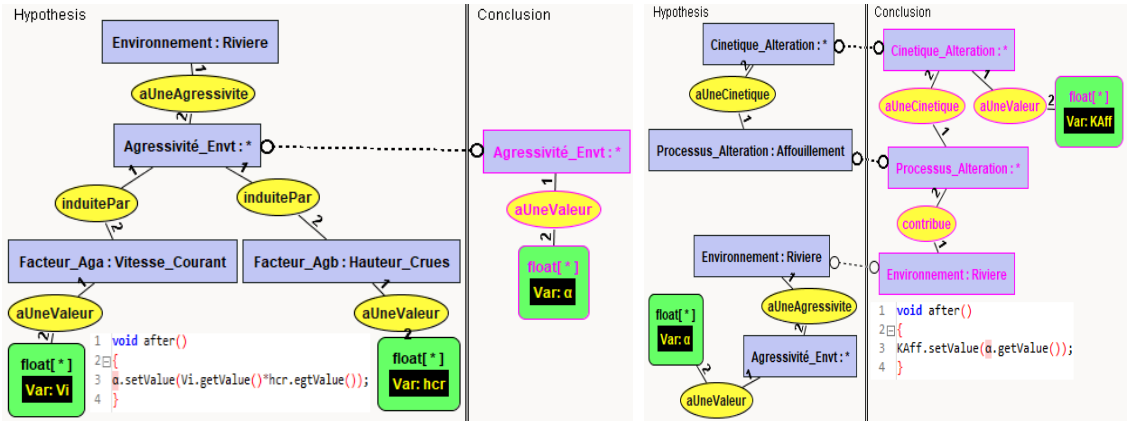


Figure 4.7a : *Graphe des règles expertes pour simuler le processus d'affouillement*

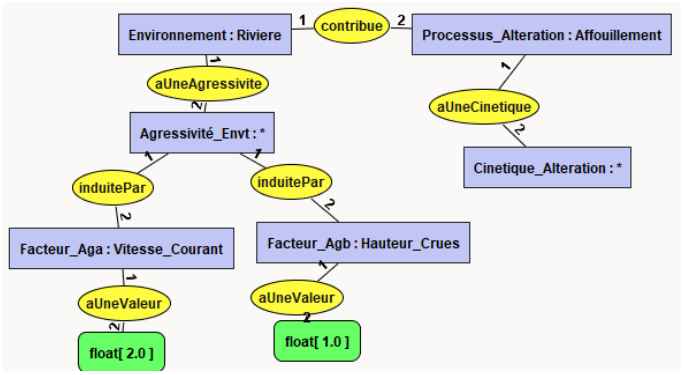


Figure 4.7b : *Graphe de fait initial la rivière contribue à l'affouillement*

La figure 4.8 montre le résultat de la simulation des règles R4.3a" et R4.3b".

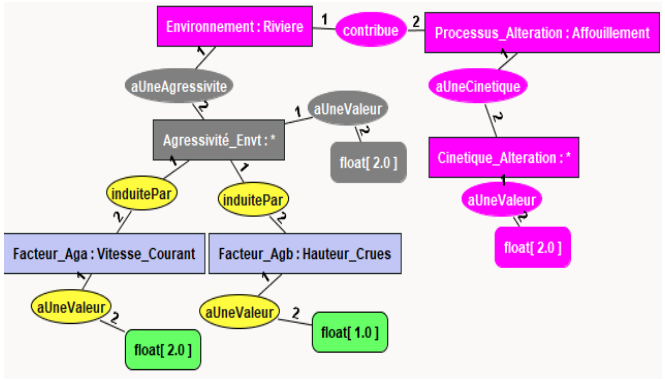


Figure 4.8 : *Graphes de fait particulier rivière contribue à l'affouillement*

Le graphe fig.4.8 se traduit par le fait que la combinaison vitesse de courant d'eau et la hauteur de crue déclenche le processus d'affouillement local « de cinétique KAff = 2 » lorsque certaines conditions sont réunies : présence d'un appui de pont en rive, vitesse excessive de courant d'eau, variation ou non de la hauteur de crue maximale. L'action de crues est quantifiée selon la hauteur et la vitesse du courant d'eau [BRE 00] : pour une hauteur d'eau hcr < 0m50, Vi≤0m5 (faible vitesse du courant d'eau) et hcr*Vi = 1 ; 0m50<hcr≤1m et 1<Vi≤2, vitesse (moyenne) et hcr*Vi = 2 ; 1m≤hcr ≤ 2m, Vi≤ 3 (vitesse de courant d'eau forte) et hcr*Vi= 3…

▪ *Contribution de l'environnement au processus brutal «choc»*

Le choc d'un véhicule ou d'un navire sur un composant de pont (pile, tablier) est considéré comme un processus brutal du point de vue de ses effets mécaniques. Ce processus accidentel consiste en une force d'impact considérable qui agit sur une zone réduite de contact et peut introduire une pression locale importante dans la structure d'ouvrage [BAI 00, FAN 01, MAD 13, XU 13]. La manifestation de cette pression induite se traduit souvent par différents modes de défaillances : perforation, déformation importante du composant ou de la structure. Les facteurs d'agressivité de l'environnement liée à ce processus sont principalement

la vitesse du véhicule/navire au point de contact (Vr en m/s), le poids de l'objet chargé « véhicule, navire…» (DWT en tonnes). Dans le code AASHTO LRFD [AAS 12, SAY 13], la charge d'impact statique équivalente (Ps en KN) qui caractérise l'agressivité de l'environnement (navire, véhicule) est calculée comme suit :

$$Ps = 0{,}556*Vr*[DWT]^{1/2} \qquad (14)$$

Avec Ps = α (agressivité de l'environnement). La règle R4.3a dans ce contexte s'écrit :

R4.3a''' : contribution de collision au processus de choc

> Si trafic a une agressivité α induit par la vitesse du trafic Vr et le poids des éléments du Trafic DWT,
> Et si $\alpha = 0{,}556(Vr, [DWT]^{1/2}) > i$
> Alors $\alpha = 0{,}556*Vr*[DWT]^{1/2}$

La figure 4.9 présente le format conceptuel de ce raisonnement (règles R4.3a''', R4.3b'''). La figure 4.11 illustre le résultat de la simulation du Fait générique « l'impact du trafic contribue au choc sur un composant d'ouvrage » : (a) montre le graphe de Fait initial et (b) donne le résultat de la simulation.

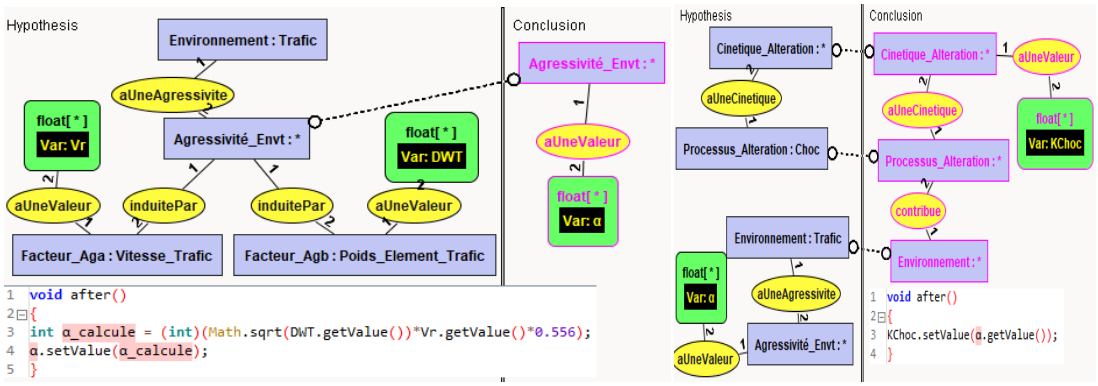
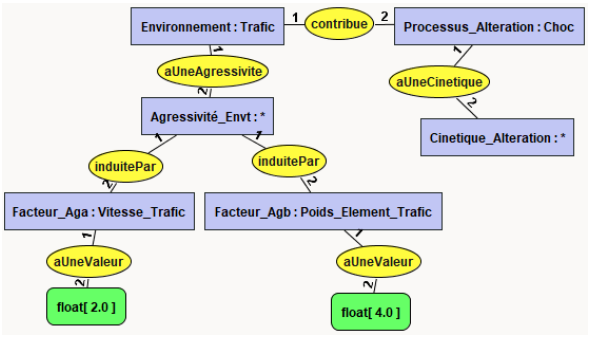


Figure 4.9 : *Graphes de règles d'estimation de l'agressivité due à l'impact de collision*

L'inférence de ces deux règles est illustrée sur la figure 4.10, où (a) présente le graphe de Fait initial (collision→ choc) et (b) donne le résultat de la simulation. L'agressivité de trafic (véhicule) sur les composants d'un pont est quantifiée par la modalité (classe du poids lourds/jour et sa vitesse) [VAS 05]. Exemple : modalité «T2 », faible agressivité, classe de trafic allant des intervalles 0 à 10 PL/jour et 25 à 50PL/jour (Ps=1). Modalité «T0», forte agressivité, classe de trafic allant de 150 à 300PL/jour (Ps=3), etc. La quantification des facteurs DWT et Vr sont quantifiés sous forme d'une partie entière par la formule logique des Graphes Conceptuels (int) (Math.sqrt).

(a) graphe de Fait initial



(b) résultat de la simulation des règles R4.3a"' et R4.3b"'

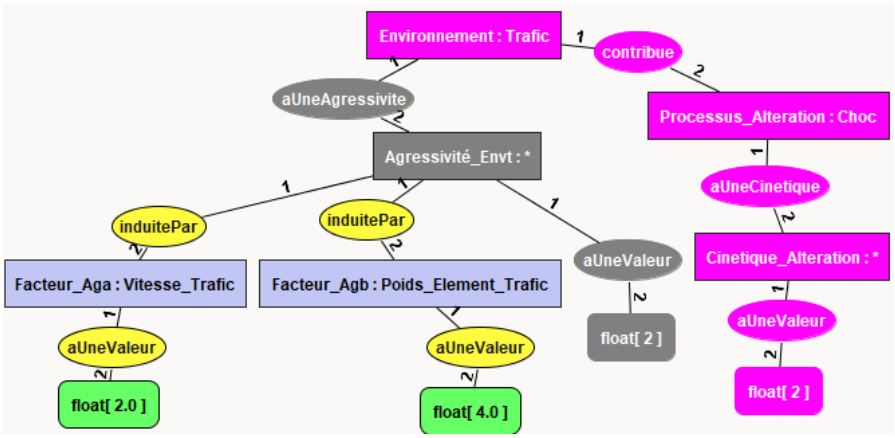


Figure 4.10 : *Graphe, (a) fait initial, (b) résultat de simulation du choc de trafic*

Le graphe de Fait (fig.4.10b) quantifie l'agressivité de trafic (véhicule, navire) vis-à-vis d'un composant de pont lorsqu'une erreur humaine se produit (collision).

4.1.2.2- Règles expertes évaluant le changement de propriété caractéristique de matériau

La règle R4.4 détermine les effets variables de processus d'altération sur la capacité du matériau d'un composant. Elle repose sur la loi d'altération de matériau due à la propagation d'un processus progressif au cours du temps (équation 7, chapitre 1, §1.4). Comme nous l'avons signifié au chapitre 3 (§3.4.3), la simulation de cette règle sur un modèle de simulation de défaillance à l'échelle du composant permet de quantifier le degré de performance résiduelle du composant d'ouvrage étudié. Pour le cas particulier de processus brutal (choc), la réponse mécanique du composant dans ce contexte est estimée par la règle R4.5 en négligeant l'effet de temps. Ces deux règles décrivent le lien binaire processus « altère » matériau, et s'écrivent :

Règle R4.4 : influence de l'agressivité du processus d'altération sur le matériau

Si Kt = cinétique du processus d'altération au temps t,
Et si m= matériau d'un composant,
Et si t = 0, r (t_0) = r_0 = propriété initiale de ce matériau,
Et si ce processus altère ce matériau,
Alors après delta t, r(t) = r_0-K*(t_0+dt).

Règle R4.5 : influence d'un processus brutal sur la propriété d'un composant

Si K = cinétique du processus brutal,
Et si p_0 = propriété initiale du composant d'ouvrage,
Et si ce processus consiste en un événement sur ce composant,
Alors après événement, la propriété du composant, p= p_0-K.

Nous montrerons l'application de ces deux règles expertes sur des cas spécifiques de simulation de mécanisme de défaillance dans ce chapitre (partie 2).

4.1.2.3- Règles expertes décrivant les mécanismes de défaillance d'un composant de pont

Nous avons montré au chapitre 3 (§3.4.3) qu'un composant d'ouvrage est dans une situation de défaillance lorsque son état de sûreté a une note inférieure à «1». Afin de décrire les scénarios de mécanisme de défaillance d'un pont à l'échelle locale (composant) et sur l'ensemble de l'ouvrage, nous avons structuré trois règles génériques : Les règles R4.6 et R4.7 illustrent deux configurations de l'hypothèse selon laquelle la défaillance (locale ou globale) d'un système peut être engendrée lorsqu'une ou toutes les fonctions assurées par ses composants majeurs sont perdues.

Règle R4.6 : lien entre défaillance de composant et défaillance locale de l'ouvrage

Si pont a pour rôle F= continuité du trafic,
Et si tablier = composant de pont,
Et si tablier a pour fonction F1= assurer le trafic,
Et si F1 doit contribuer à F,
Et si tablier est dans une situation de défaillance,
Alors F non satisfaite et défaillance partielle du pont.

Règle R4.7 : lien entre défaillance locale et globale de l'ouvrage

Si pont a pour composants = tablier et appui, Et si pont a pour rôle F= continuité du trafic, Et tablier a pour fonction F1= assurer le trafic, Et si appui a pour fonction F2= stabiliser le pont, Et si F1 et F2 contribuent à F, Et si tablier ou appui est dans une situation de défaillance, Alors F non satisfaite et défaillance globale du pont.

A partir de l'ensemble de règles présentées dans cette partie et de celles déjà exploitées aux chapitres précédents, nous procédons maintenant à des simulations de scénarios de mécanismes de défaillance.

4.2- Cadre de simulation déterministe de mécanismes de défaillance

Deux catégories de simulations ont été nécessaires pour décrire les scénarios de mécanismes de quelques cas de défaillances identifiées (chapitre 3, §3.2.3). La première catégorie de simulations concerne la description des mécanismes de défaillance à partir des modes de défaillance identifiés (processus soudains). La deuxième catégorie de simulation est celle relative au mécanisme de défaillance résultant de l'altération progressive de matériau/composant. Pour considérer les variables aléatoires dans la simulation, nous avons retenues trois types d'échelles d'études :

- échelle d'altération : A= 0 « bon étant », A=1 « altération légère », A=2 « altération modérée », A=3 « altération alarmant » et A=4 « altération critique ».
- échelle de changement de géométrie : p= 0 « pas de modification », p= 1 « modification », p= 2 « modification critique »
- échelle de sévérité de mode de défaillance : mF= 0 « non actif », mF=1 « actif », mF=2 « excessif », mF=3 « très excessif ».

4.2.1-Description de mécanisme de modes défaillance liée à un processus brutal

4.2.1.1- Echappement du tablier d'un pont à travées isostatiques

L'échappement de tablier de pont à travées indépendantes de ses appuis dans le sens longitudinal est un dysfonctionnement souvent observé lorsque le pont est soumis à un choc brutal. Ce mode de défaillance une fois activé à l'échelle du tablier ou de l'appui se traduit généralement par une défaillance globale du pont qui ne peut plus assurer la fonction de continuité du trafic.

La règle R4.7 exploitée dans ce contexte est traduite comme suit :

Règle 4.7a : dysfonctionnement de la fonction de continuité : tablier-appui

Si type d'ouvrage = pont à poutres isostatiques,
Et si ce pont a pour composants = tablier et appui,
Et si pont a pour rôle F= continuité du trafic,
Et si tablier a pour fonction F1= assurer le trafic,
Et si appui a pour fonction F2= stabiliser le pont,
Et si choc sur appui ou sur tablier,
Et si déplacement de tête d'appui > déplacement acceptable,
Alors F (ELU) n'est pas satisfaite et défaillance globale du pont.

La figure 4.11 illustre le cadre de simulations de ce mécanisme de défaillance à partir du modèle M2.1 (processus brutal). La figure 4.11 montre un dessin de tablier en cours d'échappement. La règle complète de simulation du Fait initial est disponible en annexe 5. La figure 4.12 (a, b) présente le graphe de Fait initial du tablier de pont isostatique (non défaillant) et la règle codée (informatique) pour la simulation. Trois simulations ont été réalisées pour les cinétiques K= 2, K = 3 et K= 4.

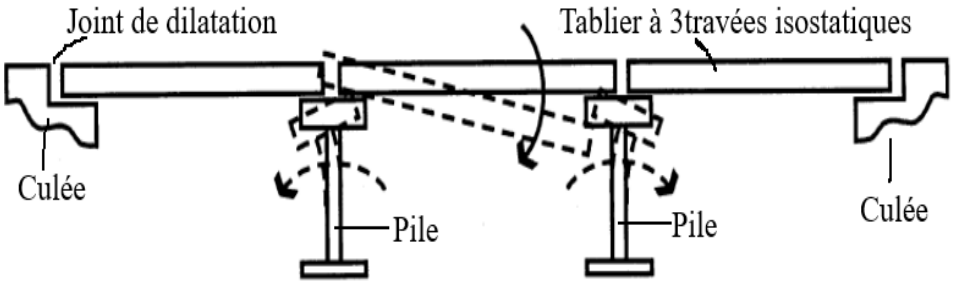
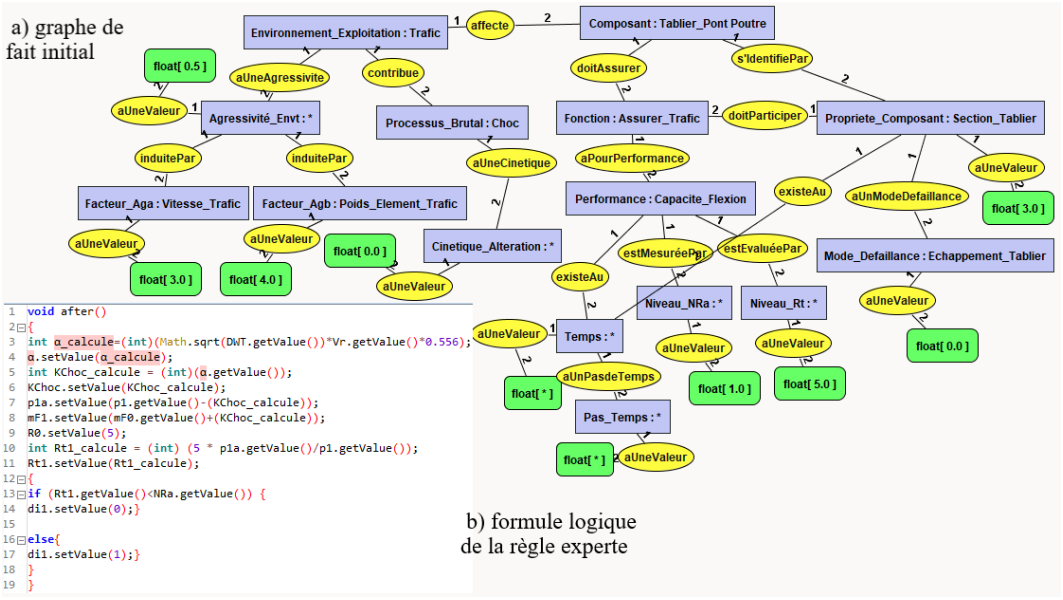


Figure 4.11 : *Extrait du dessin d'échappement du tablier* [KIB15]

Le schéma à gauche (fig.4.11) montre un mécanisme d'échappement d'un tablier de pont à poutres isostatiques. La perte de continuité sur le pont dans ce cas se traduit par une chute ou la rupture du tablier au niveau des piles (côté gauche ou droit) suite à un événement brutal (chargement thermique excessif, collision de trafic sur le tablier ou sur la pile…). Ce mode de défaillance du tablier (échappement) peut aussi être activité du fait de l'instabilité de la pile suite à un mouvement de terrain d'ouvrage comme insisté par les auteurs [KIB 15]. La performance évaluée concerne la fonction conjointe du tablier « assurer le trafic : continuité, support de charge ». La figure 4.12 est un cadre graphique qui formalise ce mécanisme de défaillance.




```
void after()
{
int α_calcule=(int)(Math.sqrt(DWT.getValue())*Vr.getValue()*0.556);
α.setValue(α_calcule);
int KChoc_calcule = (int)(α.getValue());
KChoc.setValue(KChoc_calcule);
p1a.setValue(p1.getValue()-(KChoc_calcule));
mF1.setValue(mF0.getValue()+(KChoc_calcule));
R0.setValue(5);
int Rt1_calcule = (int) (5 * p1a.getValue()/p1.getValue());
Rt1.setValue(Rt1_calcule);
{
if (Rt1.getValue()<NRa.getValue()) {
di1.setValue(0);}

else{
di1.setValue(1);}
}
}
```

Figure 4.12 : *Graphe, (a) fait initial du mécanisme d'échappement, (b) règle codée*

La figure 4.13 illustre le graphe de Fait de défaillance de ce tablier (configuration 2 de simulation). Les variables d'entrée sont : $\alpha = 0.5$, K= 0, Vr = 3, DWT = 4, $mF_0=0$, $p_0=3$. Les valeurs de sortie sont : α et K quantifiées, p, mF déduit, Rt et di déduit à travers la simulation de la règle experte.

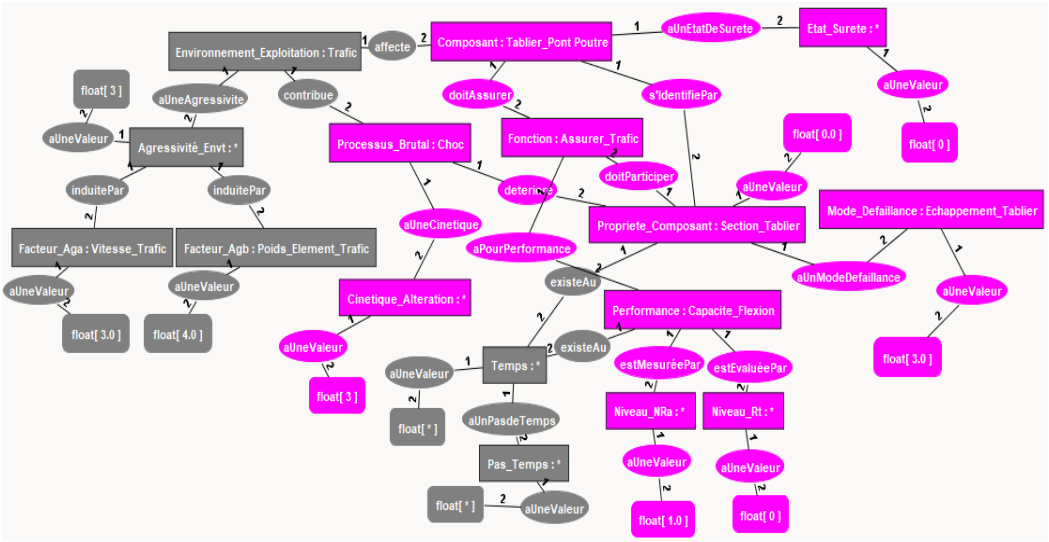


Figure 4.13 : *Graphe de fait de défaillance par échappement de tablier de pont poutres*

La partie gauche du graphe (couleur noir) décrit l'agressivité du trafic qui s'est manifestée à travers un processus soudain (choc) sur le tablier du pont examiné. La partie droite du graphe (couleur violette) montre la situation de défaillance par échappement du tablier. Ce mode de défaillance activé par un choc a conduit à la rupture (perte de l'équilibre

statique du tablier. La figure 4.14 présente deux courbes (dans un même format) pour expliciter de quelle manière le tablier modélisé a perdu ses performances (fonctions).

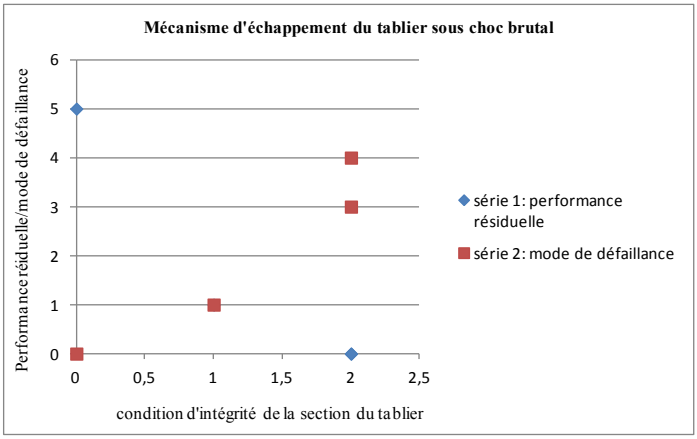


Figure 4.14 : *Perte de performance d'un tablier sous l'action d'un choc de trafic*

La figure 4.14 résume le résultat des deux simulations réalisées en intégrant les valeurs d'échelles des variables impliquées dans le mécanisme d'échappement du tablier. Le tableau 4.3 donne une synthèse de ces valeurs (fig.4.14) : la série 1 est la courbe de diminution (résiduelle) de performance. La série 2 est la manifestation de l'échappement du tablier pour trois impacts distincts du choc par rapport à sa section transversale (tablier).

Tableau 4.3 : Synthèse des valeurs d'échelles des variables de simulation

	Configuration 1	Configuration 2
processus : choc véhicule	$\alpha = 0.5$, K= 0, Vr = 2, DWT = 4, R_0=5, NRa = 1, p_1=3, mF_0=0	$\alpha = 0.5$, K= 0, Vr = 3, DWT = 4, R_0=5, NRa=1, p_1=3, mF_0=0
agressivité transformée α	2	3
Cinétique réelle Kchoc	2	3
Capacité section de tablier	1	0
Niveau de perf. Rt1	5	0
Etat de sûreté di1	1	0
Mode de défaillance mF_1	2	3

La deuxième ligne du tableau contient les données d'entrée de calcul des variables. La première configuration de simulation correspond au cas où le tablier subissait des chocs sans toutefois être complètement déformé (état de sûreté étant néanmoins également au niveau minimum acceptable de performance NRa =1, pour une cinétique modérée du choc KChoc = 2). La deuxième configuration est celle où le tablier s'est déformé de manière significative en s'échappant de ses appuis (voir fig.12) suite à l'augmentation de la vitesse du véhicule.

Dans ce contexte, le tablier ayant perdu complètement ses performances suite à une cinétique rapide ou très rapide (KChoc =3 ; Kchoc =4) se trouve dans une situation de défaillance partielle (rupture de l'équilibre statique, évolution du mode de défaillance mF « tablier » = 3, et mF= 4).

Cette procédure de modélisation des effets de choc sur un tablier de pont est aussi applicable à la description d'autres mécanismes de défaillance soudaine dans un pont, mais qui ne sont pas modélisés ici : choc de pile à avec déformation de sa tête et échappement de tablier, déplacement inacceptable d'appui suite à l'instabilité de sa base et déformation du tablier, etc. Nous montrons maintenant comment se produit la défaillance globale d'un pont à poutres isostatiques suite à la défaillance partielle d'un tablier ou d'un appui.

4.2.1.2- Mécanisme de défaillance globale de pont à poutres à travées isostatiques

Nous faisons l'hypothèse selon laquelle la défaillance globale (structurelle) d'un système d'ouvrage (pont) fonctionnant en série est provoquée par celle de l'un de ces deux composants majeurs (tablier ou appui) [SAY 13, BJO 15]. La figure 4.16 consiste en un graphe synthèse de ce mécanisme de défaillance : perte de continuité, donc de l'aptitude au franchissement d'obstacle (fonction ELU, ELS). La défaillance globale du pont sous l'action du choc de tablier se traduit par l'effondrement de la travée. Les notes des états à l'échelle globale du pont sont obtenues par l'application de l'opérateur moyen des notes d'états des composants (i.e. état de sûreté d= (di1+di2)/2). Le graphe de la règle est disponible en annexe 5.

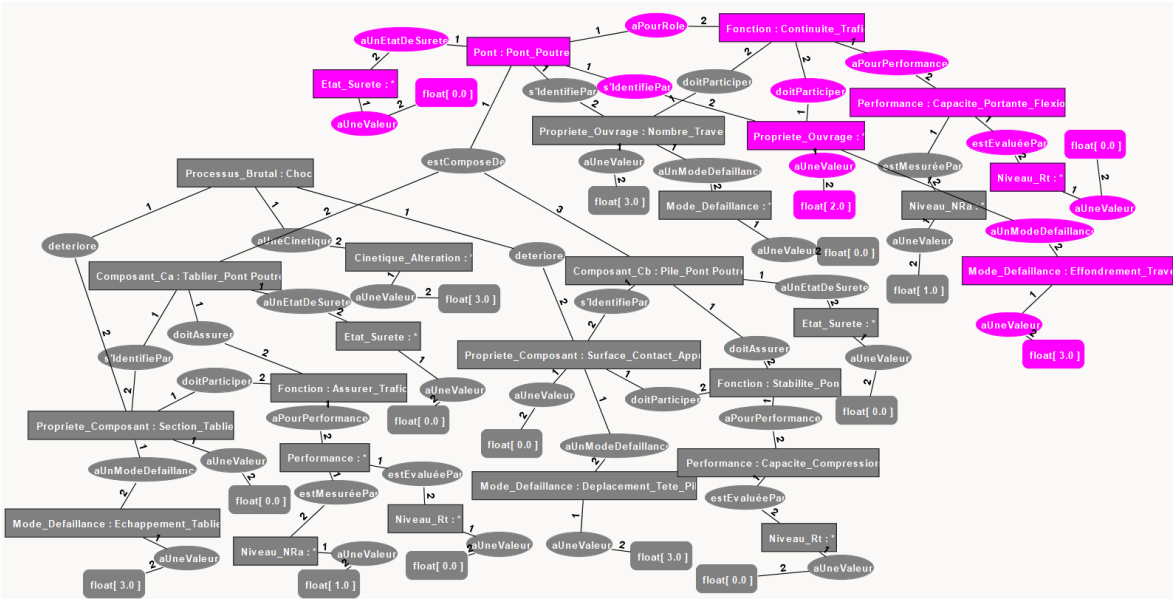


Figure 4.15 : *Graphe de fait de défaillance globale du pont sous l'action du choc*

La défaillance à l'échelle globale du pont à poutres isostatiques (fig.4.15) sur ce graphe signifie que l'échappement du tablier a également eu une répercussion sur l'appui (ici, déformation de la surface de contact de la tête de l'appui.

Nous avons montré à travers ces illustrations (§4.1.3.1…4.1.3.2) comment un pont à poutres à travées isostatiques peut se trouver en défaillance globale sous l'action d'un choc soudain. Le stockage de ce graphe de Fait sous forme de connaissance factuelle va permettre de rechercher les raisons de défaillance d'autres ponts impactés par ce mode de défaillance (partie 3). Nous avons également noté au chapitre (§3.2) que la défaillance d'un pont résulte de la conjonction de l'altération physique de matériau et des défauts mécaniques (mode de défaillance lié aux états limites de fonction). Nous illustrerons au paragraphe (§4.3) les simulations relatives à la description des processus de corrosion et d'affouillement qui sont identifiés comme facteur potentiel de dégradation de matériau/composant en amont de l'action du choc. Avant cela, nous illustrons dans ce qui suit un extrait de mécanisme de mode de défaillance pour le pont arc (culée) et le pont suspendu (câble porteur).

4.2.1.3- Illustration de mécanisme de mode de défaillance de culée de pont arc

Le mode de défaillance modélisé dans cette partie concerne le déplacement inacceptable d'une culée de pont arc voûté de maçonnerie ou de massif de béton. Ce mode de défaillance activé le plus souvent par le mouvement de culée est lié à la fonction de sécurité de la culée et de l'ouvrage. Deux règles construites à partir des illustrations précédentes sont nécessaires pour simuler le mécanisme de déplacement de culée de pont arc. La figure 4.16 présente le graphe de Fait initial et la figure 4.17 illustre le résultat de la simulation en deux étapes. Les graphes des deux règles expertes simulées sont disponibles en annexe 5.

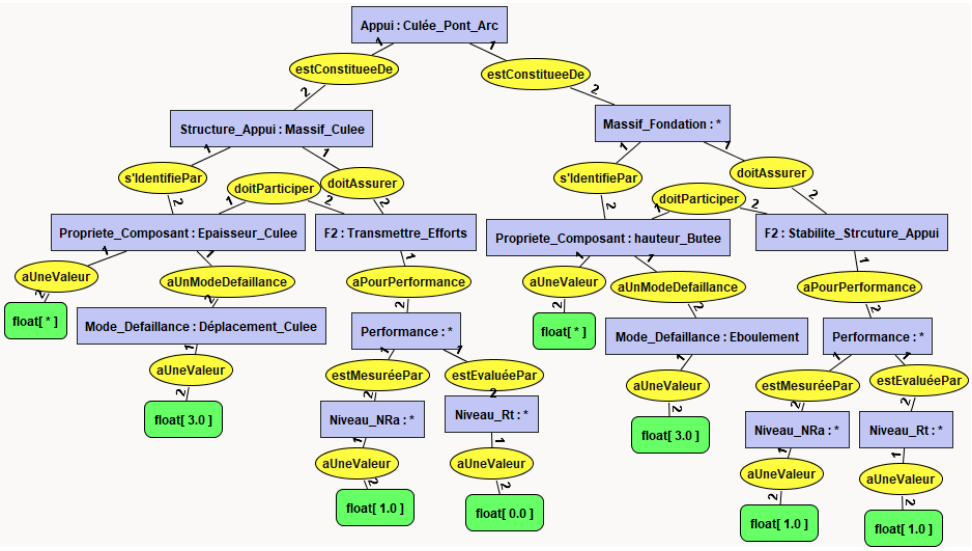
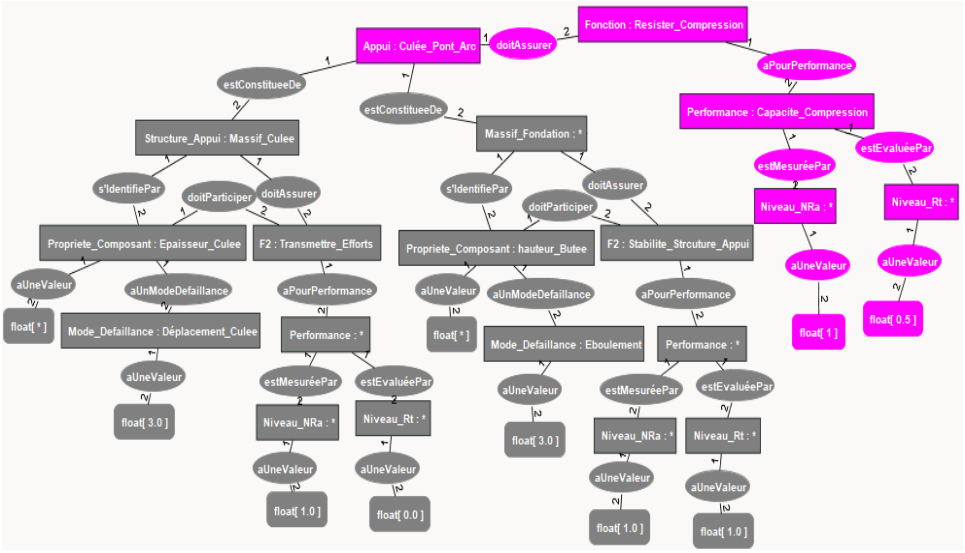


Figure 4.16 : *Graphe de fait initial décrivant le mode de défaillance d'une culée*

(a) graphe de fait simulé : évaluation de la performance de la culée



(b) graphe de fait simulé : défaillance de la culée

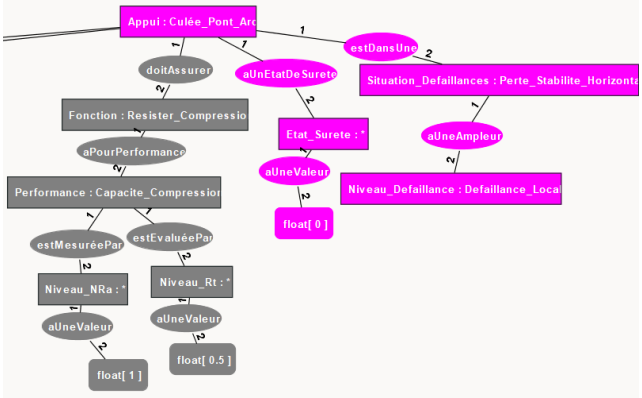


Figure 4.17 : *Extrait de graphe de fait de perte de stabilité de culée de pont arc*

Le graphe (fig.4.17) décrit un mécanisme élémentaire de défaillance par l'existence de déplacement horizontal d'une culée de pont arc. Ce mécanisme est décrit par deux modes de défaillance associés à la fois au massif de culée (structure d'appui) et au massif de fondation (sol d'approche) : déplacement inacceptable du massif de culée qui peut résulter d'un trop grand effort de pression de terrain. Un éboulement de sol de massif de fondation résulte généralement de l'érosion du sol. Nous allons montrer à la partie 2 comment un processus d'affouillement de sol altère les performances de composants.

4.2.1.4- Illustration de simulation d'un mécanisme de défaillance de tablier suspendu

Un des modes de défaillance de tablier de pont suspendu est l'instabilité de l'ossature porteuse suite à la perte d'un des câbles de suspente qui assurent la liaison entre le câble porteur et cette ossature. Le déclenchement de ce mode de défaillance consiste en la perte de

la fonction ELU (assurer le trafic) du tablier suspendu. La figure 4.18 montre le cadre de simulation du scénario de manifestation de ce mode de défaillance.

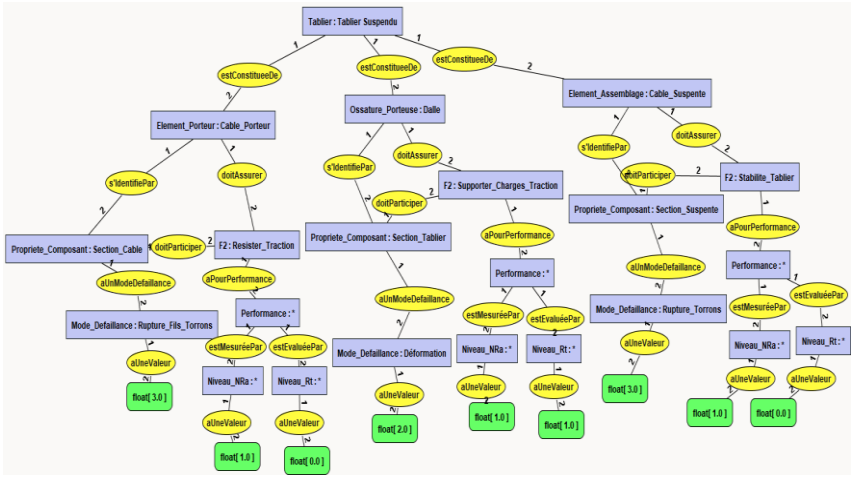


Figure 4.18a : *Fait initial pour décrire le mode de défaillance de tablier suspendu*

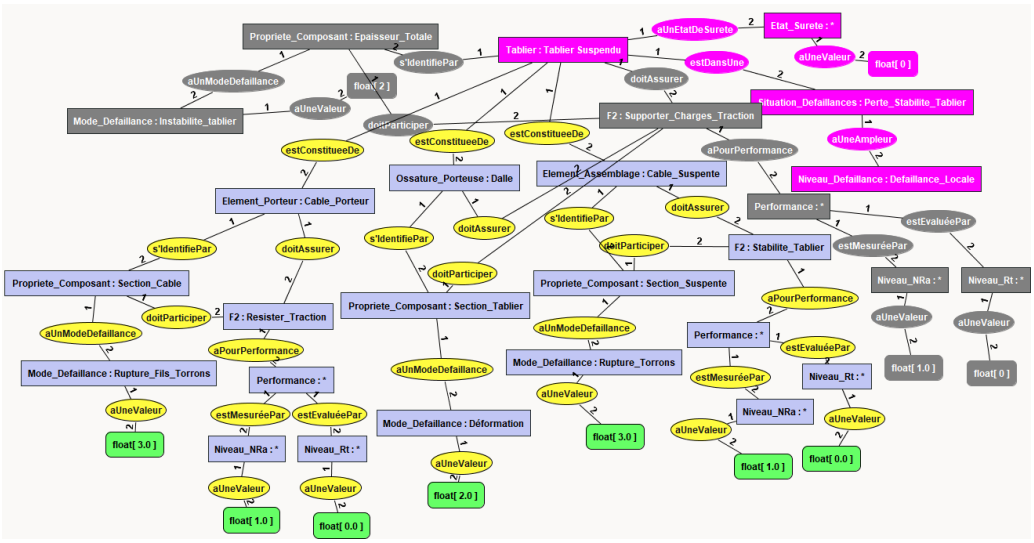


Figure 4.18b : *Graphe de Fait de mécanisme d'instabilité de tablier suspendu*

Le graphe (fig.4.18b) signifie que le tablier suspendu est défaillant lorsqu'une rupture de fils de torons de câbles porteurs et de suspentes se produit. La situation de défaillance du tablier suspendu issue de la manifestation des modes de défaillances des câbles correspond à la perte de stabilité du tablier. Les notes d'états du tablier (sûreté, niveau de performance Rt) dans ce contexte sont obtenues par l'application de l'opérateur moyenne des notes de ses sous composants.

4.2.2-Simulations de mécanismes de défaillance liées à l'altération de matériaux

Au chapitre 3 (§3.2), nous avons signalé le fait que les ponts en milieu tropical se dégradent naturellement en raison de l'altération progressive des matériaux par deux

principaux processus : la corrosion des aciers et l'affouillement des berges. Nous montrons dans cette partie, comment obtenir les états de performance et de sûreté des composants de pont par des simulations qui intègrent le facteur « temps ».

Nous exploitons le sous-modèle de simulation M2.2 (§4.1.2) et des règles expertes (R4.3…) pour mieux observer la variabilité de dégradation de performance au cours du temps pour différentes cinétiques d'altération.

4.2.2.1- Simulation de mécanisme de défaillance des composants par la corrosion

Ce cadre de simulations du processus de corrosion est illustré sur le mécanisme de défaillance d'un tablier de pont en acier pour compléter ce que nous venons d'expliciter au paragraphe précédent (mécanisme d'échappement de tablier de pont à poutres isostatiques). La règle experte complète exploitée dans ce contexte de simulation prédictive est placée en annexe 5. Six variables sont simulées à travers ce modèle (fig.4.20a) : α (environnement), K (processus), A (état d'altération), rt(propriété de matériau), Rt(performance résiduelle), t(temps).

La figure 4.19 illustre le Fait initial et la figure 4.20 matérialise les résultats de l'inférence.

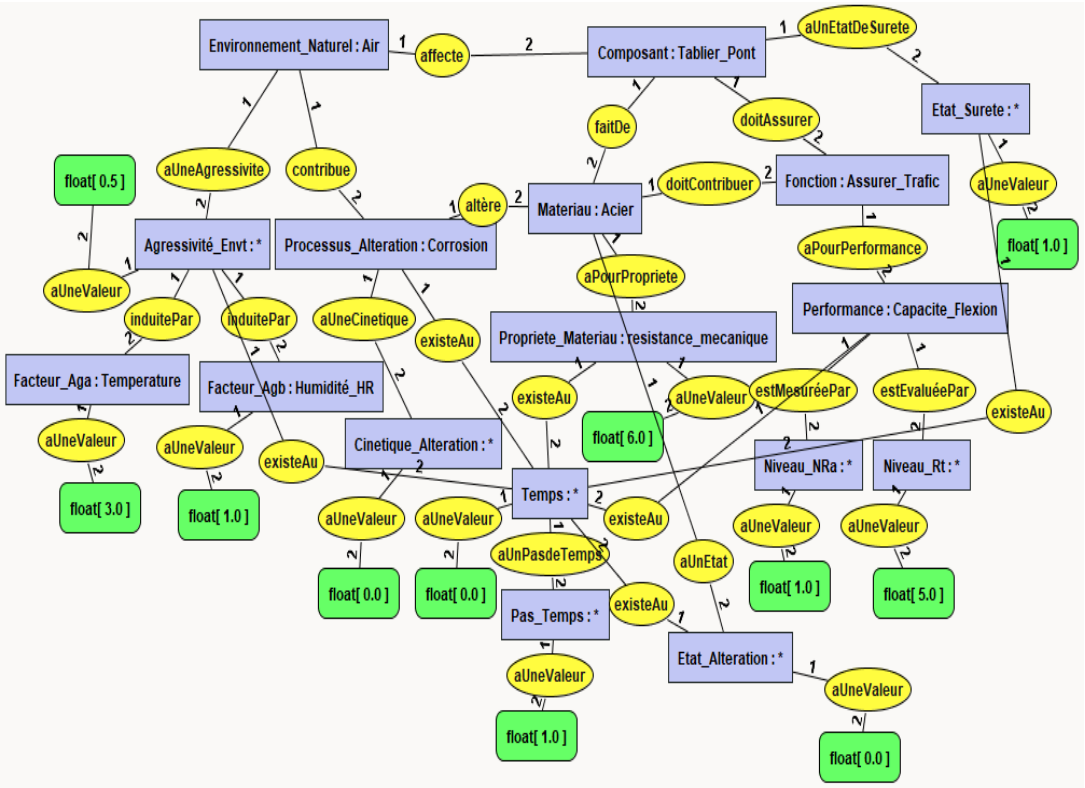


Figure 4.19 : *Graphe de fait initial décrivant le processus de corrosion du tablier de pont*

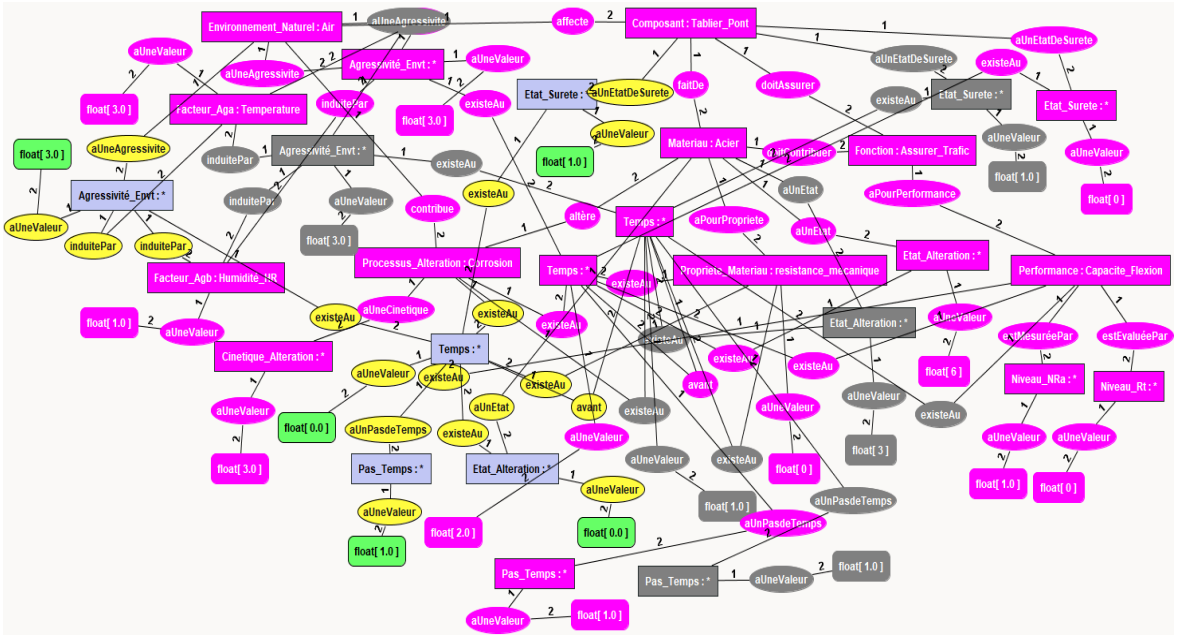


Figure 4.20 : *Simulations du mécanisme de défaillance de tablier de pont en acier*

La figure 4.20 (b) illustre les scénarios de mécanisme de défaillances de tablier de pont suite à la manifestation d'un processus de corrosion activé par un environnement de forte agressivité : valeur transformée d'agressivité $\alpha = 3$, cinétique rapide KCor = 3 se déroulant sur un pas de temps dt=1. La défaillance enregistrée est une « perte de capacité en flexion du tablier », dont l'ampleur est expliquée par un mode de défaillance locale due à l'insatisfaction de la fonction ELU« supporter les charges en flexion ». La figure 4.21 présente l'évolution des états d'altération du tablier au cours du temps (dt = 1). La figure 4.22 montre l'effet de la corrélation entre le matériau et la fonction du tablier. Les valeurs d'échelle de cinétique du processus sont présentées au tableau 4.4.

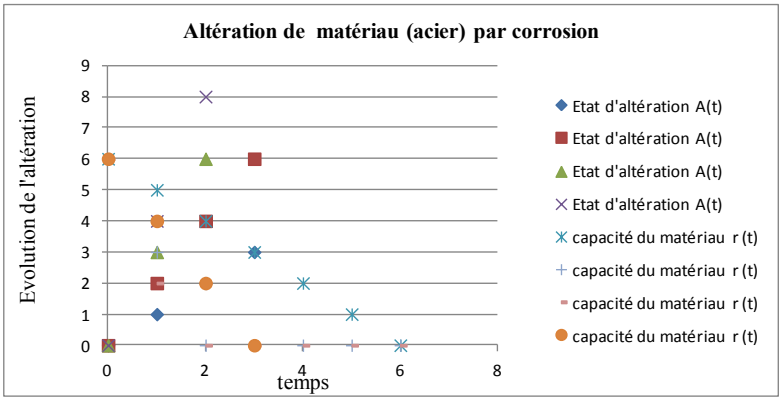


Figure 4.21 : *Courbe d'altération de matériau par la corrosion, r(t) et A(t)*

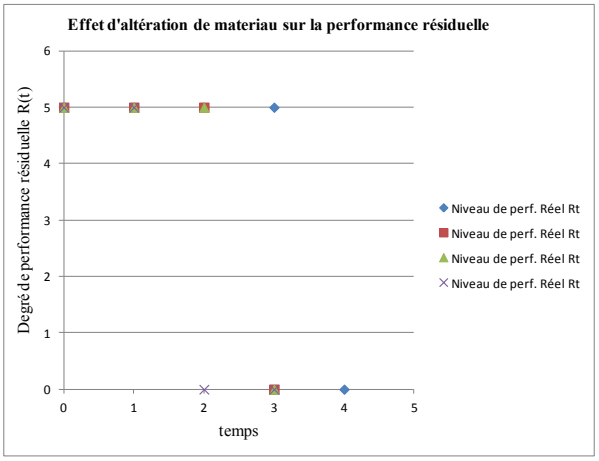


Figure 4.22 : *Effet de la corrosion du matériau sur la performance résiduelle de la fonction du tablier*

Tableau 4.4 : Synthèse des variables du processus de corrosion du tablier en acier

	Temps	Config.1	Config.2	Config.3	Config.4
		α =1; Δt = 1	α =2; Δt = 1	α =3; Δt = 1	α =4; Δt = 1
Proc.de corrosion	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
$K = \alpha * \Delta t$	1	1	2	3	4
	0	**0**	**0**	**0**	**0**
Etat d'altération	1	1	2	3	4
A(t)	2	2	4	6	8
	3	3	6	9	12
	0	**6**	**6**	**6**	**6**
capacité du	1	5	4	3	2
matériau r(t)	2	4	2	0	0
	3	3	0	0	0
	0	**5**	**5**	**5**	**5**
Niveau de	1	5	5	5	5
performance	2	5	5	5	0
Réel R(t)	3	5	0	0	0

L'interprétation des simulations du mécanisme de défaillance explicitée (figure 4.20) relève les constants suivants : la figure 4.21 illustre quatre configurations de simulation d'altération de matériau sous l'action de la corrosion suivant quatre cinétiques sur un pas de temps Δt = 1(tab.4.2). Cette courbe montre que la dégradation de la propriété de matériau est accélérée de façon linaire lorsqu'augmente la cinétique KCor (variation de la temperature et de l'humidité relative, voir fig.2.20). Finalement, pendant que la propriété de matériau se dégrade de façon régressive suite à l'action de corrosion, l'état du composant évolue du bon état apparent au très mauvais état. La figure 4.22 montre une diminution irrégulière de la performance (degré de performance résiduelle) du composant suite à la dégradation de

propriété de matériau. Suite aux simulations réalisées, nous avons constaté que la perte totale de performance intervient lorsque la cinétique de corrosion évolue de rapide à très rapide pur un même pas de temps. Ceci se traduit par l'état défaillant du composant (tablier) de pont modélisé (fig.4.20).

4.2.2.2- Simulation de mécanisme de défaillance des appuis de pont par l'affouillement

La simulation de mécanisme de défaillance d'appui de pont (culée) est réalisée suivant la même procédure que montré au paragraphe précédent. Etant donné que le temps de propagation du processus d'affouillement de berges est souvent plus court que celui de la corrosion, nous avons utilisé un pas de temps $\Delta t = 2$ pour les mêmes cinétiques de manifestation. La figure 2.23 présente le graphe de fait initial et la figure 4.24 montre le résultat de la simulation (cinétique KAff très rapide).

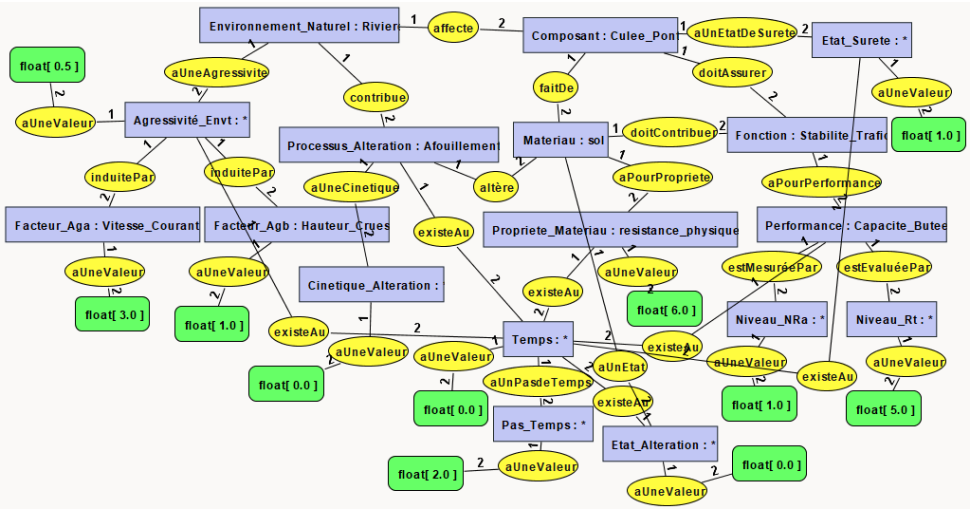


Figure 4.23 : *Cadre de simulation de mécanisme de défaillance de pont par affouillement*

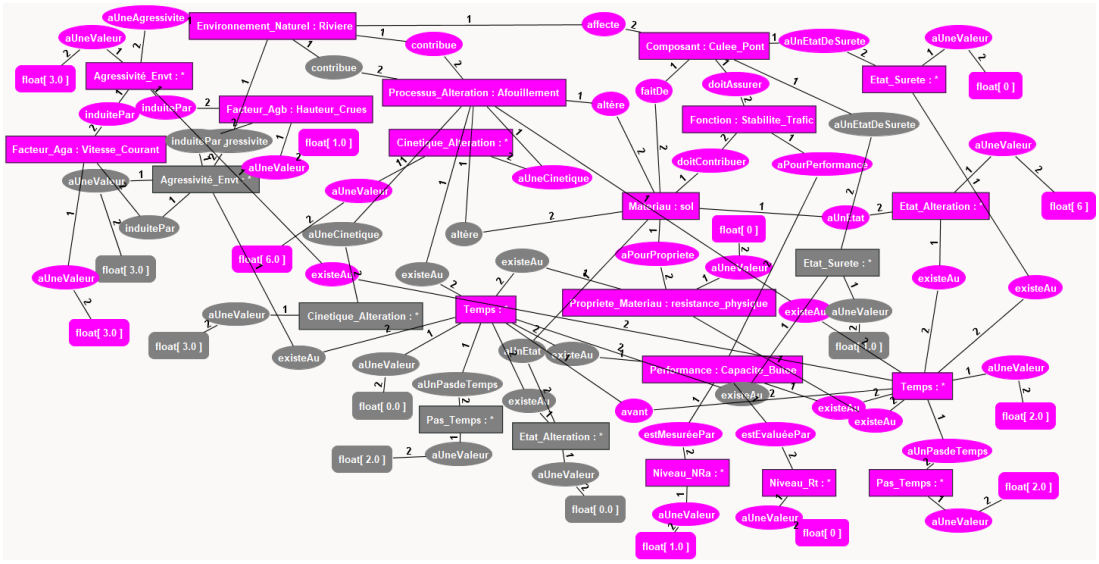


Figure 4.24 : *Graphe de simulation du processus d'affouillement de berges de pont*

Les résultats obtenus des simulations montrent que le composant est dans un état défaillant lorsque le matériau est dégradé avec une cinétique rapide du processus d'affouillement. Cela peut correspondre à des inondations violentes sur les sites des ponts en zone tropicale. La règle experte et les résultats de deux scénarios de simulation pour ce processus sont disponibles en annexe 5.

Sur la base des simulations déterministes illustrées dans cette partie, nous pouvons maintenant proposer trois outils d'aide à l'expertise d'ouvrages en cours de détérioration [CHA 13] :

(1) un cadre d'analyse de modes de défaillance et de leurs effets AMDE-produit (composant).

(2) un profil de dégradation de performance.

(3) une base conceptuelle sous la forme d'un ensemble de Faits spécifiques correspondant à chacun des ponts de la base de cas (Rex, chapitre 3).

Les deux premiers outils d'aide (AMDE-composant et Profil de performance de composant de pont) sont explicités au paragraphe (§4.4). Le paragraphe 4.3 expose sur la base conceptuelle de Faits spécifiques.

4.3- Base conceptuelle de faits de défaillances pour l'ingénierie forensique

La base de faits de défaillance antérieure est organisée sous la forme d'un ensemble de Faits spécifiques correspondant à quelques cas particuliers des ponts de la base de cas (annexe 2). Un ensemble de quatre graphes de Faits de défaillances spécifiques est implémenté sous CoGui pour servir d'illustration dans la thèse : défaillance engendrée par la conjonction de corrosion et de choc de véhicule (pont Mouyondzi, pont Lubiriha), défaillance due à l'action d'affouillement et d'inondation (pont Abakpa-Nike, pont Montrouis). Les critères de ce choix émanent de deux raisons essentielles. La première est liée à la spécificité représentative des cas de défaillance en contexte tropical comme nous l'avons indiqué au chapitre 3. La seconde ressort de la difficulté de manipulation d'une base relationnelle contenant un grand nombre de graphes sous la version actuelle de CoGui 2.0b5 (i.e. l'arrêt automatique de l'interface de l'outil lors des simulations a été l'un des problèmes fréquents constatés). L'illustration de l'interface de visualisation des graphes de Faits de défaillances des ponts cités, des règles expertes exploitées et des requêtes dans CoGui est présentée en annexe 5.

Trois usages essentiels sont possibles à travers cette base relationnelle de Faits défaillances en contexte d'exploitation de parcs de ponts existants :

- l'extraction des cas à l'aide des requêtes, qui permet de connaître l'historique du système d'étude afin de rechercher des explications possibles sur les défaillances,
- l'analyse forensique des défaillances des ouvrages non documentés, qui s'appuie sur les nouvelles règles déduites à partir de la base de faits formalisée,
- la réutilisation et le partage des données entre experts, soit à des fins de l'expertise avenir ou de l'enseignement des ingénieurs juniors.

Nous allons illustrer les deux premiers usages.

4.3.1-Base de requêtes et de règles expliquant des défaillances similaires

Nous avons montré dans les chapitres précédents comment reconstituer l'historique des états de ponts à partir de la simulation des requêtes de projection. Dans cette partie, quatre requêtes (Q1#, Q2#, Q3#, Q4#) implémentées aussi sous forme de graphes, sont extraites à partir des parties de graphe-fait de la base relationnelle de faits structurée. Les graphes de requêtes formalisées sont illustrés dans ce qui suit pour chaque Fait de défaillance simulé.

4.3.1.1- Interrogation de base de faits de défaillance à l'aide des requêtes

Les requêtes formalisées projetées dans la base de faits, interrogent les faits observés de la manière suivante :

- les requête Q1# et Q2#, visent à identifier des ponts ayant connu des défaillances spécifiques similaires à celles observées, mais incomplètement documentées. Elles sont formalisées au niveau de composant en situation de défaillance. Par exemple, la requête Q1# permet de recenser les ponts confrontés à la défaillance de type effondrement de tablier (cas du pont Mouyondzi, pont Lubiriha...). La requête Q2# identifie les ponts défaillants à partir des appuis (pont Montrouis…).
- les requêtes Q3# et Q4#, sont des requêtes génériques qui recherchent les ponts ayant connu des défaillances à partir des facteurs externes de risques. La requête Q3# identifie les ponts par les mécanismes potentiels de défaillances (affouillement, corrosion…). La requête Q4#, identifie les ponts défaillants à partir des événements ou facteurs extrêmes (choc de trafic, crue ou inondation…). D'autres requêtes plus spécifiques peuvent être aussi formalisées si l'on veut appliquer le principe de similarité de causes. Par une requête Q3'#, formalisée à partir d'un mécanisme de défaillance spécifique (corrosion) va pouvoir identifier les ponts affectés par ce facteur de risque (Q3"# concerne le mécanisme de défaillance due à l'affouillement).

4.3.1.2- Résultats de simulation de requêtes sur les raisons de défaillance

Les graphes d'interrogation des Faits de défaillances des ponts Lubiriha sont disponibles en annexe 6.

- *Explication de la défaillance du pont Mouyondzi*

La figure 4.25 donne un détail physique sur la situation de défaillance survenue sur le pont Mouyondzi le 24/04/2012 (Congo, voir chapitre 3§3.2.3).

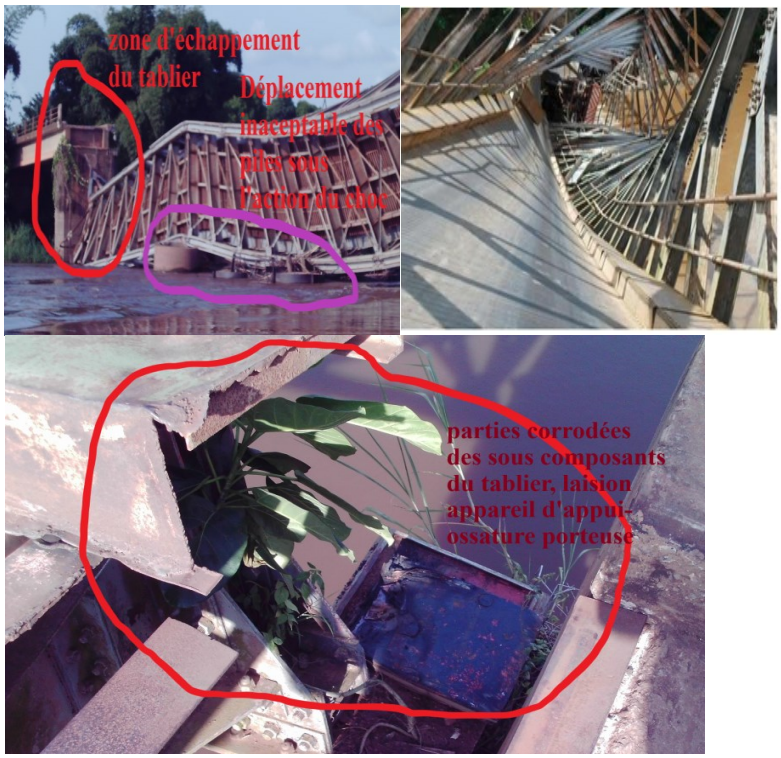


Figure 4.25 : *Localisation des modes de défaillances de tablier, piles du pont*

L'image à gauche (fig.4.25) met en évidence la manifestation du mécanisme d'échappement du tablier sur les piles. L'image à droite illustre de quelle manière la collision s'est produite (zone d'attaque du véhicule). Les raisons de cette situation de défaillance formalisée et décrite sous forme de Fait spécifique (Graphe de Fait défaillance du pont Mouyondzi). La figure 4.26 est un graphe de requêtes spécifiques à la défaillance de ce pont.

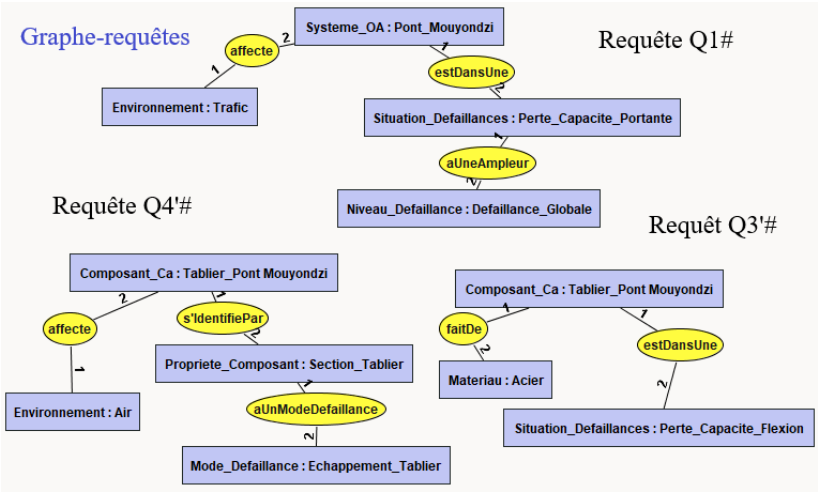


Figure 4.26 : *Graphes de requêtes pour interpréter la défaillance du pont Mouyondzi*

La projection des requêtes Q1#, Q3'# et Q4'# sur la base de Faits spécifique, montre à travers la figure 4.27 l'interprétation suivante : la défaillance du pont Mouyondzi est le

résultat d'une corrosion (non anticipée pendant l'exploitation), et de choc (collision) de camion surchargé, ayant soudainement provoqué la perte de performance de l'ouvrage.

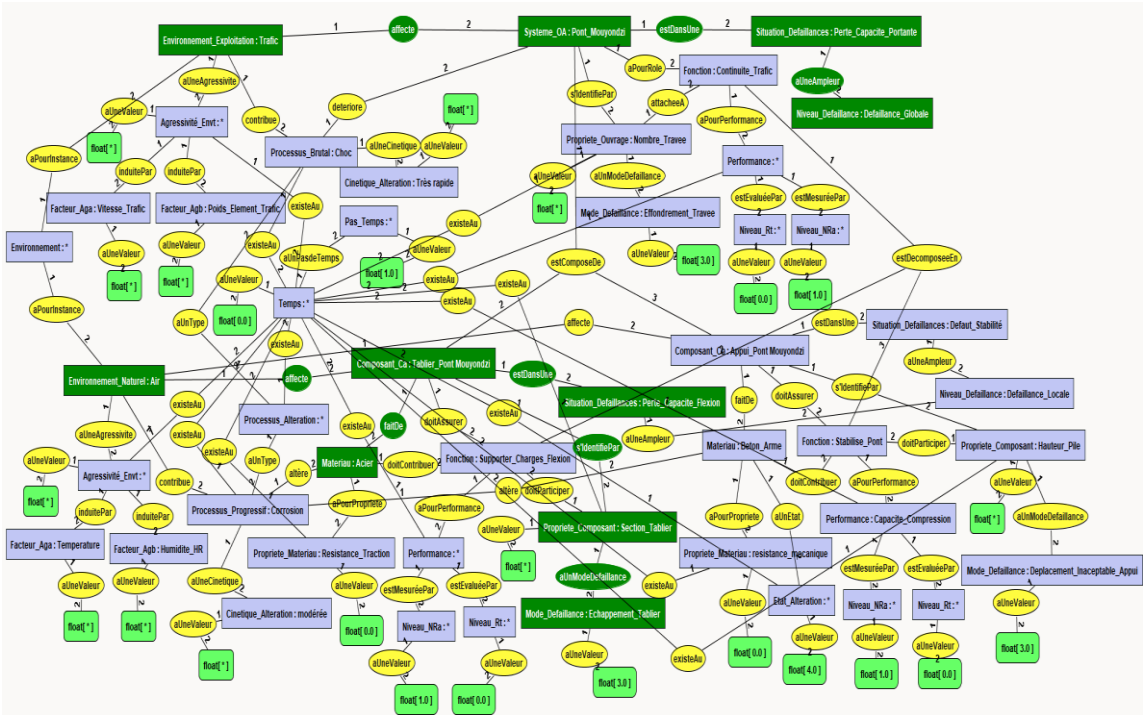


Figure 4.27 : *Graphe explicatif des raisons de la défaillance du pont Mouyondzi*

- *Explication de la défaillance du pont Abakpa-Nike (Nigeria)*

Le pont Abakpa-Nike (37ans en service) est un ouvrage d'art exploité dans le contexte national du Nigéria qui a connu une situation de défaillance le 01 juin 2012 suite à la propagation de l'affouillement. Cet affouillement provoqué par la vitesse excessive de crues s'est traduit par l'extraction de matériau (sol) sous les appuis du pont et a entraîner le déplacement inacceptable des appuis. La figure 4.28 montre l'image du pont en état de défaillance. La figure 4.29 illustre le graphe de requêtes et la figure 4.30 donne l'explication de la situation de la défaillance.



Figure 4.28 : *Défaillance du pont Abakpa*

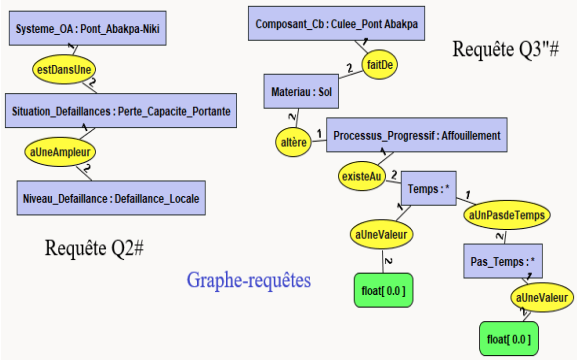


Figure 4.29 : *Graphe de requêtes*

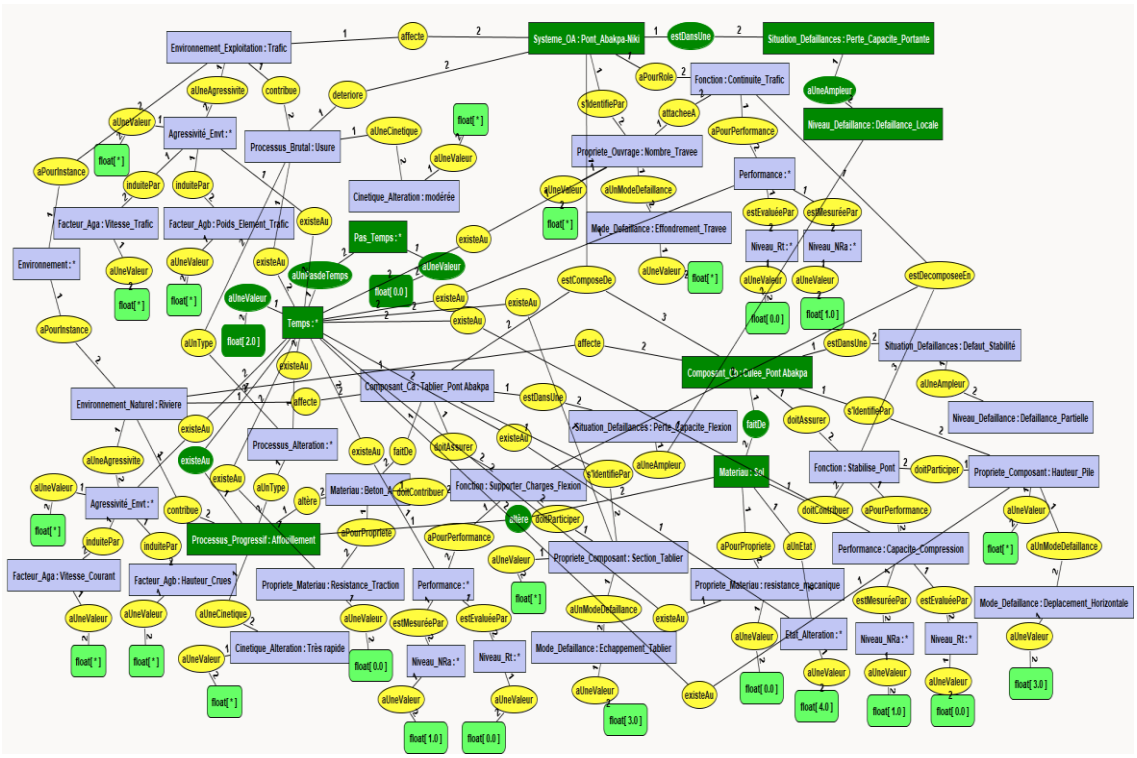


Figure 4.30 : *Graphe explicatif des raisons de la défaillance du pont Abakpa-Niki (Nigeria)*

- *Explication de la défaillance du pont Montrouis*

Les détails sur le cas de défaillance du pont Montrouis constatée le 07 septembre 2008 (Haïti) ont été donnés au chapitre 3 (§3.2.3.3). Les figures 4.31 et 4.32 présentent cadre d'interprétation des raisons de cette défaillance à travers la simulation des requêtes.

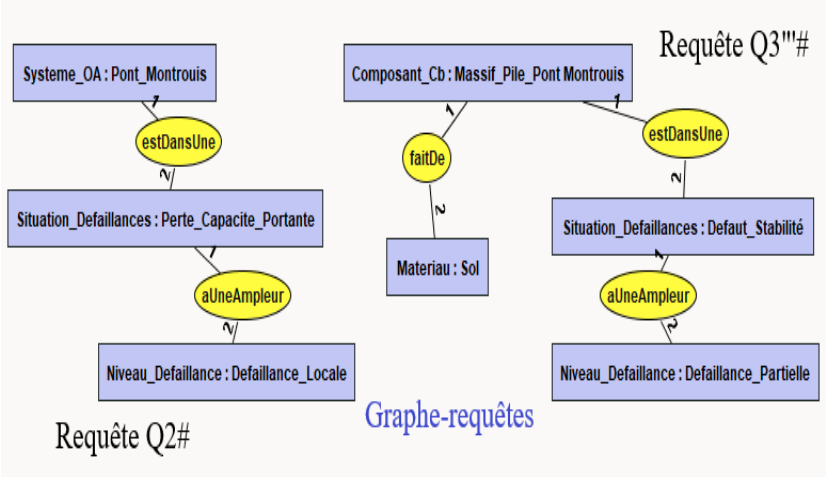


Figure 4.31 : *Graphe de requêtes appliquées à la défaillance du pont Montrouis*

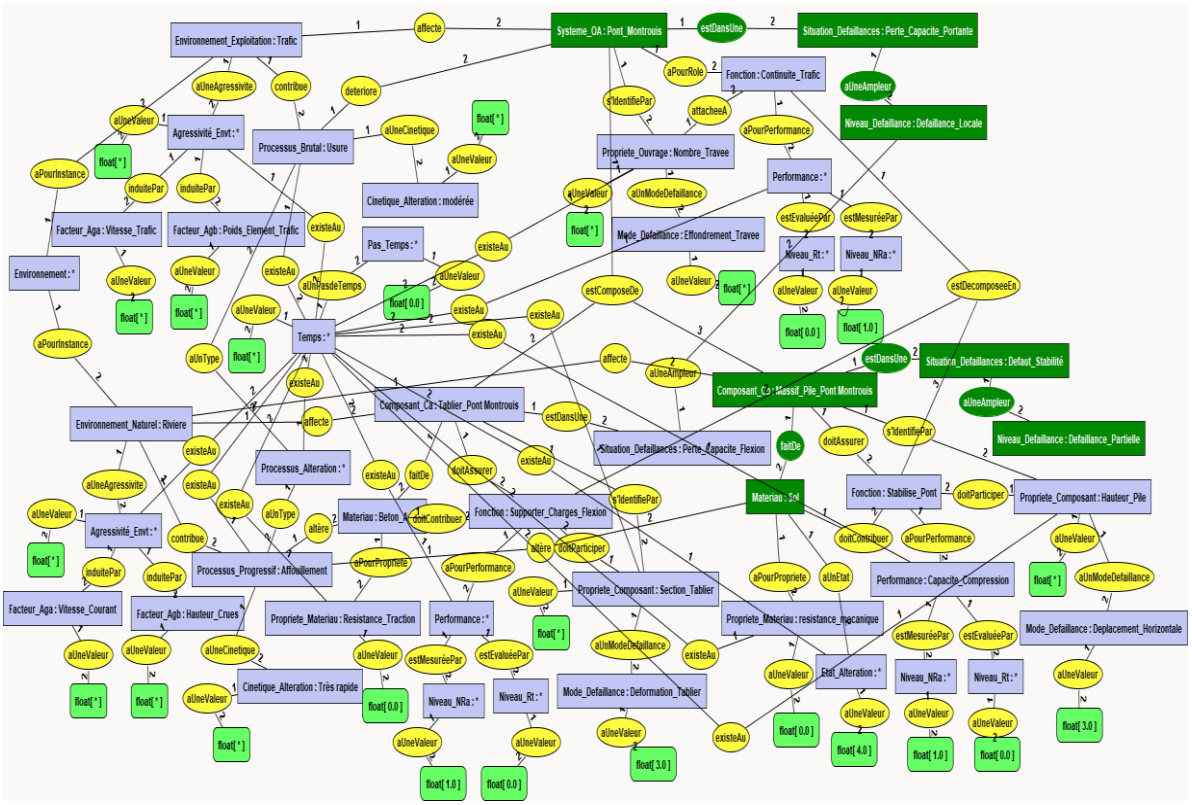


Figure 4.32 : *Graphe d'explication des raisons de la défaillance du pont Montrouis*

Les explications trouvées sur les défaillances antérieures et les simulations prédictives présentées dans les paragraphes §4.2 à 4.3 sont essentielles pour prendre des mesures préventives d'exploitation des ponts existants. Nous illustrons dans ce qui suit les prémices d'outil d'aide à la décision proposé.

4.4- Cadre d'aide au diagnostic, à la décision et synthèse du chapitre

4.4.1-Prémices d'une base d'aide à la décision

La maîtrise de risque et des situations de défaillances similaires sont une nécessité pour améliorer les décisions ainsi que les pratiques de maintenance préventive d'ouvrages existants [AFN 01]. Les outils d'aide au diagnostic proposés dans ce chapitre (3.3) montrent qu'il devient possible d'obtenir l'état de performance d'ouvrages et de les actualiser au cours du temps. Lorsqu'un mode de défaillance ou un état d'altération est quantifié, une aide à la décision en matière de maintenance préventive peut s'appuyer dans un premier moment en la conclusion de deux règles expertes [POT 14b]. La figure 4.33 présente ces règles pour deux contextes de décision (avant la défaillance et après la défaillance).

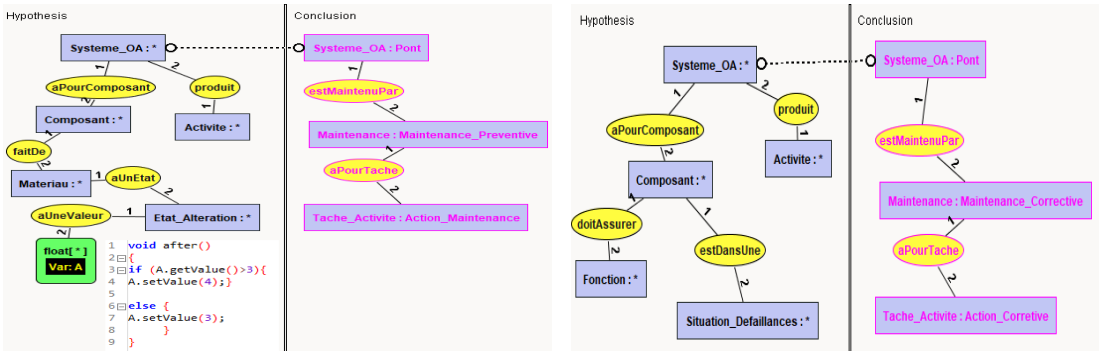


Figure 3.33 : *Graphe de règles de décision d'intervention sur ouvrage détérioré*

Le graphe à gauche est une règle de décision pour la maintenance préventive, et à droite concerne la règle de maintenance corrective. La figure 3.34 illustre deux résultats de simulation appliquée deux cas de ponts défaillants : pont Bas Kouilou (en cours de détérioration, voir Rex, annexe 2) et pont Montrouis (défaillant).

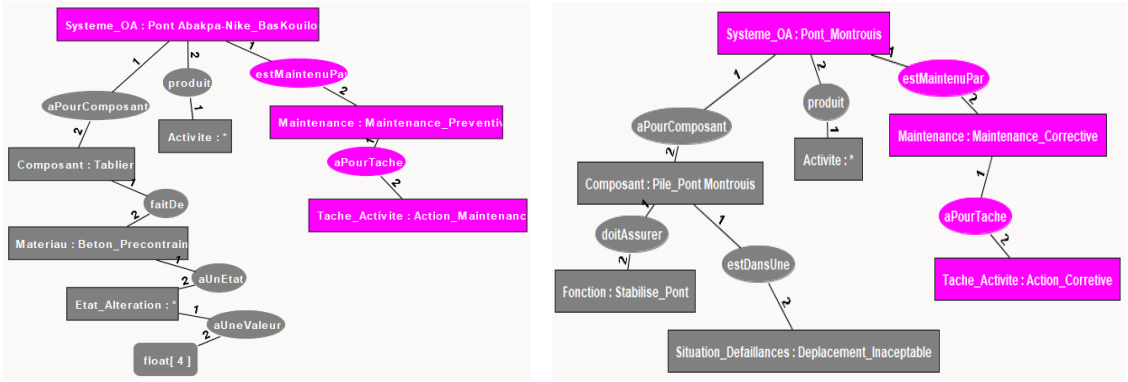


Figure 3.34 : *Graphes illustratifs de prémices d'aide à la décision de maintenance*

Le graphe à gauche est le pont Bas Kouilou nécessitant une maintenance préventive (à priori efficace) pour retarder la détérioration.

Le graphe à droite est une décision de maintenance corrective pour restaurer le pont Montrouis qui se trouve dans une défaillance locale. A partir de ces deux illustrations d'aide à la décision, nous présentons sur la figure 4.35 l'architecture du cadre d'aide au diagnostic et à la décision.

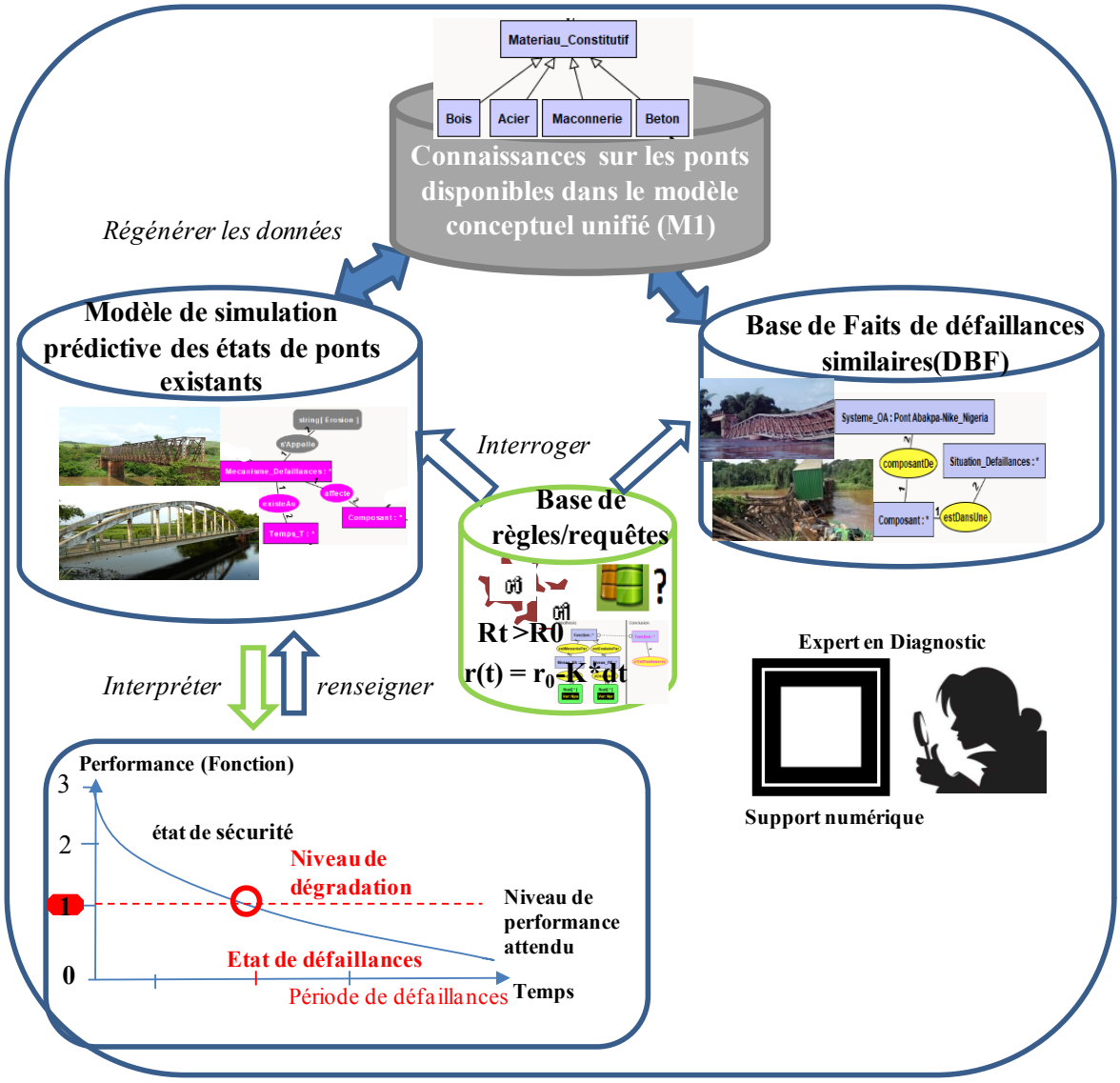


Figure 3.35 : *Cadre d'aide au diagnostic et à la décision des ponts en détérioration*

Le profil de dégradation de performance à travers ce cadre d'aide au diagnostic et à la décision consiste au suivi des ponts en service. Lorsqu'on obtient des informations supplémentaires lors des inspections, le profil de performance proposé permet de suivre et d'actualiser les états d'ouvrages pendant la phase d'exploitation. Il est renseigné par les simulations numériques basées sur la théorie de la logique de premier ordre des Graphes Conceptuels (modèle M2).

Cet outil (profil de performance) est exploité de façon simultanée avec le cadre d'AMD-Composant de pont.

Le format AMDE-composant déduit des simulations numériques réalisées dans cette thèse consiste en un tableau de six colonnes (tab.4.5). Cet outil d'expertise discuté au chapitre 1 (§1.4) permet de repérer plus facilement les enchainements des modes de défaillances pour divers usages : analyse qualitative des états de performance d'ouvrage en service, etc.

Tableau 4.5 : Extrait du format ADME-composant de pont existant

Fonction	Composant	Mode de défaillance	Situation de défaillance	Facteurs de défaillance	Conséquence
Assurer le trafic (supporter les charges, continuité)	Tablier (pont)	échappement	défaut de résistance rupture de section	choc de trafic insuffisance d'entretien corrosion	perte de résistance mécanique, et de l'état de sûreté)
Stabiliser l'ouvrage (stabilité horizontale, équilibre verticale)	Appui (culée)	déplacement inacceptable	défaut de stabilité déplacement horizontal inacceptable	érosion externe (affouillement de berges) pression excessive de terre	perte de résistance au renversement/glissement, et de l'état de sûreté
-	-	-		-	-

Le déploiement de ce cadre d'analyse qualitative de situation de défaillance d'ouvrages en parallèle avec le profil de dégradation de performance et de la base conceptuelle des Faits spécifiques de défaillance permet de suivre l'évolution des états de performance d'un système durant sa phase d'exploitation. Le paragraphe suivant expose la procédure proposée pour exploiter et interroger le cadre d'aide au diagnostic et à la décision (fig.4.36).

*4.4.2-**Procédure proposée pour exploiter et interroger le cadre d'aide à la décision***

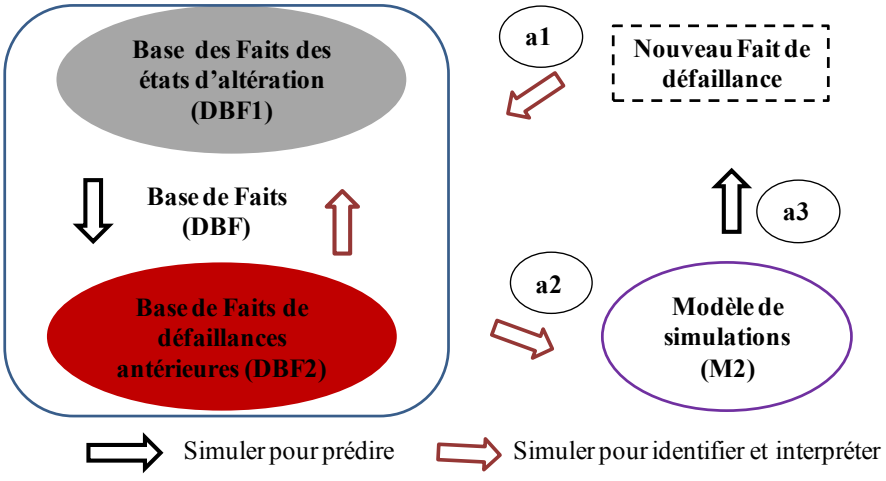


Figure 4.36 : *Schéma proposé pour l'exploitation du cadre d'aide à la décision*

L'exploitation de la base conceptuelle de Faits spécifiques consiste en une interrogation dans deux directions. L'investigation de l'expert dans cette phase d'analyse des défaillances antérieures et des nouveaux Faits utilise trois possibilités d'interrogation alternant un raisonnement sur la base conceptuelle de Faits spécifiques et le modèle de simulation (M2). La figure 4.36 illustre ces trois possibilités d'interrogation, où :

- (a_1) consiste en l'interrogation de la base conceptuelle de Faits spécifiques (DBF) par des simulations des règles et des requêtes afin d'extraire la connaissance factuelle pouvant expliquer le nouveau Fait enregistré sur un pont par des connaissances existantes dans la base de Faits (DBF). Autrement dit, il s'agit de procéder à une corrélation par similitude entre l'observation nouvelle et l'historique de l'expertise/exploitation des ouvrages. Ceci correspond à une dimension de l'ingénierie forensique où l'expert procède à des simulations numériques en exploitant la connaissance utile implémentée dans le modèle unifié (M1).
- (a_2) consiste en des simulations des nouvelles lois via le modèle de simulations (M2) lorsque le pont sur lequel le nouveau Fait est enregistré n'est pas documenté dans la base conjointe de Faits (DBF).
- (a_3) est une opération consistant, d'une part à déduire des connaissances factuelles des modèles de simulation pour renseigner le nouveau Fait, et d'autre part à intégrer ce nouveau Fait une fois analysé dans la base conjointe de Fait (DBF).

4.4.3-Synthèse du chapitre et contribution des simulations numériques

L'approche décrite par des illustrations dans ce chapitre est une modélisation physique appliquée à des processus spécifiques de dégradation : les chocs, la corrosion et l'affouillement de berges. Comme nous l'avons signalé en introduction, nous avons souhaité illustrer ici les effets de la prise en compte de la variabilité des facteurs défavorables qui facilitent la propagation d'un mécanisme de défaillance de composants de pont en service. Les deux questions abordées étaient :

> *(1) Comment expliquer le Fait que la performance d'un pont puisse diminuer au cours du temps suite à l'agressivité de l'environnement* ?
> (2) *Comment traduire le Fait qu'un pont se trouve dans une situation de défaillances à partir d'un scénario compréhensible ?*

Les deux premières parties du chapitre ont traité de la modélisation de simulation déterministe de quelques mécanismes de défaillance parmi l'échantillon de 50 ponts de la base de cas. La troisième partie a traité de la recherche possibiliste par la projection des requêtes afin de retrouver les raisons qui ont conduit à une situation de défaillance antérieure pour un pont bien documenté dans la base de Faits spécifiques. Ces raisonnements ont mis en évidence le fait que la défaillance des composants de ponts résultait à la fois de processus soudains et de processus progressifs d'altération, ce qui était de nature à remettre en cause la fonctionnalité de système d'ouvrage. Le cadre d'aide au diagnostic d'ouvrages en cours de détérioration et les prémices d'une vision d'aide à la décision de maintenance proposés sont

des outils d'amélioration des pratiques de gestion et de maintenance de ponts en service (partie 4).

Les principaux avantages de la modélisation Br3KM ont été déjà illustrés au chapitre 3. Nous en présentons à travers la figure 4.32, les étapes d'utilisation de l'information utile dans la chaîne de décision en contexte d'exploitation d'ouvrages : ri# est l'ensemble des simulations (inférences de règles) décrites par des lois physiques, et rj# et rm# sont des simulations basées sur les modèles développés (projections de requêtes, règles de décision).

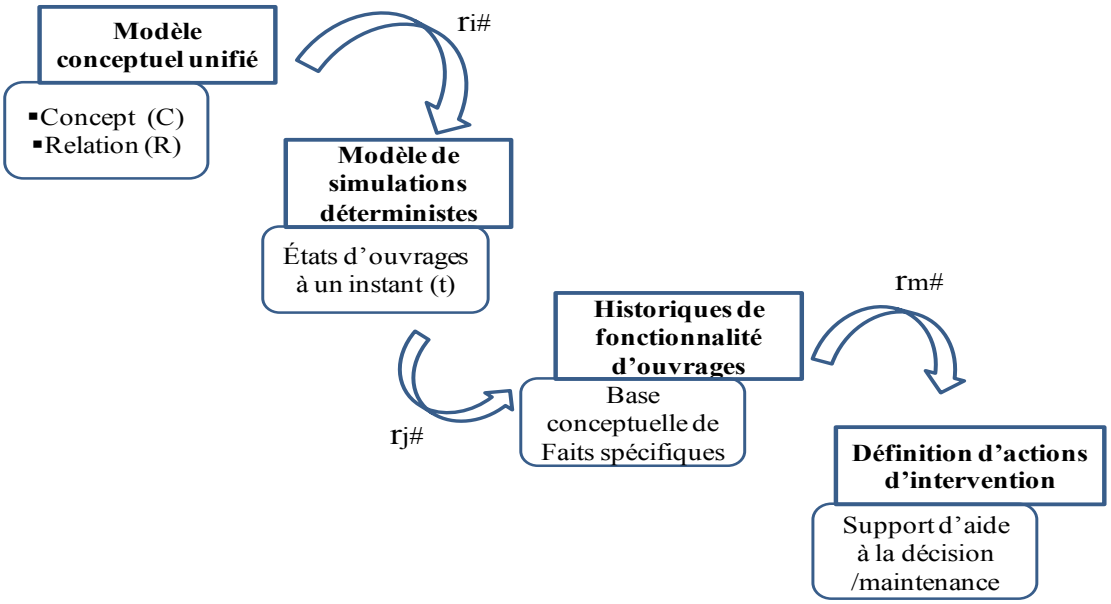


Figure 4.37 : *Processus de transfert et de manipulation de connaissances dans la chaîne de décision*

Dans cette chaîne de transfert de données, on note en particulier que la phase de collecte d'informations permet d'acquérir les connaissances nécessaires suivant les champs d'application concernés par l'étude. L'expert, quant à lui, a besoin d'informations de sources fiables, formalisées et en quantité, qui sont intégrables pour des applications visées. Cela permettra au décideur à son tour de se positionner sur des meilleures décisions avec des incertitudes minimisées à la base.

L'enjeu essentiel du chapitre était de poser les bases de raisonnements logiques en contexte d'analyse de défaillance d'ouvrages par le déploiement de l'outil numérique de modélisation des connaissances. D'autres situations de défaillance peuvent être abordées selon la même approche d'analyse holistique de défaillance de composant de pont par l'analyse de performance des fonctions : le dysfonctionnement global d'un pont à partir de l'analyse de l'ensemble des modes de défaillance de ses composants respectifs, etc.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La gestion des parcs des ponts existants constitue un enjeu majeur, tant sur les volets techniques que sur les volets économique et scientifique. La prise en compte de l'ampleur des champs techniques et la compréhension des évènements en amont et en aval d'une défaillance d'ouvrages sont des défis considérables pour l'efficacité des pratiques de gestion des ouvrages. Dans le contexte spécifique aux pays tropicaux, le manque de connaissances suffisantes sur l'évolution des états d'ouvrages face à divers processus d'altération (corrosion, affouillements…) est une difficulté majeure pour l'estimation des risques et la prévision budgétaire. Deux enjeux majeurs (introduction générale) abordés dans le cadre cette thèse étaient relatifs aux besoins de diagnostic d'ouvrages en cours de détérioration (identification et analyse des défaillances), impliquant la production et l'organisation des connaissances nécessaires. Les principales questions abordées furent les suivantes :

1) Comment identifier et expliquer les défaillances d'ouvrages peu documentés ?
2) Comment considérer simultanément tous les sous-domaines (de connaissances) en interaction afin de construire un modèle pertinent permettant de développer un cadre de simulation des enchaînements de défaillance des ponts ?
3) Comment manipuler et gérer un grand nombre d'informations utiles à des fins d'analyse du vieillissement, de l'ingénierie forensique… ?
4) Comment améliorer les décisions des acteurs interagissant dans un contexte de gestion patrimoniale confronté au manque de connaissances nécessaires ?

Le premier chapitre a traité de la capacité des outils traditionnels de gestion des ponts dans le monde, et des approches techniques de sûreté et d'analyse de défaillances des ouvrages existants. Les modèles de connaissances (ou d'informations) disponibles en génie civil ont été passés en revue. Nous avons mis en évidence les atouts et les limites de ces outils dans le contexte d'analyse des défaillances et de l'exploitation des ponts en milieu tropical, ce qui nous a permis de mieux orienter notre problématique.

Au chapitre 2, nous avons développé les bases de modélisation des connaissances des ouvrages en présentant les outils préconisés pour la modélisation et notre vision pour l'analyse holistique de défaillances. Trois familles d'incertitudes (aléatoires, épistémiques et procédurales/organisationnelle) ont été identifiées. Un des facteurs d'incertitudes aléatoires lié à la variabilité du vieillissement des ouvrages (matériau, composant) face à un environnement agressif a été traité par des simulations numériques. Des simulations intégrant les lois physiques du vieillissement des matériaux ont permis de formaliser les scénarios de l'évolution des états d'ouvrages sous forme de base de graphes servant de base de faits pour des observations futures. Les incertitudes épistémiques et procédurales ont été intégrées au chapitre 3 via la modélisation des connaissances collectées. La prise en compte des facteurs

d'incertitudes aléatoires a été mise en exergue à travers le cadre de simulations prédictives et quantificatives des mécanismes de défaillances des composants de ponts détériorés au chapitre 4.

Le chapitre 3 traitait de l'identification et de l'analyse des défaillances sur les ponts en milieu tropical (statistique, observations), sur la base d'informations issues de la littérature et selon des approches relevant de l'ingénierie forensique. Ce chapitre, au cœur de la modélisation proposée (Br3KM) a montré l'efficacité des Graphes Conceptuels et de la plate-forme logicielle CoGui pour la description logique et l'implémentation de la connaissance : vocabulaire, formalisation, organisation (unification) et implémentation. Nous avons établi un modèle unifié de connaissance (Br3KM) et des illustrations ont permis de vérifier sa cohérence à travers la simulation de règles et de projections. Ce chapitre s'est focalisé sur le traitement approfondi des trois premières questions, complétant les réponses apportées au chapitre 2.

Le chapitre 4 s'est intéressé aux questions portant essentiellement sur l'analyse de l'évolution des états des ponts en cours de détérioration. Il a traité de la description et de la simulation de certains processus (corrosion, affouillement des berges d'appuis de ponts) et de la formalisation d'une base d'historique de faits spécifiques (altérations de matériaux, défaillances de ponts). Un cadre de simulations déterministes et possibilistes décrivant les scenarios des états d'altération et des défaillances associées a été structuré et appliqué. Nous sommes arrivés à la conclusion que la simulation prédictive des processus d'altération conduisant à la défaillance des ponts par l'intermédiaire de modèles de connaissances permet de mieux gérer les incertitudes associées à la durée de service escomptée des infrastructures. L'utilisation des Graphes Conceptuels via la plate-forme CoGui pour la modélisation de connaissances, permet d'exploiter les données d'inspection des ouvrages, ce qui sera intéressant pour définir et mettre en œuvre des stratégies optimisées de maintenance. Le modèle Br3KM fonctionne actuellement avec des simulations basées sur des opérations des Graphes Conceptuels. Le cadre de modélisation de connaissances et d'analyse de défaillances développé dans la thèse constitue une amélioration assez conséquente des modèles de connaissances disponibles en génie civil. Les prémisses d'un cadre d'aide à la décision en matière de gestion de patrimoine d'ouvrages illustrées dans ce travail constituent des bénéfices que les experts en gestion des ponts peuvent retirer et adapter à leur contexte.

Les développements que nous pouvons envisager à court et moyen terme sont multiples. Ils sont d'abord relatifs à l'enrichissement du corpus de connaissances déployé dans le cadre de la thèse :

- développement de la base de faits de défaillances des ouvrages existants,
- description plus large des processus de détérioration des matériaux et des composants.

Ils concernent ensuite l'utilisation du modèle développé pour exploiter connaissances et faits et servir la pratique de l'ingénierie. Les enjeux sont ici la diffusion du modèle, aussi bien dans le cadre de la formation des jeunes experts que dans leur pratique quotidienne. Cette

phase devrait aussi permettre, par retour d'expérience, d'affiner et d'enrichir le corpus de connaissances.

Enfin, il s'agira d'étendre le périmètre de l'outil, pour faire face à l'ensemble du champ de la gestion des ponts en milieu tropical. Il faudra pour cela :

- approfondir le développement du cadre d'aide à la décision, en intégrant la dimension de l'optimisation de stratégies préventives de maintenance. Des analyses quantitatives probabilistes construites par exemple dans le formalisme PRM (*probabilistic relational model*), pourront être mise en œuvre sur la base du modèle conceptuel produit (qualitatif) pour considérer d'une autre manière, le caractère aléatoire des données,
- approfondir l'axe du partage de connaissances entre acteurs clés de gestion d'ouvrages en développant la dimension d'ingénierie-conseil afin d'accompagner l'efficacité des stratégies de préservation des performances d'infrastructures durant leur cycle de vie.

Notre vœu est que le modèle Br3KM, en dépit de ses limites actuelles, puisse servir aux communautés d'experts du génie civil, aux ingénieurs débutants ou expérimentés, aux élèves ingénieurs et aux chercheurs qui trouveront (a priori) des outils et méthodes appliqués à la modélisation de connaissances des ponts.

BIBLIOGRAPHIE

[AAS 12] AASHTO LRFD: bridge design specifications, 6th Ed, Washington, DC, 2012.

[AFN 90] AFNOR NF EN: Eurdocode 0, bases de calculs des structures, avril 1990

[AFN 96] AFNOR. Norme homologuée NF EN 1325-1 Vocabulaire du management de la valeur, de l'analyse de la valeur et de l'analyse fonctionnelle-Partie 1: Analyse de la valeur et analyse fonctionnelle, 24p, 1996

[AFN 01] Association Française de Normalisation (AFNOR), «NF EN 13306 -Terminologie de la maintenance», Norme européenne, juin 2001.

[AFN 04] AFNOR NF EN 206-1, béton- Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité, avril 2004.

[AKT 03] Aktan A.E., and Faust D. A holistic integrated systems approach to assure the mobility,efficiency, safety and integrity of highway transportation. *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructures*, Lisse: Balkema 1, 7-18, 2003

[ALO 05] Aloui S., Chapurlat V., Penalva J.-M. Réingénierie de système complexe pour le management de risque. JDMACS05 Journée doctorales et Nationale du GDR MACS Lyon, France, 2005.

[AND 87] Andrey D., Maintenance des ouvrages d'art : Méthodologie de surveillance-Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur Es Sciences Techniques, Lausanne, EPFL, 1987

[AND 15] Anderson I., Dewoolkar M.M., Rizzo D.M., Huston D.R., Scour damage to vermont bridges and scour monitoring. UVM Transportation Research Center Report 2015

[ANG 11] Ang A.H.-S. Life-cycle considerations in risk-informed decisions for design of civil infrastructures. Structure and Infrastructure Engineering,7(1),3-9, 2011

[ANS 75] ANSI Study Group on database management systems.Interim report, FDT, vol.7, no..2, ACM, 1975

[ARI 04] Aribert J.-M. Construction mixte acier-béton-calcul des poutres mixtes, Techniques de l'Ingénieur, Réf. C2561V1, 10 Novembre 2004

[ARN 15] Arnold, R. D., Wade, J. P., A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach, Conference on Systems Engineering Research, Procedia Computer Science 44 669 – 678, 2015

[ART 07] Arthaud G. Apports de modèles de comparaison structurelle et sémantique à la synchronisation de la maquette numérique de construction : application aux ponts. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (France), 2007

[AZI 03] Azibi R. Building criteria to help the decision: methodological, technical and practical aspects. Thesis report Paris Dauphine University, Paris,160p, 2003.

[BAD 11] Banque Africaine de Développement «Fonds Africain de Développement »: Etude économique et sectorielle - développement des infrastructures au Congo. Contraintes et priorités à moyen terme. (ORCE)-Nov.2011

[BAG 10] Baget J.F., Chein M., Croitoru M., Gutierrez A., Leclère M., Mugnier M.l., Logical, graph based Knowledge representation with CoGui, in : Actes de l'atelier GAOC (Graphes et Appariement d'Objets Complexes en conjonction avec EGC10), 15-25, 2010

[BAI 00] Bailly P., Mavrotalassitis G. Le risque en Génie Civil : le cas des chocs violents. Le Risque et Génie Civil, Actes du Colloque, Unesco, Paris, 8-9 Novembre 2000

[BAR 11] Baroth J., Schoefs F., Breysse D., Fiabilité des ouvrages : sûreté, variabilité, maintenance, sécurité. Edit. Lavoisier, Paris, 2011.

[BAS 04] Basque J., Pudeko B., La modélisation des connaissances à l'aide d'un outil informatisé à des fins de transfert de l'expertise, Recension d'écrits. LICEF 03NR02, 2004

[BER 12] Berti-Equille L. La qualité et la gouvernance des données. Edition Lavoisier, 2012

[BIE 07] Bien J., Kaminski, T., Damages to masonry arch bridges-proposal for terminology unification. Proceedings of the Arch, 2007

[BJO 15] Björnsson I. Holistic approach in engineering design: Controlling risks from accidental hazards in bridge design, Doctoral Dissertation, Lund University, Sweden, 2015.

[BOE 09] Boero J., Schoefs F., Capra B., Rouxel N., «Gestion technique des ouvrages portuaires en France, partie2 : Pratiques actuelles, besoins- Retour d'expérience des gestionnaires », *Revue Paralia, vol.2, 2009.*

[BOI 99] Boissier D., Henry E., Boulémia C. Aide à la conception de fondations de bâtiments : un modèle d'expertise. Revue Française de génie civil. Vol.3-n°5/1999

[BOI 00] Boissier D., Décision et incomplétude. Revue Française de Geotechnique, 93, 81-92, 2000

[BOR 05] Bordes J.L., A propos de l'histoire des barrages en France, quelles leçons du passé ? Annales du BTP, April (in French), 2005

[BOR 09] Bordes L., Paroissin C., and Salami A. a degradation model based on a gamma process and the Brownian notion introduction and estimation model parameters, 1-4, 2009

[BOU 00] Bourquin F., Sportisse B., Quelques remarques sur la modélisation des risques, Actes du Colloque, UNESCO, Paris, 8-9Novembre 2000

[BRE 00] Breysse D., Le Génie Civil et la chaîne de prévention et de gestion des risques, Actes du Colloque, UNESCO, Paris, 8-9Novembre 2000

[BRE 02] Breysse D., and Vasconcelos E.C.: Evaluation of management strategies for sewer system performances, Int.Conf.DminUce London, 8pages, 2002.

[BRE 03] Breysse D., Dimensions humaines et sociales de la maîtrise des risques de défaillances d'ouvrages.Proceedings of GC'2003,Environnement et Patrimoine: Les nouvelles Donnes, AFGC, Paris (France), 2003

[BRE 09] Breysse D., « maitrise des risques en Génie Civil, tome3 » Sécurité des constructions et réglementations, *Hermès sciences publications/ Lavoisier*, 2009

[BRE 11a] Breysse D., Duprat F., Melaca V., Motet G., and Schofs F. Ingénierie forensique: améliorer les performances, anticiper les défaillances. *Proceedings of the MRGenCi and FonCSI Conference*, Paris, France, 2011

[BRE 11b] Breysse D., La maîtrise des risques, du projet aux ouvrages existants : quels enjeux ?. Séminaire International, Innovation &Valorisation en Génie Civil & Matériaux De Construction, INVACO2, Rabat, Maroc, 25-26 Nov. 2011.

[BRE 12] Breysse D., Learning from experiences: forensic engineering and collapse databases, Forensic Engineering, Inst. Civ. Eng., vol. 165, issue FE2, 63-75, 5/2012

[BRE 14] Breysse D., Ndiaye A., Failure case databases related to risk in civil engineering, Forensic Engineering, 167, 1, 27-37, 2014

[BRE 18] Breysse D., Taillandier F., Baudrit C., Knowledge model for forensics in civil engineering, 40th IABSE Symp., 19-21 September, Nantes (France), 2018,.

[BRI 05] BRIME. Gestion des ponts en Europe- Rapport final du projet européen BRIME, collection Etudes et recherches des LPC- série Ouvrages d'art- n°49, IFSTTAR, France, 2005

[BRI 09] Bridle R.J., Sims F.A. The effect of bridge failures on UK technical policy and practice. Procedings of the Institution of Civil Engineering, paper 800001,2009

[BUL 05] Bulusu and Sinha. "Comp. Methods predicting bridge deterioration", Transportation Research Record-1597,pp.25-32, TRB, NRC, USA, 2005.

[CAD 83] Cady P.D., and Weyers R.E., Chloride penetration and the deterioration of concrete bridge decks, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol.5, N°2, pp.81-87, 1983

[CAI 11] Caitlyn D.-M.: Fault tree model for bridge collapse risk analysis. A thesis Clemson University, 2011.

[CAL 12] Callaway P., Gilbert M., Smith C.C. Influence of backfill on the the capacity of masonry arch bridges. Bridge Engineering, ice proceendings, 2012

[CAL 97] Calgaro J. Introduction aux Eurocodes, Presse de l'ENPC, 1997.

[CAR 07] Carper K.L., ASCE technical council on forensic engineering: enhancing the influence of forensic engineering in the United States. *Proceedings of the International Forensic Engineering Conference, Mumbai, India, 2007*

[CDO 98] Colorado Department of Transportation (CDOT): Pontis bridge inspection coding guide, Denver, Colorado, 1998.

[CHA 14] Chase S.B.: The need for conducting Forensic analysis of decommissioned bridges. Report No.UVA-2012-05, the Pennsylvania State University, 2014.

[CHA13] Chang C.-Y., Tsai M.-D.: Knowledge-based navigation system for building health diagnostis, Advanced Engineerings Informatics 27/246-260,2013.

[CHE 92] Chein M., and Mugnier M.L., Conceptual Graphs: Fundamental Notions.Revue d'Intelligence Artificielle 6 (4),345-406, 1992

[CHE 95] Chein M., and Mugnier M.L., Conceptual Graphs are also graphs. Research report LIRMM, 95003, January 1995

[CHE 05] Chen B.S., Yura J.A., Williamson E.B., Franck K.H., Top-lateral beacing systems for trapezoidal steel box-girder bridges, Technical report 0-1898-4 Center For Transportation Research Bureau of Engineering Research the University of Texas at Austin October 2005

[CHE 09] Chein M., Mugnier M.L. Graph-based knowledge Representation and Reasoning. Computational Foundations of Conceptual Graphs. *Springer*, Advanced Information and Knowledge Processing Series, London,2009.

[COO 14] Cook W. Bridge failure rates, consequences, and predictive trends. Thesis of Doctor of Philosophy, UTAH STATE University, 2014.

[CRE 02] Cremona C. Modélisation et effet des aléas, partie 2. Revue Française de Génie Civil, 6:3,303,2002

[CRE 03] Cremona C. (dir.), Application des notions de fiabilités à la gestion des ouvrages existants. Paris : Ed. Presses ENPC, 447 p, 2003.

[CRE 05] Cremona C. Analyse de performance des ouvrages existants : vers une approche basée sur la notion de cycle de vie. Nupeer , Paris 2005

[CUR 07] Curt C., Boissier D., Pathologie des barrages : développement d'une base de connaissances et application aux ouvrages en remblai, 25è Rencontres de l'AUGC, Bordeaux, 23-25 mai 2007

[CUR 08] Curt C., Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances, application aux barrages en remblai. Thèse de doctorat en génie civil, de l'Université Blaise Pascal-Clermont II (France), 21 Janvier 2008.

[DAN 08] Danioti B., Lupica Spagnolo S., et Paolini R., Climatic data analysis to define accelerated ageing for reference service life evaluation. In: Durability of building Materials and components 11, T32-195, Istanbul, 2008

[DAV 16] Davila Delgado J.D., Buther L.J., Gibbons N., Brilakis L., Elshafie M.Z.E.B., Middleton C.: Management of structural monitoring data pf bridges using BIM. Bridge Engineering, ice, 2016

[DAV 98] Davenport TH., Prusak L., Working knowledge: how organizations manage what they know. Harvard Business School Press, 1998

[DE-B 97] de Brio J., Branco F.A., Thoft-Christensen P.,and Sorensen J.D.: An expert system for concrete bridge management. Engineering Structures, 19 (7), 519-526, 1997

[DEL 00] Delatte N.J. Using failure case studies in civil engineering education. Proceedings of 2nd ASCE Congress on Forensic Engineering, San Juan, Puerto Rico. ASCE, Reston,VA, USA, pp.430-440, 2000.

[DEL 02] Delatte N.J., and Rens K.L., " Forensics and Case Studies in Civil Engineering Education: State of the Art". *J.Perform.Constr.Facil,* 16(3), 98-109, 2002.

[DE-L 04] De Laurentis D., Callaway R.k., A system-of-systems. Perspective for public policy decisions, *Review of policy research* Vol.21, No. 6: 829-837, 2004

[DIA 00] Diab Y., Génie urbain et environnement : quelques pistes de recherche.p.200, Habilitation à diriger des recherches, Université de Savoie-Chambéry, 2000

[DIA 10] Diaz O.L., Plat D., Pochet P., Sahabana M., When everything is just a bridge! Renovation of structure and urban dysfunctions in Douala, *Belgeo*, No.1-2, 183-196, 2010

[DUF 05] Duffey RB., Predicting tragedies, accidents, errors and failures using a learning environment. Science and Technology of Advanced Materials 6(8): 878-8852, 2005.

[EAS 11] Eastaman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM handbook : Aguide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors, John Wikey&Sons.2011

[EBU 15] Ebuzoeme O.D., Evaluating the significance of poor road design as a factor of road failure: A study of Onitsha-Enugu Expressway, Southeastern Nigeria. Civil and Environmental Research, Vol.7, No.2, 2015

[ECA 16] Commission Economique des Nations Unies pour l'Afrique: Profil pays-République du Congo, Addis-Abeba (Ethiopie), www.uneca.org, mars 2016,

[ELD 05] El-Diraby T.E., Kashif K., Distributed ontology architecture for knowledge management in highway construction. Journal of Construction Engineering&Management, ASCE, 131 (5), p.591-603, 2005

[EL-T 02] El-Tawil S., Okeil A., Behavior and design of curved composite box girder bridges, final report Department of civil and environnmental engineering, University of central Florida Orlando, October 2002

[ENR 99] Enright M.P., Frangopol D.M., Condition prediction of dteriorating concrete bridges using Bayesian updating. *J.Struct.Engng*., ASCE, 125,766-775, 1999

[EZZ 09] Ezzdine R.: Endommagement des monuments historiques en maçonnerie. Thèse de doctorat (spécialité mécanique), université de Bordeaux1, France (2009).

[FAN 11] Fan W., Yuan W., Yang Y., Fan Q., Dynamic demand of bridge structure subjected to vessel impact using simplified interaction model. J.Bridge Eng., 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000139, 117–126, 2011

[FAU 06] Fauchoux G., VSC « Méthode d'aide à la gestion de patrimoines». Guide Technique, Collection des Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées, DISTC-Diffusion des Editions, Paris, août 2006.

[FAU 11] Fauchoux G., Billon J., Bourneton N., L'Hermite S., Riou L., Thauvin B., Application de la méthode VSC à la gestion d'un parc d'ouvrages portuaires. CETMEF, 2001

[FEL 68] Feld J., Construction failure 2nd Ed., New York: John Wiley&Sons.Inc., 1968

[FEL 97] Feld J., Carper K.L, Construction failure 2nd Ed., New York: John Wiley & Sons.Inc., 1997

[FEN 17] Feng C.W., Lu S.W.: Using BIM to automate scaffolding planning for risk analysis at construction sites, 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, *ISARC 2017*.

[FER 13] Ferrer B., 2013. Application des outils de la Sûreté de Fonctionnement aux ouvrages de génie civil de la RATP, rapport de Travail de fin d'Etudes, Ecole d'Ingénieurs de la Ville de Paris, Février 2013.

[FER 17] Ferrara N., Le BIM au profit de la gestion et du partage des connaissances, Thèse professionnelle, ESTP Paris-Ecole des Ponts ParisTech, 21 décembre 2017

[FER 92] Ferraris C. Acquisition des connaissances et raisonnement dans un univers multi-agents : application à la prise de décision en génie civil urbain. Thèse de doctorat Informatique, Université de Nancy I (France), 7 Février 1992.

[FER 97] Fernandez M., Gomez-Perez A., Juristo N., METHONLOTOY /from ontological art towards ontological engineering, In Proceedings of the Spring Symposium, Series on Ontological Engineering (AAAI'97), 1997.

[FHW 95] Federal Highway Administration: Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges. Report No.FHWA-PD-96-001. FHWA, U.S. Department of Transport, 1995

[FHW 99] Federal Highway Administration: Strategic Asset Management framework Requirements, 1999.

[FIS 01] Fisher J.W., et al. Hoan bridge forensic investigation failure analysis final report. Wisconsin Department of Transportation and the Federal Highway Administration, June 2001.

[FLY 10] Floyd L.: SCDOT Bridge Maintenance Engineer Interview, 17 November 2010.

[FOR 13] Fortineau V. Contribution à une modélisation ontologique des informations tout au long du cycle de vie du produit, thèse de doctorat (Informatique), Université Paris Tech, 2013

[FRA 04] Frangopol D. M., Kallen M.-J., Noortwijk J.M. Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions, *Struct.Engng Mater.*, 2004

[FRA 07] Frangopol D. M., and Liu M. Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle const*. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.3, N0.1, 29-41, ed. Taylor &Francis March 2007.

[GAL 14] Galinon-Mélénec B. The future of "Homme-Trace".A substantial societal challenge. 4th International Conference on Complex Systems and Applications, Normandie University/ULH, June 23,2014

[GIL 08] Gil J. & Durate J. Towards and urban design evaluation framework. In the eCAADe, Antwerpen, Belgium, pages 257-264, 2008.

[GOM 99] Gomez-Perez A. Ontological Engineering: A state of the art. Expert Update: knowledge Based Systems and Applied Artificial Intelligence 2, 33-43, 1999

[GON 96] Gonzalez J.A., Feliu S., Lopez W., Ramirez E., Alonso C., Andrade C. Some questions on the corrosion of steel in concrete. Part II: Corrosion mechanism and monitoring, service life prediction and protection methods. Materials and structures, Vol. 29, pp.97-104, March 1996

[GRA 90] Graedel, T.E., Frankenthal R.P., Corrosion Mechanism for Iron and Low Alloy Steels exposed to the atmosphere. Journal of the Electrochemical Society, 137:p.2385-2394, 1990

[GRI 10] Grilo A., Jardin-Goncalves R. Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environnements. Automation in Construction 19,pp.522-530, 2010

[GRU 93] Gruber T. A translation approach to portable ontologies. Knowledge Acquisition, 5(2):199-220, 1993.

[GRU 96] Grundstein M.& Barthès J.P.A. An individual view of the process of capitalizing knowledge. In Proceedings of ISMICK 4, RotterdamErlong Verlag, 1996

[GUT 98] Gustkowski R.-M., and Arenella N.-D. Investigation of Pontis- A bridge Management Software, 1998

[HAB 84] Habibagahi K., Langner J.A. "Horizontal subgrade modulus of granular soil". Latterally loaded deep foundations: Analysis and performance, Langner J.A., Mosley E.T., Thompson C.D., *eds, ASTM,* West Conshohocken, *Pa*., 21-34, 1984.

[HAG 17] Haghani R., et al., Refurbishment of existing concrete and steel-concrete bridge structures. Version 2, D2.1, SURBRIDGE work group, 20 February 2017.

[HAJ 95] Hajdin R., Grob J., "Massnahmenplannung für die Erhaltung von kunsbauten, Phase 2: Grobkonzept", Dr. J. Grob &Parthner AG, Winterthur, 1995

[HAT 07] Hatamura Y., Failure knowledge database to learn lessons from past experience. *Proceedings of IAEA Regional Asian Workshop on Managing Nuclear Knowledge,* Tokyo, Japan, 2007.

[HAW 98] Hawk H., and Small E.P., The BRIDGIT bridge management system. Struct.Engng Int., IABSE, 8, 309-314, 1998

[HEL 13] Helmerich R., Riveted Steel Bridges: Semantic Management of Knowledge, Raport serii PRE nr3/2013, Ph.D. Thesis, 2013, Institute of Civil Engineering Wroclaw University of Technology, Berlin (Allemagne)

[HON 12] Hong J.-H., Chiew Y.-M., Lu J.-Y., Lai J.-S., Lin Y.-B. Houfeng bridge failure in Taiwan, American Society of Civil Engineers, 2012.

[HOP 84] Hopwood II T., Havens J.H. Introduction to cable suspension bridges. Kentucy Transportation Center Research, Report, University of Kentucky, 1984

[HOW 93] Howard H.C., Abdalla J.A., and Phan D.H.D., "Primitive-Composite approach for structural data modeling", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol.6, No.1, pp.19-40, 1993.

[ICO 93] ICOLD. Bulletin 93: Ageing of dams and appurtenant works-Review and recommendations.Paris:ICOLD, 235p.,,1993

[IDA 69] Association Internationale de Développement : Evaluation d'un projet d'études routières (République du Congo), Rapport No.PTR-7a, 14 avril 1969

[IDS 08] Instruction générale sur la surveillance des ouvrages ferroviaires. RATP, 2008.

[IMH 04] Imhof D., Risk assessment of existing bridge structures. A dissertation submited to the University of Cambridge in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, December 2004

[ISO 02] ISO 12108:2002, Metallic materials-Fatigue testing-Fatigue crack grouth method, 2002

[ISO 05] International Organization for Standardization. Buildings and constructed assets-service life planning, ISO 15686- part 1, 2, and 8, 2005.

[ISO 09] ISO/CEI 301010, risks management- Risks assessment Techniques, 2009

[KAP 97] Kaplan S., The words of risk analysis. Risk Analysis, vol. 17, n°24,1997

[KAR 07] Karam B., Development of knowledge of concrete Bridge Maintenance System. Master's Theses, Western Michigan University, 2007

[KHA 13] Kartabil F.K., Breysse D., Taillandier F., Développement d'une base de connaissance pour la maîtrise de risques de projet de construction. 31ème Rencontres de l'AUGC, E.N.S Cachan, 29 au 31 mai 2013.

[KIB15] Kibboua A., Naïli M., Benouar D., Méthod d'estimation de la vulnérabilité sismique des ponts à poutres isostatiques en béton armé, *9ème Colloque National AFPS 2015-IFSTTAR*, 2015

[KLE 71] Kleene S. Mathematical logic, Armand Colin, 1971.

[KUB 98] Ludescher H., Hajdin R., "KUBA-MS-Ticino Benützerhandbuch" EDMZ,Berne, 1998

[KWO 99] Kwooi-Hock N. B. Analysis of masonry arch bridges, thesis of doctor, Napier University (Edinburgh, UK), 1999

[LAR 16] Large A., Une meilleure gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable : le modèle de prévision du renouvellement à long terme OPTIMEAU. Thèse de doctorat (génie mécanique), université de Bordeaux(France),2016

[LCP 89] "Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées" : Les ponts suspendus en France, SETRA 1989

[LEE 06] Lee S.-W., Gandhi R., Muthurajan D., Yavagal D., Ahn G.-J., Building problem domain ontology from security requirements in regulatory documents. In Proceedings of the 2006 International Workshop on Software Engineering for Secure Systems (SESS'O6), Shanghai, China, May 20-21, 2006

[LEE 11] Lee Kook J. Building Environment rule and analysis (BERA) Language. And its application for evaluating Building circulation and spatial program, thesis Gerogia Institute of Technology, May 2011

[LEE 13a] Lee G.C., Mohan S.B., Chao Huang., Fard B.N., A study of U.S. Bridge Failures (1980-2012), Technical Report MCEER-13-0008, Jun 15, 2013

[LEE 13b] Lee G.C., Qi J.C., Chao Huang : Development of a Database Framework for Modeling Damaged Bridges, Technical Report MCEER-13-0009, Jun 16, 2013

[LE-G 01] Le Gauffre P., Ruffier J., Tanguy C., Laffréchine K., Miramond M., Perraudin L.., Richard F., Projet CAPTUR «Consolidation d'un cadre d'Analyse des Patrimoines Techniques Urbains de type Réseau. Cas des réseaux d'eau et d'assainissement», Ministère de l'éducation Nationale, de la Recherche et de la Technologie, INSA, LYON-France, 2001

[LE-G 04]Le Gauffre, P., Joannis, C., Gibello, C., Desmulliez, J.J., Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains. Guide méthodologique. Lavoisier Tec&Doc, Paris, 416p, 2004

[LEH 92] Lehmann F. Semantic Networks in Artificial Intelligence.Pergamon Press. 1992

[LIA 09] Liao M., Okazaki T. A computational study of the I-35W bridge collapse, final report, Department of Civil Engineering University of Minnesota, October 2009

[LIU 10] Liu W. Terrestrial Lidar-based Bridge Evaluation. Thesis doctor of philosophy in Infrastructure and Environnemental Systems, University of North Carolina at Charlotte(USA), 2010

[LIU 16] Liu K., El-Gobary N., MASCE A. Semantic Modeling of Bridge Deterioration Knowledge for Supporting Big Bridge Data Analytics. Construction Research Congress, 2016

[LUD 99] Ludescher H.Hajdin R. Distinctive features of the Swuiss road structures management system. Proceedings International Brdige Management Conference, Denver Colorado, United States, 1999

[LOP 97] Lopez M. F., Gomez-Perez A., Juristo N., and METHONLOTOY: from ontological art to ontological engineering, Spring Symposium on Ontological Engineering of AAAI. University of Stanford, California, 1997, p. 30-40, 1997.

[MAD 12] Maddison B. Scour failure of bridges. Forensic Engineering, Vol.165 Issue FE1, 2012

[MAD 13] Madurapperuma M., Wijeyewickrema A.C. Response of reinforced concrete columns impacted by tsunami dispersed 20' adn 40' shipping containers. Eng.Struct., 56-1631-1644,2013

[MAK 06] Maksymowicz, M., Cruz, P.J.S., Bien,J., Helmerich,R., Concrete railway bridges-taxonomy of degradation mechanisms and damages identified bu NDT methods, 2006

[MAR 12] Marneffe H., Burrier G., Cochet D. Fragilité à basse température des aciers d'anciens ponts suspendus. Journées techniques Ouvrages d'Art, IFSTAR ,10 Mai 2012

[MC-G 14] McGuire M.B., Using building information modeling to track and assess the structural condition of bridges, Thesis, Colorado State University, Fall 2014

[MDO 05] "Box-Beam Concerns Found under the bridge : expanding inspector Handbook promises timely bridge care". Construction and technology research record, 2005

[MEA 08] Meadows, D. H., Thinking in Systems: A Primer. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing, p.187, 2008

[MEM 02] Memberg M.A.; Yura J.A., Franck K.H., Williamson E.B.A., A design procedure for intermediate external diaphragms on curverd steel trapezoidal box girder bridges, Research Report 0-1898-1, Center For Transportation Research Bureau of Engineering Research the University of Texas at Austin October 2002.

[MES 17] Messaoudi T., Proposition d'une ontologie de domaine dédiée à l'annotation d'images spécialisées pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel bâti, thèse de Doctorat, Université ParisTech, Art et Métiers ParisTech, 2017.

[MOR 00] Morcous G., Case-Based Reasoning for Modeling Bridge Deterioration, thesis the Degree of Doctor of Philosophy, Concordia University (Quebec, Canada), 2000

[MUG 09] Mugnier M.-L., Conceptual Graph rules and equivalent rules: A synthesis, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009

[MUG 96] Mugnier M.-L., Chein M., Représenter des connaissances et raisonner avec des graphes. Revue d'Intelligence Artificielle 10 (1),7-56, 1996

[NAI 10b] Naito C., Hodgson I., Development of flexural strength rating procedures for adjacents prestressed concrete box girder bridges. Journal of Bridge Engineering, 15(4), 408-418, 2010

[NAN 05] Nanjo A., Kanjo N., Ueda K., Nozaki S. A structure database and its application: Maintenance Information Management System and Bridge Management System of Hanshin Expressway, *Structure and Infrastructure Engineering*, 1:4, 285-294, 2005

[NDI 18] Ndinga Okina S., Taillandier F., Baudrit C., Breysse D., Louzolo-Kimbembe P., Ontologie intégrée à l'analyse des dysfonctionnements d'ouvrages d'art existants, 36èmes Rencontres de l'AUGC, ENISE/LTDS, Saint Etienne (France), 19 au 22 juin 2018

[NEW 11]: Newson T.A., Delatte N.J. "Case methods in civil engineering teaching". Canadian Journal of Civil Engineering, 38 (9), 1016-1013, 2011

[NON 95] Nonaka I., Takeuchi H. The knowledge creating company. Oxford: Oxford University Press, 1995

[O'CO 13] O'Connor A.J., Sheils E., Breysse D., and Schoefs F.: Markovian Bridge Maintenance Planning Incorporating Corrosion Initiation and Nonlinear Deterioration. Journal of Bridge Engineering, Vol.18, No.3, March1, 2013

[OLF 10] Olfa C. Un cadre ontologique générique de modélisation, de capitalisation et de partage de connaissances métiers situés en Ingénierie Système. Thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris; Ecole Nationale des Sciences de l'Informatique, Tunisie, 2010

[OLI 95] Ollivier H. CoGiTo : une plateforme de développement de logiciels sur les graphes conceptuels. Thèse de doctorat PhD, Université Montpellier II, France, 1995.

[OLS 95] Olsen G.R., Cutkosky M., Tenenbaum J.M., Gruber T.R., Collaborative Engineering Based on Knowledge Sharing Agreements*. *Concurrent Engineering: Research and Applications*. Volume 3 Number 2 June 1995.

[ORC 08] Orcesi A., Etude de la performance des réseaux d'ouvrages d'art et détermination des stratégies de gestion optimales. Thèse de doctorat (structure et matériaux), université Paris-Est (France),2008

[PAG 89] Page J. Load test to collapse on an arch bridge at strathmashie, Higland Region. TRRL Working Paper WP/B/174/89, Transport and Road Research Laboratory,Crowthorne, 1989

[PAG 89] Page J. Load tests to collapse on masonry arch bridges, Proc.1st International Conference on arch bridges, pp.289-298, 1995

[PAQ 02] Paquette G. Modélisation des connaisances et des compétences. Sainte-Foy (Québec):Press de l'Université du Québec, 2002

[PAT 16] Paterna A. H., Gestion patrimoniale des infrastructures de la RATP: développement d'un processus d'aide à la décision pour optimiser la stratégie de maintenance, Thèse de doctorat de génie urbain, Université Paris-Est (France),2016

[PEN 13] Pengpeng N., Effects of soil-structure interaction on direct displacement-based assessment procedure of multi-span reinforced concrete bridges. European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol.17, No.7, 507-531, 2013

[PER 92] Perie C.J., ed. The notion of a model, Group report in First International Conference on Entreprise Integration Modeling Technology (ICEIMT)MIT Presse, 1992

[PET 94] Petroski H. Design paradigms: Case histories of error and judgement in Engineering. Cambridge University, 1994

[PEY 03] Peyras, L., Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, développement de méthodes d'aide à l'expertise. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont 2, 199p, 2003

[PEY 04] Peyras, L., Boissier, D., Royet, P., Approches de l'analyse de risques en génie civil : exemples des barrages,Revue Française de Génie Civil, 8(2), pp.931-952, 2004.

[PEY 06] Peyras L., Royet P., Boissier D., Dam ageing diagnosis and risk analysis: Development of methods to support expert judgment. In Canadian Geotechnical Journal, Vol.43, 2006, p.169-186, 2006

[PHI 98] Philibert J., Vignes A., Bréchet Y., et Combrade P., Métallurgie: du minerai au matériau. Masson,1107p, Paris, 1998

[PLA 98] Plaxico C.A., Patzner G.S., Ray M.H. "Response of guardrail posts under parametric variation of wood and soil strength". Proc., Transp.Res.Board 77th Annu. Meeting, Washington, D.C., 1998

[POT 13] Potes Ruiz P., Kamsu Foguem B., Grabot B., Knowledge reuse integrating the collaboration from experts in industrial maintenance management. Knowledge-Based Systems, vol.50, pp. 171-186.ISSN 0950-7051, 2013

[POT 14a] Potes Ruiz P., Generation de connaissances à l'aide du retour d'expérience : application à la maintenance industrielle, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2014

[POT 14b] Potes Ruiz P., Kamsu Foguem B., Grabot B. Generating knowledge in Maintenance from Experience Feedback. Knowledge-Based Systems, vol.68, pp.4-20.ISSN 0950-7051, 2014

[PRA 00] Prat M., Modélisation des ouvrages de génie civil : la modélisation face à son risque, Risque et Génie Civil. Actes du Colloque, UNESCO, Paris, 8-9Novembre 2000

[PUS 10] Pushak N. et Briceño-Garmendia C.M.: Infrastructure de la République du Congo. Une perspective continentale (rapport pays), 1818 H Street, NW, mars 2010, Banque Mondiale. http://www.infrastructure.africa.org

[QIN 03] Qin S., Cui W., Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements, Elsevier Science Ltd, 2003

[RAI 08] Raimbault T., Briand H., Genest D., Lehn R., Loiseau S. : Une synthèse des modèles de représentation des connaissances à base des Graphes Conceptuels et OWL, ed.rnti, 2008.

[RAI 09] "Rail Accident Report". Failure of bridge RDG1 48 (River Crane) between Whitton and Feltham, 14 November 2009.

[RIV 98] Rivard H., Fenves S.J., and Gomez N., "Case-Based reasoning for conceptual building design", 1st International Conference on New Information Technologies for Decision Making in Civil Engineering, University of Quebec, Montreal, Quebec, October, pp.355-366, 1998

[ROC 98] Roche P., Rosenthal-Sabroux C., Zacklad M., Ingénierie des connaissances pour la gestion de projet. Pont-à-Mousson, France, IC, Ingénierie des Connaissances, 1998.

[ROE 01] Roelfstra G., et al., Modèle d'évolution de l'état des ponts en béton armé, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).Maintenance, construction et sécurité des ouvrages (MCS), 2001.

[ROS 84] Ross S. et al., "Tacoma Narrows, 1940". Construction disasters. McGraw-Hill Book Co, New York, NY.,1984

[RUS 09] Russell H. Adjacent precast concrete box beam bridges : connections détails. Transportation Research Board, Washington, DC, 2009

[SAN 07] Sanchez C. Spécification et implémentation du Système d'Aide à la Décision Multicritère pour la Maintenance préventive et la Gestion du Patrimoine de la Société d'Autoroute ESCOTA : le projet SINERGIE. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris (France),199p, Décembre 2007

[SAR 16] Sarhosis V., De Felice G., De Santis S. review of experimental investigations and assessment methods for masonry arch bridges, *Structure and Infrastructure Engineering*, January 2016

[SAY 13] Saydam D. Reliability and risk of structural systems under progressive and sudden damage. Theses and dissertations, paper 1616, Lehigh University, 2013.

[SCH 08] Schoefs F., Breysse D., Sheils E., O'Connor A., Efficacité de la maintenance conditionnelle sur des structures à dégradation aléatoire. European Journal of Environmental and Civil Engineering, Ed. Lavoisier, 2008

[SEB 15] Seba Minsili L., Pettang C. Toward preventive maintenance and rehabilitation of bridges in Cameroon, European Journal of Sustainable Development, 4, 1,63-74, 2015

[SER 05] Serre D., Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations. Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée, 363 p, 2005.

[SET 96] Service d'études techniques des routes et autoroutes. Méthodologie de l'outil IQOA « Image de la qualité des ouvrages d'art », guide-F9630 PV, Sétra 1996

[SHI 14] Shi P., Huo J., Wang Q., Constructing ontology for knowledge sharing of materials failure analysis, Data Science Journal, Vol.12,13January 1994

[SIA 97] Sianipar, P.R.M., and Adams T.M., Fault-Tree model of bridge element deterioration due to interaction, Journal of Infrastructure Systems, ASCE, Vol.3, No.3, pp.103-110, 1997

[SID 17] Siddiquee K., and Shahria Alam M. Infrastructure du pont routier dans la province de la Colombie-Britannique (C.-B.), Canada, Infrastructures 2017.

[SIL 04] Silva R. Contribution à l'analyse probabiliste de la performance des ponts en béton armé. Thèse de doctorat structures et matériaux, Ecole doctorale Nationale des Ponts et Chaussées, Paris (France), 2004

[SOW 84] Sowa J.F. Conceptual Structures: Information Proc. in Mind and Machine. Addison–Wesley, 1984

[SOW 95] Sowa J.F., Conceptual Graphs for Representing Conceptual structures, Harvard University Presse Cambridge, MA, 1995

[STA 01] Staab S., Schnurr H., Studer R., Sure Y., Knowledge processes and ontologies.IEEE Intelligent Systems, 16(1):16-34, 2001

[STA 09] Staab S., and Studer R. (Eds.): Handbook on ontologies. Springer, 2nd eds, 2009

[STA 13] Staab S., and Studer R. (Eds.): Handbook on ontologies. Springer Science & Business Media, 2013

[STE 99] Stewart M.G., Val D.V., Role of load history in reliability-based decision analysis of aging bridges, Journal of Structual Engineering, July 1999

[STE 03] Stewart M.G., ASCE, Val D.V.: Multiple Limit States and Expected Failure Costs for Deteriorating Reinforced Concrete Bridges. Journal of Bridge Engineering, Vol.8, No.6, November1, 2003.

[STE 06] Stewart M.G., Mullard J.A. « Reliability based assessment of the influence of concrete durability on the timing of repair for RC bridges ».IABMAS 2006

[STR 90] Stramann M., Streckel H., One the atmospheric corrosion of metals which are covered with thin electrolyte layers-I. Verification of experimental technique. Corrosion Science, 30(6/7):p.681-696, 1990

[STU 98] Studer R., Benjamins V., et Fensel D., Knowledge engineering: Principales and methods, data & Knowledge Engineering, vol.25(1-2), Elservier, p.161-197, 1998.

[SUB 89] Subramani M., Gergely P., Conley C.H., A knowledge-based approach to structural design of earthquake-resistant buildings. Technical Report NCEER-89-0006, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, January 15, 1989

[TAI 11] Taillandier F., Mehdizadeh R., Breysse D., Evaluation et agrégation des risques pour les projets de construction par le recours aux Risk Breakdown Structures, XXIXe Rencontres universitaires de Génie Civil, Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011

[TAI 18]Taillandier F., BAUDRIT C., Quynh Anh H.,NDINGA OKINA S.,BREYSSE D., Modèle de connaissance pour l'ingénierie forensique en Génie Civil, 10èmes journées Fiabilité des Matériaux et des Structures - Bordeaux (France), 27-28 Mars 2018

[TAL 04] Talon, A., Boissier, D., Chevalier, J.L., Hans, J., (2004). A methodological and graphical decision tool for evaluating building component failure. CIB World Building Congress. Toronto, Ontario, Canada.2-7 May 2004

[TAL 06] Talon A., Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascla-Clermont II, 2006

[TAL 08] Talon A., Curt C., Boissier D. Méthodologie d'évaluation possibiliste de la performance d'ouvrages de génie civil, Proceeding JMSF, Nantes (France), 2008

[TAR 13] Tarrieu J.-M., Gestion des ouvrages d'art: Les démarches méthodologiques. Journée technique gestion des OA (CoTITA IdF), Sétra, Paris le 26 nov. 2013,

[THO 98] Thompson P.D., Small E.P., Johnson M. and Marshall A.R., The Pontis bridge management system. Struct.Engng. Int, IABSE, 8, 303-308, 1998

[TIB 17] Tibaut A., Kaucic B., Perhavec D., Panetto H., Tiano P.,Knowledge engineering approaches for building materials domain, 1st International Conference on Construction Materials for Sustainable future, Zadar, Croatia, CoMS2017

[TOL 16] Tolmer C.-E. Contribution à la définition d'un modèle d'ingénierie concourante pour la mise en œuvre des projets d'infrastructures linéaires urbaines: Prise en compte des interactions entre enjeux, acteurs, échelles et objets. Thèse de doctorat Génie Urbain, université Paris-Est (France), 07 Novembre 2016.

[TOM 00] Tomlinson S.S., et Vaid Y.P. "Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion ", Canadian Geotechnical Journal, vol. 37, p1-13, 2000

[TUU 82] Tuuti K., Corrosion of steel in concrete. Swedish cement and concrete research Institute, Stockholm, 1982

[USC 96] Uschold M., Gruninger M., Ontologies: principals' methods and applications, Knowledge Engineering Review, 1996

[VAN 01] Vanier D.J., Why industry needs asset management tools. *Journal of computing in Civil Engineering,* 15 (1), 35-43, 2001.

[VAS 05]Vasconcelos E.-C., Outils d'aide à la gestion du patrimoine «Réseau d'assainissement non visitable». Thsese de doctorat, université de Bordeaux 1, France ,(2005).

[VAT 09] Vatcha R., Lee S.-W., Murty A., Tolone W., Wang X., Dou W., Chang R., Ribarsky W., Liu W., Chen S.-E., Hauser E. Towards sustainable infrastructure management: Knowledge-based service-oriented computing framework for visual analytics. Proceedings of SPIE Defense, Security and Sensing, 13-17, April, USA, 2009

[VIL 88] Villemeur, A., Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité-Facteurs humains-Informatisation. Editions Eyrolles, 798p, 1988.

[WAN 09a] Wang X., Dou W., Vatcha R., Liu W., Chen S.-E., Lee S.-W., Chang R., Ribarsky W.: Knowledge integrated visual analysis system for in-depth management of bridge safety and maintenance, *SPIE-Knowledge Str.* , 2009

[WAN 09b] Wang X., Dou W., Chang R., Ribarsky W. Integrated remote sensing and visualization (IRSV) system for transportation infrastructure operations and management, phase One, Vol.4 : Use of knowledge Integrated Visual Analytics System in Supporting Bridge Management. USDOT Report No.01221, Charlotte Visualization Center, Dec.2009

[WEN 03] Wen Y.K.,Ellingwood B.R., Veneziano D., and Bracci J., Uncertainty Modeling in Earthquake Engineering, Mid-America Earthquake Engineering Center. Urbana, II., pp.113, 2003.

[WEN 09] Wenzel H., Health monitoring of bridges, John Wiley & Sons, Ltd., 2009

[WOO 08] Wood J.G.M., L'ingénierie Forensique - l'approche Anglaise. Colloque Le Pont, Toulouse (France), 2008.

[WOO 15] Wood J.G.M., Applying Forensic Investigation of failures of structural performance. *IABSE Conference-Structural Engineering*, Geneva Swizerland, September 23-25 2015

[WUT 01] Wuttrich B.R., Wekezer J., ASCE F., Yazdani N., Wilson C.: Performance evaluation of existing bridge fenders for ship impact. Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol.15, No.1, February, 2001.

[XIN 16] Xin L., Zhongfu L., Shaohua J. Ontology-based representation and reasoning in building construction cost estimation in China, Future internet, 2016

[XU 13] Xu L., Lu X., Guan H., Zhang Y. Finie-element and simplified models for collision simulation between overheight trucks and bridge superstructures. J.bridge Eng.1140-1151, 2013

[YE 94] Ye X. modélisation et simulation des systèmes de production: une approche orientée-objects, thèse de doctorat mécanique industrielle, INSA Lyon (France), 1994

[ZHA 09] Zhao J., Miao S., Zhang S.: An integrated model for optimizing maintenance and inspection of potential failures. In proceedings of the 8th International conference on Reliability, Maintenability and Safety, pp.626-629, 2009

[ZHA 14] Zhang S. Integrating safety and BIM : Automated construction hazard identification and prevention. Thesis (Doctor) Gerogia Institute Technology, August 2014

[ZHA 15] Zhang S., Boukamp F., Teizer J. Ontology-baed semantic modeling of construction safety knowldege: Towards automated safety planning by job hazard analysis (JHA), Automation in Construction, Elvier, 2015

[ZHE 91] Zheng X., Fard N.: A maintenance policy for repairable systems based on opportunistic failure-rate tolerance. IEE Transaction on Reliability, 40(2), pp.237-244, 1991

[ZIM 08] Zimmermann A. Sémantique des réseaux de connaissances : gestion de l'hétérogénéité fondée sur le principe de médiation. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble 1, 2008

[ZOU 19] Zou Y., Gonzalez V., Lim J., Amor R., Guo H.B., Jelodar M.B., Systematic framework for post-earthquake bridge inspection through UAV and 3D BIM reconstruction, Proceedings CIB World Building Congress, Hong Kong, 17-21 June 2019

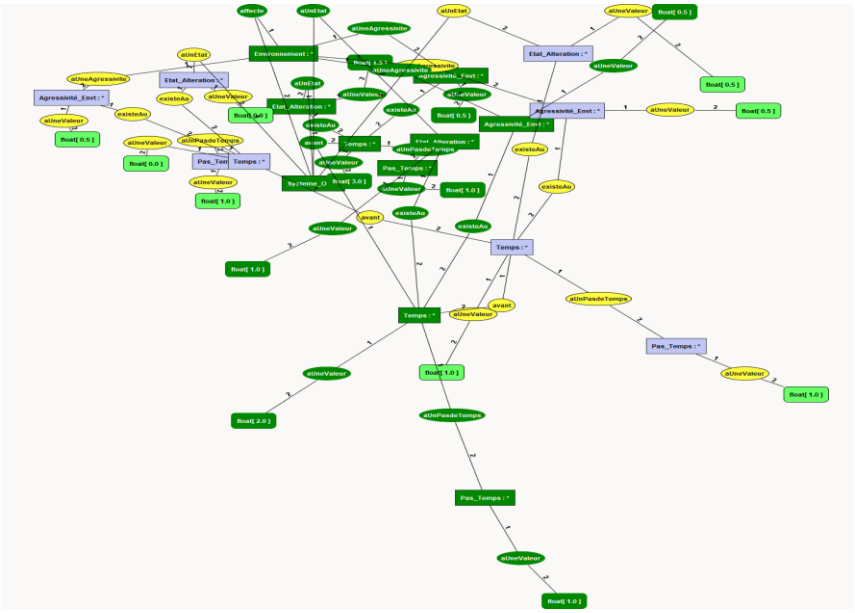
[ZWI 95] Zwingelstein, G., Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels, Paris, Hermès Editions, 601p, 1995

[ZWI 96] Zwingelstein G., La maintenance basée sur la fiabilité. Guide pratique d'application de la RCM. Paris: Hermès Editions, 666p,1996.

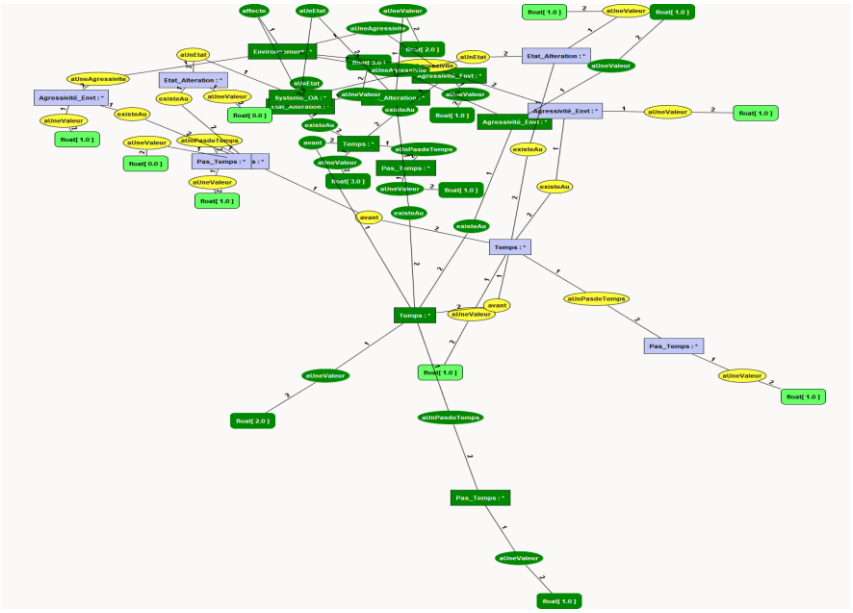
ANNEXES

Annexe 1 : Résultats des simulations du vieillissement naturel d'ouvrages

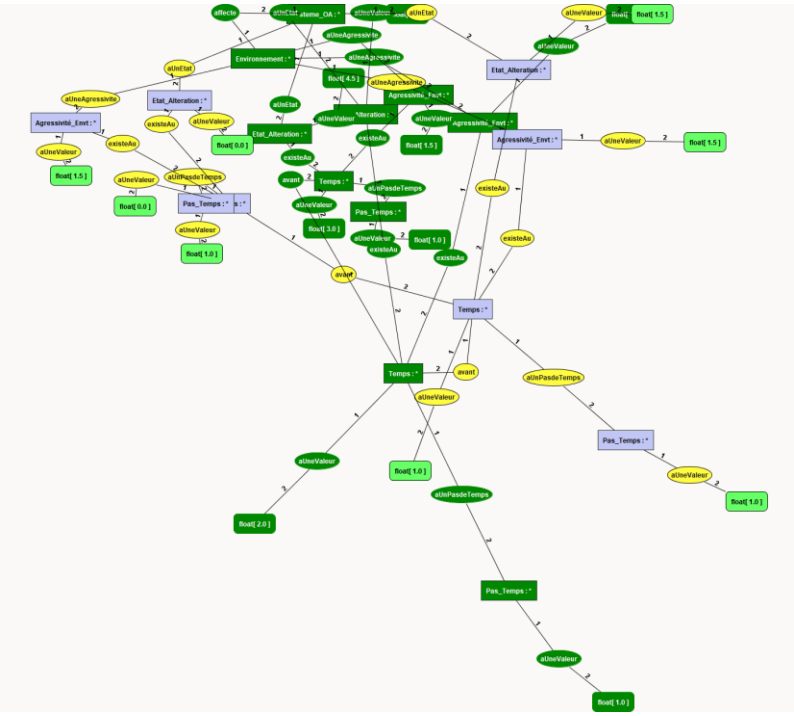
A1.1 : Graphe de simulation du vieillissement d'ouvrage ($\alpha = 0.5$; dt=1)



A1.2 : Graphe de simulation du vieillissement d'ouvrage ($\alpha = 1.5$; dt=1)



A1.3 : Graphe de simulation du vieillissement d'ouvrage ($\alpha = 2$; dt=1)



Annexe 2 : Base de cas (Rex) sur les défaillances de ponts en milieu tropical

A2.1 : Illustration des cas de défaillances spectaculaires



Défaillance, pont Belo horizonto (Brésil)



Défaillance, pont Shendam (Nigeria)



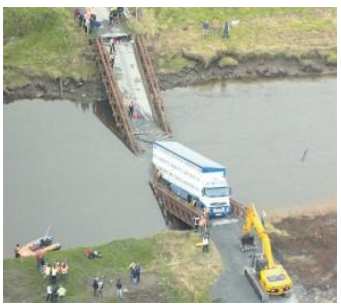
Défaillance, pont RN7(Madagascar)



Défaillance ,pont Duviver (Haïti)



Défaillance, pont Matomb (Cameroun)



Défaillance, pont Ballignar (Inde)

A2.2 : Rex complet des cas de défaillances de ponts en milieu tropical (1)

Description du pont		Date	Constats	
Pays	Localisation/type constructif/matériau		causes primaires	défaillances
Cameroun	Pont à poutres treillis (Moungo), www.cameroon-info.net/stories/	01/07/2004 (35 ans)	incendie de la structure due au c	Effondrement global
	Ponts à poutres en béton armé (axe Batouri-Yokadouma sur RN2) www.camer.be/index1.php?art=29309&rub=11:1	01/10/2013	vieillissement	Effondrement global rupture de travée rupture de dispositif sécurité
	Pont à poutres en bois (Nyong)	2006	vieillissement/surchages	Effondrement global
	Pont à poutre en béton (Nyakokobo)	2005 (75ans)	veillissement/surcharges	Effondrement global
	pont metallique Matomb (route Yaoundé-Douala)	21/10/2016	erosion interne /insuffisance ent	Effondrement global
	Pont treillis (Mayo-Boula)	2009	corrosion/vetuscité/insuffisance	effondrement partiel (rupture charpente)
Congo	Pont à poutres treillis métallique (Mouyondzi)	24/04/2012 (47 ans)	choc de camion sur la structure métallique corrosion	Effondrement global/torsion tablier rupture appareil d'appuis (voile) 5morts/11 blessés/2 camions perdus
	Pont à poutres mixte acier-béton (Djiri 2)	juin-13 (3ans)	surcharge/choc conception non adaptée	Défaillance partielle Fissure dalle tablier Affaissement hourdis travée Eclatement joint chaussée Fissure revêtement chaussée
	Pont à poutre metallique (Louessé)	2010 (45 ans)	choc véhicules corrosion erosion interne	Perte de performance Déformation élements verticaux Dététrioration élements tablier
	Pont à poutre metallique (Niari)	2010	Choc véhicules (et sur-gabarit) corrosion, insuffisance entretien	Perte de performance Déformation élements verticaux Dététrioration élements tablier
	Pont à poutre-caisson béton précontraint (Bas-kouilou)	2009	agression de l'environnement marin	défaillance pattielle rupture de câbles de precontrainte extérieur
		2009 (24 ans)	choc véhicules (surcharge, convois) corrosion/ erosion	(perte de contrainte) fissures du tablier et piles effondrement perré maçonné
	Pont à poutre en béton armé(Louassi, Mouyondzi)	2006	agression du trafic erreur d'exécution defaut structurel	defaillance partielle déplacement de l'appui (tassement) fissuration de dalle tablier (aux appuis) fissuration et glissement talus
	Pont en Mixte acier-beton (Loudima)	2018	vieillissement /affouillement	defaillance partielle
	Pont mixte acier-beton (Mvouma)	2016	erosion externe	defaillance partielle
	2 Ponts à poutres treillis (CFCO)	2018	explosif (vandalisme)	Effondrement global (rupture de tablier)
	1 Pont en bois RN1		surcharge/choc	Effondrement partiel
Congo RDC	Pont mixte acier -bois (Ange, axe RN4)	2015	convois de camions surchargés vent violent	Effondrement global Rupture appareil d'appuis (culée) Trosion de la structure du pont
	Pont à poutre en béton Kawizi, RN5) http://uviraonline.com/kawizi-rdc-effondrement-du-pont/	mai-16	erosion externe de culée insuffisance d'entretien	Perte de performance (ruine du tablier)
	Pont mixte acier-bois (RouteNkamba, BasCongo) http://www.infobascongo.net/beta/?p=8762	01/10/2016	choc de camion pourriture	Défaillance partielle rupture élements du platelage du tablier
	Pont mixte acier-bois (Lubiriha) afrique.lalibre.be/28733/effondrement-dun-pont-reliant-la-rdc-a-louganda/	01/12/2018	vieillissement /surcharges insuffisance entretien/vent	Effondrement total (perte de l'ouvrage) basculement de tablier/appuis
Madagascar	Pont metallique Marivorahona (axe RN6)	24/08/2012	vieillissement/ surcharge de camion	Effondrement partiel du pont Rupture de travée (appui de rive)
	Pont à poutre en beton (Mankara)	11/09/2012	vieillissement/corrosion	Effondrement global rupture du tablier
	Pont à poutres treillis (Vohiposa) (www,madaplus,info/RN7-effondrement-du-pont-de-Vohiposa_a12045.hml	01/09/2017	vieillisement/surchages/insuffisa	Effondrement global

A2.2 : Rex complet des cas de défaillances de ponts en milieu tropical (2)

Description du pont		Date	Constats	
Pays	Localisation/type constructif/matériau		causes primaires	défaillances
Brésil	Pont mixte acier-béton Guaiba (BR-290)	30/04/2008	collision de navire sur travée principale (reduction de flexion)	effondrement partiel avarie du système de freinage ; blocage de la travée
	Pont à poutre en béton (Piste cycliste) Rio de Janeiro	2016	crues excessives	Effondrement global
	Pont à poutre en béton Belo Horizonte	2014	erreur d'exécution qualité des matériaux	Effondrement global
	Pont en béton da Alça (Etat de Para)	07/04/2019	vieillissement, choc bateau	Effondrement global (échappement tablier:pile)
Inde	Pont treillis (Ballinagar) http://www.kerryman.ie/news/27-months-later-still-no-bridge-in-ballinagar-1737337.html	fevrier 2007	corrosion/surcharges/ insuffisance d'entretien	Effondrement global
	Pont poutre metallique (axe ville Harda)	07/07/1905	Innondation (mousson)	Effondrement ; déraillement de 2 trains
	Pont treillis ferroviaire Kadalundi	21/07/2001	errosion interne/absence d'entretien	effondrement
	Pont poutre en béton Srinagar	01/02/2012	fatigue/qualité materiau/ insuffisance entretien	Effondrement global (destruction tablier)
	Pont treillis metallique Hailakandi	06/03/2012	vieillissement et absence d'entretien (erreur humaine)	Effondrement global
	Pont à poutre mettalique Dhave (Rafiganj train disaster)	sept-07	corrosion/insuffisance entretien	Effondrement partiel (tablier)
	Pont treillis métallique (Wagaon) http://joegoauk-pointofview.blogspot.fr/2012/02/bridge-collap	17/02/2012 (4ans)	corrosion surcharges camions	Effondrementglobal (déformation vers le bas de la travée)
	Pont à poutre en béton (Bombay) http://www.leparisien.fr/faits-divers/mousson-en-inde-2-morts-et-20-disparus-ap	01/08/2016	Inondation (mousson) glissement de terrain/vieillisseme seiseme	Effondrement global rupture de n travées zone courante 2 morts + 20 disparus
	Pont treillis Gawana, Uttar Pradesh	13/06/1905	defaut de conception	
	Pont à poutres béton (Markanda)	juil-06	affouillement, crue	effondrement total (rupture de tablier)
	http://www.tribuneindia.com/2006/20060722/himachal.htm		surcharges	
	Pont treillis (Bailey)(www.goanews.com/news_disp,php	fèvr-12	corrosion, insuffisance entretien	effondrement total (rupture de tablier)
	Pont arc en béton (Jhua)	août-07	affouillement en rivière	effondrement global
Vietnam	Pont à câbles métallique (DA Dang) www.thanhniennews.com	27/06/2009	Surcharge camion corrosion insuffisance entretien	Effondrement global rutpure du tablier bilan : 09 morts
	Pont à poutre en béton Can Tho (Hanoi) www.lemoniteur-expert.com/actualite/transports_infrastructures/	2007 (3ans)	Affaissement du sol de fondation des échafaudages(pluie)	effondrement global
	Pont suspendu (Nord du pays) http://www.site-vietnam.fr/vietnam-effondrement-dun-pont-fait-plusieurs-morts/	fèvr-14 (1an)	Rupture de câbles	Effondrement global
	Pont à câbles metallique (Ghenh) www.meteomedia.com/nouvelles/articles/un-pont-seffondre-apres-avoir-ete-heurte-par-une-barge/65280	21/03/2016 (114ans)	collision d'une embarcation surchargée	Effondrement local Effondrement de 2 piles courant
				Rupture de travées zone courante rupture des câble porteurs
Nigéria	Pont à poutres en béton (Abakpa-Nike) http://joisays.blogspot.fr/2012/06/enugu-bridge-collapses-cut	juin-12 (37 ans)	affouillement, crue	Endommagement (glissement) de l'assise d'appuis (rive, courant); fissuration (rupture) dalle transition (voie) déformation de travée
	Pont à poutres en beton (Durumi III)	19/09/2014	affouillement/inondation	Effondrement global
			détérioration anterieure	déplacement/renversement appui 11 morts
	Pont à poutre en béton Mokwa	2016	affouillement/vieillissement	Effondrement global
	Pont à poutre en béton (Shendam)	2012	affouillement/vieillissement	Effondrement global
Haïti	Pont à poutre treillis métallique (Duviver)	01/03/2016	surcharges détériorations anterieures	Effondrement
	Pont à poutre en beton (Bonnet)	2003	insuffisance d'entretien affouillement	Effondrement Global
	ganthier-haiti-collapsed-bonnet-bridge-pont-bonnet-hurricane.html			
	Pont à poutre en beton (Montrouis) http://jfjpm.blogspot.com/2008/09/hatiouragan-hanna-affaissement-de-la.html	07/09/2008	affouillement de pile	Effondrement partiel

Annexe 3 : Vocabulaire technique des connaissances du domaine

A3.1 : lexique des concepts (1)

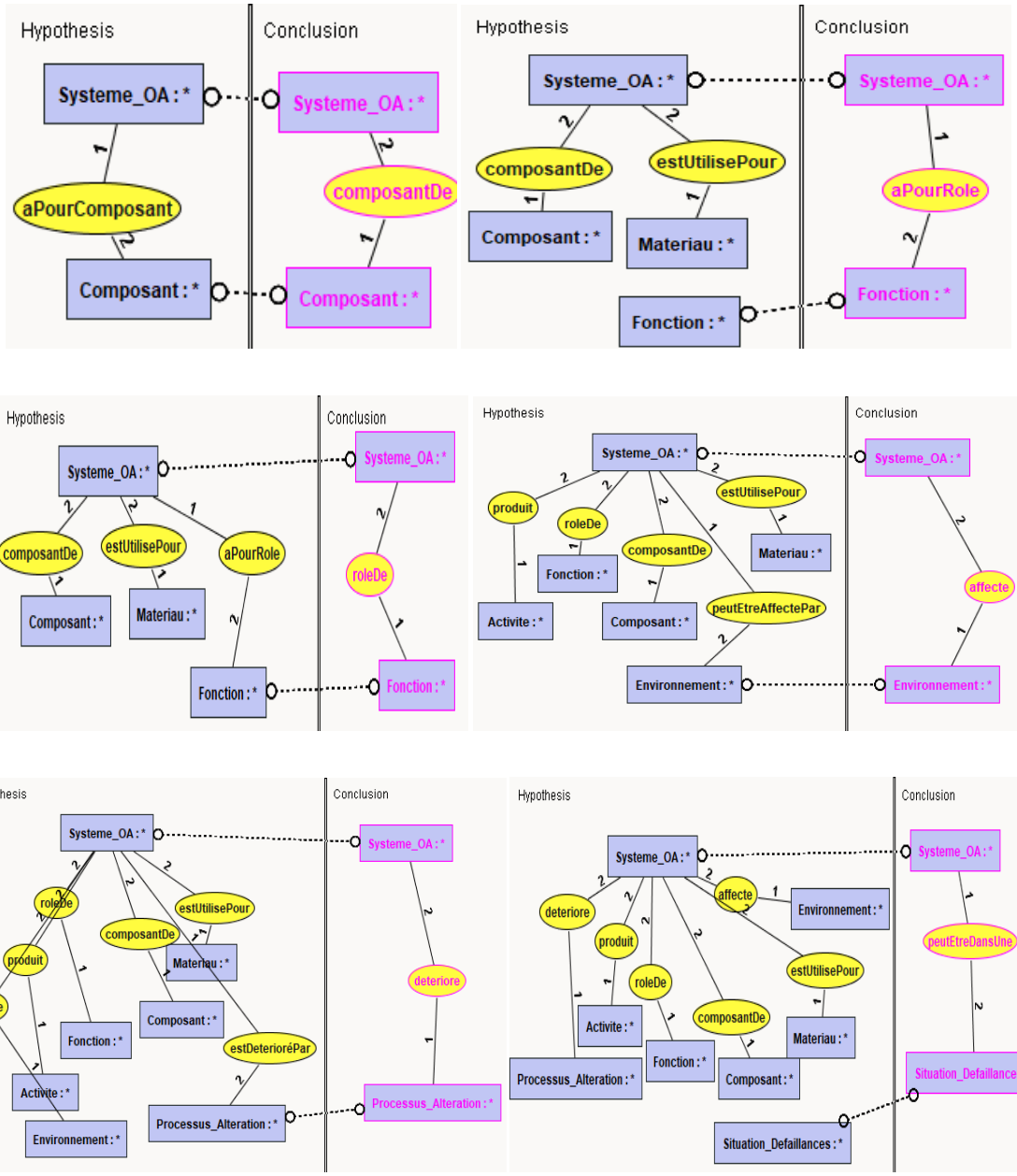
n°1	Concept	Définition
1	Système d'ouvrage d'art	est une combinaison de composants en interaction qui satisfont des fonctions spécifiques avec un niveau de performance requis
2	Composant	est une partie (ou un sous-système) qui en interaction avec d'autres, forme un système pour assurer des fonctions spécifiques
3	Matériau	est une substance représentant la matière physique d'un composant (ou de système), qui constitue ses performances
4	Fonction	est ce qu'un système ou un composant doit satisfaire en respectant une exigence de performance donnée
5	Activité	est un ensemble coordonné de tâches réalisées durant le cycle de vie d'un ouvrage (conception, construction, maintenance)
6	Environnement	est ce qui est externe au système étudié, mais peut changer son état
7	Situation de défaillance	est une situation dans laquelle un système ou un composant perd sa fonction prévue en raison d'un niveau de performance insatisfaisant
8	Processus d'altération	est un processus qui peut affecter un composant, et conduit à une situation de défaillances : corrosion, affouillement, pourriture, usure…
9	Facteur extrême	est ce qui se passe à l'extérieur d'un système, et peut changer sa situation : inondation, chargement excessif, mouvement de terrain…
10	Propriété de matériau	est un indicateur pathologique mesurable qui renseigne la performance d'une fonction : résistance limite de compression, résistance limite de traction...
11	Performance	est la capacité d'un système ou d'un composant à remplir sa ou ses fonction (s).
12	Niveau de performance attendu	est l'exigence de performance pour contribuer à la satisfaction d'une fonction.
13	Niveau de performance réel	est une mesure réelle de l'exigence de performance à un instant donné.
14	Facteur d'agressivité	est ce qui est lié à l'environnement et/ou au matériau, dont l'action combinée contribue au processus de défaillance.
15	Etat d'altération	est la condition d'un matériau de composant et son environnement définit à travers tous ses paramètres.
16	Agressivité d'environnement	est tout ce qui peut accélérer la propagation d'un mécanisme de défaillances dans le temps.
17	Acteur	est un intervenant qui participe à la réalisation ou à l'exploitation d'ouvrages.
18	Action de maintenance	est toute opération d'ingénierie visant à prévenir et à maintenir les performances d'ouvrages en état de satisfaction.
19	Ressource d'entretien	est l'ensemble de moyens nécessaires à la mise en œuvre d'actions de maintenance.
20	Erreur humaine	est l'ensemble des actes posés par un humain et peut influencer sur le comportement et la sécurité du système d'ouvrage.
21	mode de défaillance	est la manière dont un système ou un composant dysfonctionne sur le plan fonctionnel
22	Niveau de défaillance	est un indicateur qui qualifie l'ampleur d'une situation de défaillance.
23	planification d'activité	est une tâche qui consiste à intégrer les actions d'interventions sur les ouvrages dans un ensemble de programme précis.
24	Procédure	est une méthode pour mettre en œuvre une action de maintenance, une tâche de conception, une tâche de construction d'ouvrages
25	Tâche d'activité	est un ensemble d'actions élémentaires durant le cycle de vie d'un ouvrage avec une certaine durée.
26	Pont	est un système de génie civil, consistant principalement au franchissement d'obstacles par-le-dessus afin d'assumer la fonction de continuité et de sécurité de trafic.

A3.2 : Lexique des concepts (2)

27	Pont en arc	est un type de pont qui fonctionne en compression et en flexion, de manière telle que l'ossature porteuse de tablier fonctionne en flexion-compression et les appuis en compression.
28	Pont à poutres	est un type de pont dont le tablier dit « poutre », supporte mécaniquement les efforts de sollicitation via un comportement en flexion.
29	Pont suspendu	est un type de pont qui fonctionne en transformant les sollicitations pour que s'exercent majoritairement des efforts de traction, repris par une suspente et/ou un ensemble de câbles porteurs.
30	Propriété d'ouvrage/composant	est un paramètre qui permet l'identification physique d'un système ou d'un composant dans l'espace et sur le plan.
31	Ossature porteuse	est un sous-composant de tablier qui supporte le chargement appliqué à l'ouvrage
32	Tablier	est un composant majeur primaire du pont qui a pour fonction, assurer le trafic
33	Appui	est un composant majeur secondaire du pont dont la fonction consiste en la stabilité de l'ouvrage global.
34	Pile	est un appui de pont qui supporte les charges à mi-portée de l'ouvrage global et les transfèrent au sol.
35	Pile-Pylône	est un appui particulier dans un pont suspendu qui consiste au soutien des câbles porteurs/haubans pour assurer l'équilibre de l'ensemble.
36	Culée	est un appui de pont qui supporte les charges de l'ouvrage global aux extrémités d'obstacle et les transfèrent au sol.
37	Appareil d'appui	est un sous composant d'appui qui consiste en la liaison physique entre la structure de l'appui et l'ossature du tablier de manière à tôler/empêcher ses mouvements inacceptables.
38	Joint de dilatation	est un organe de liaison horizontale de la structure de voie sur un pont qui consiste à la dilatation du tablier et au confort du trafic au droit d'une coupure de travée.
39	Arc-voûté	est un sous-composant de tablier arqué qui transmet les charges verticales et obliques qui le sollicitent par compression axiale à ses extrémités (culées).
40	Câble porteur	est un élément porteur majeur qui stabilise un tablier de pont suspendu à câbles et résiste aux efforts de traction.
41	Hauban	est un élément porteur majeur qui stabilise un tablier de pont hauban et résiste aux efforts de traction
42	Câble Suspente	est un élément d'assemblage d'un tablier suspendu qui stabilise l'ensemble câbles porteurs et tablier suspendu
43	Massif de fondation	est un composant d'interface qui encastre l'ouvrage dans le sous-sol, pour reprendre ses charges globales de manière à assurer son équilibre statique et sa réponse aux mouvements de terrain.
44	Fondation	est un sous composant de l'appui dans un pont qui supporter les charges de l'ouvrage global afin d'assurer son stabilité.
45	Clef de voûte	est la partie centrale d'arche ou d'une voûte, supportant les charges en compression dans un pont en arc
46	Structure de voie	est un sous-composant d'interface qui consiste en la protection de l'ossature de tablier et au confort/adhérence du trafic.
47	rupture	est un fait particulier qui consiste en la séparation d'un composant ou d'un élément d'ouvrage en des parties ruinées
48	échappement	est un fait particulier de tablier à poutres isostatiques qui consiste en une chute des travées de pont ou de rotation de piles.
49	instabilité de tablier	est un fait particulier du tablier suspendu (ou à poutres) qui consiste en une torsion ou en une déformation.
50	déformation	est un fait particulier qui consiste en la modification de l'intégrité d'une propriété d'ouvrage ou de composant (géométrie).

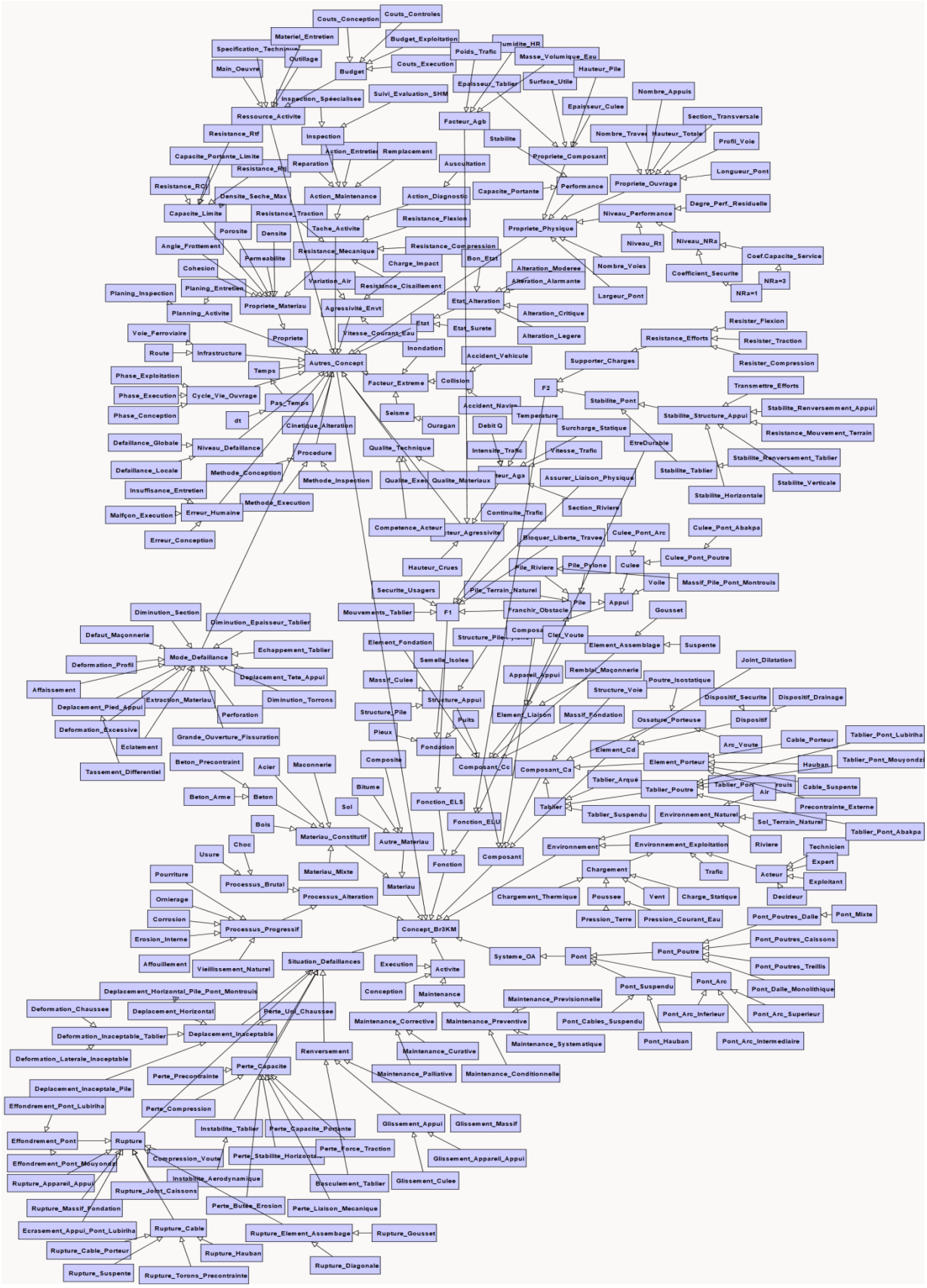
Annexe 4 : Cadre de modélisation conceptuelle unifiée (M1) du modèle Br3KM

A 4.1 : Graphes de règles d'organisation des connaissances



Les règles d'organisation présentées sont formalisées suivant les principes de transivité et de similarité entre les concepts de base pour construire le modèle conceptuel unifié obtenu.

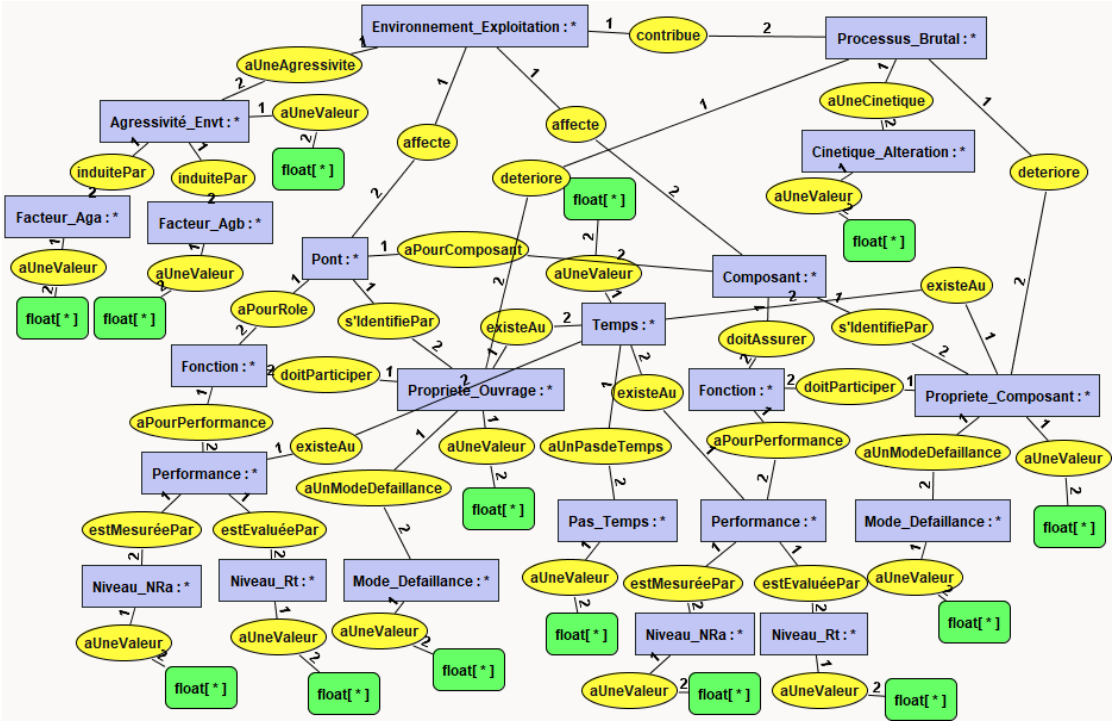
A4.2 : Modèle conceptuel unifié complet des connaissances (M1)



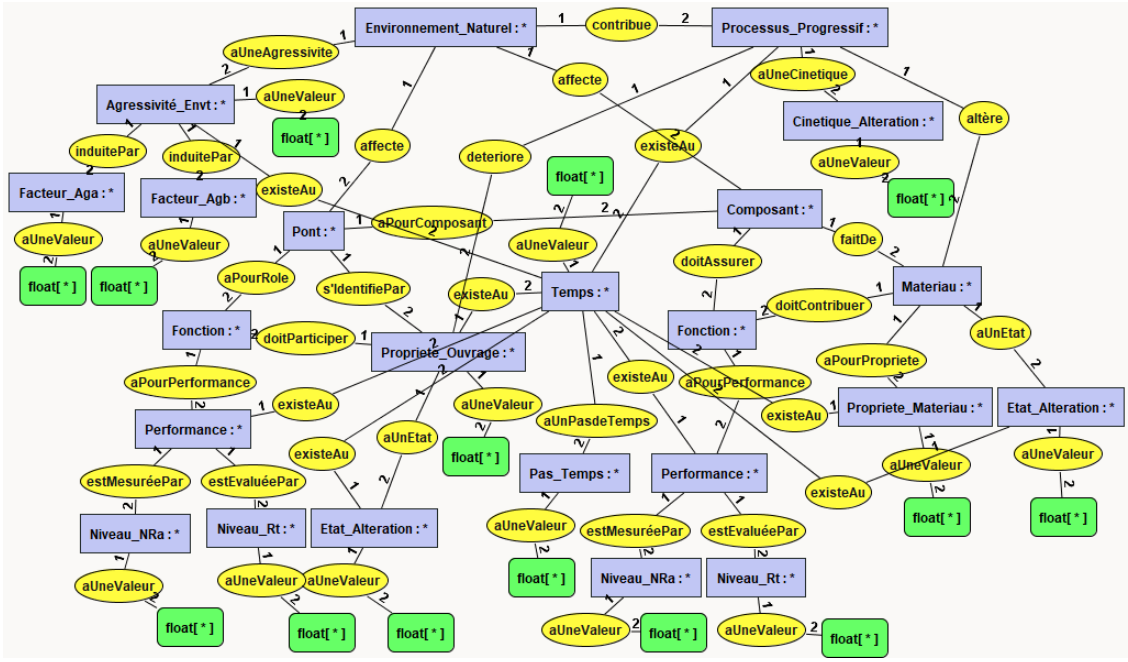
Annexe 5 : Graphes de cadre de simulations des modes de défaillances des ponts

A 5.1 : Sous-modèles de simulation à l'échelle de composant M2.1 et M2.2

A5.1.1 : Sous-modèle de simulation (M2.1) pour décrire les mécanismes de défaillance résultant de processus brutal

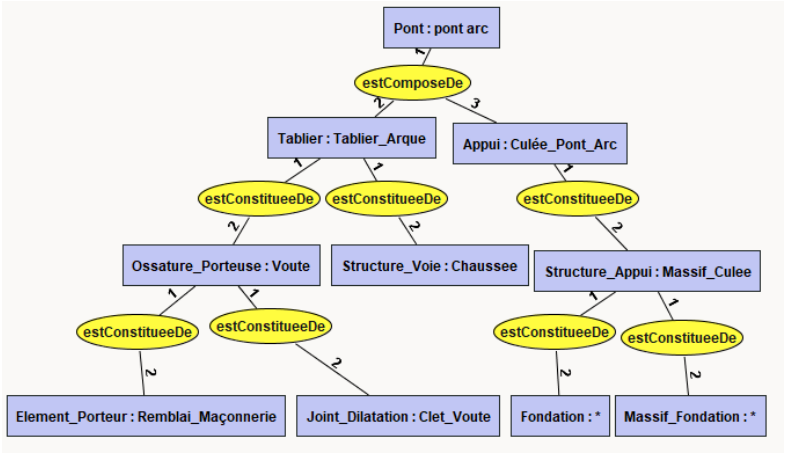


A5.1.2 : Sous-modèle de simulation M2.2 pour décrire les mécanismes de défaillance, résultant de processus progressif



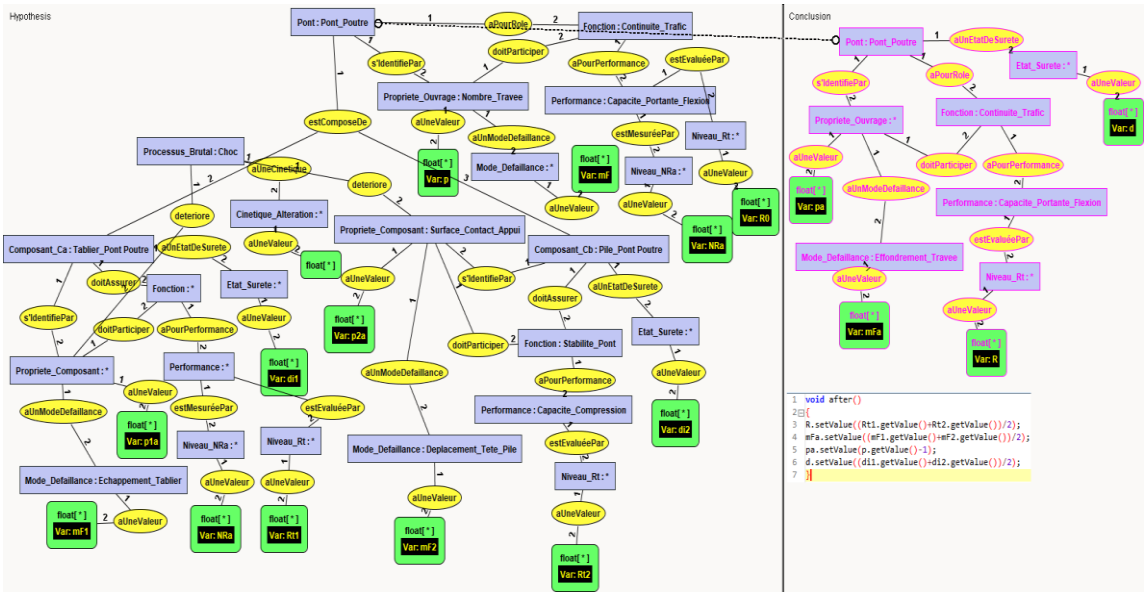
Annexe 5.2 : Illustration de la description multi échelle de pont arc (voûte de maçonnerie)

Cette modélisation concerne les principaux composants majeurs dont la perte de performance à un instant engendre des situations de défaillances dans les ponts arc.

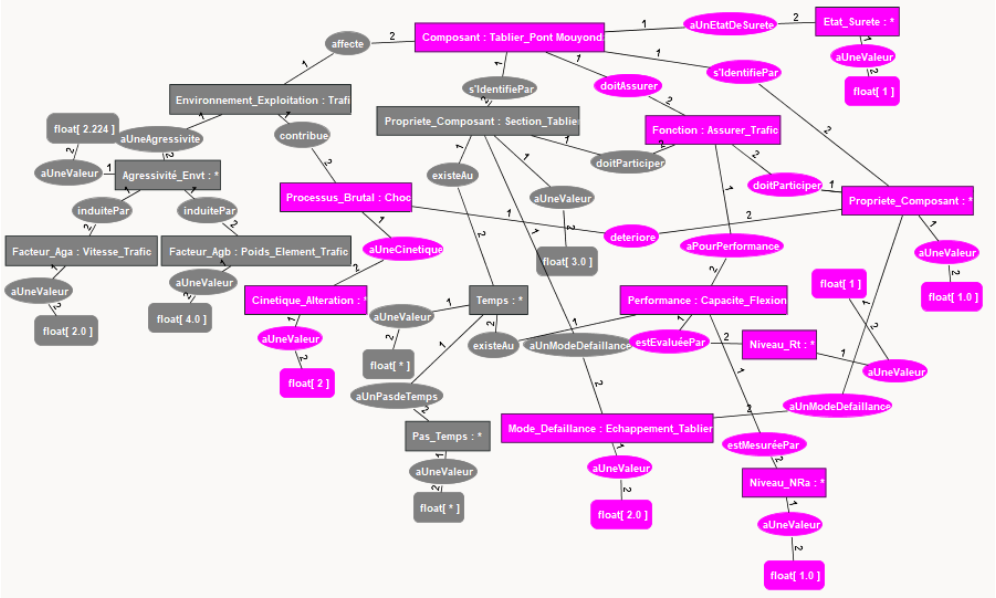


Annexe 5.3 : Simulation du mécanisme de défaillance de pont à travées isostatiques

A5.3.a Graphe de règle experte pour décrire la défaillance globale d'un pont

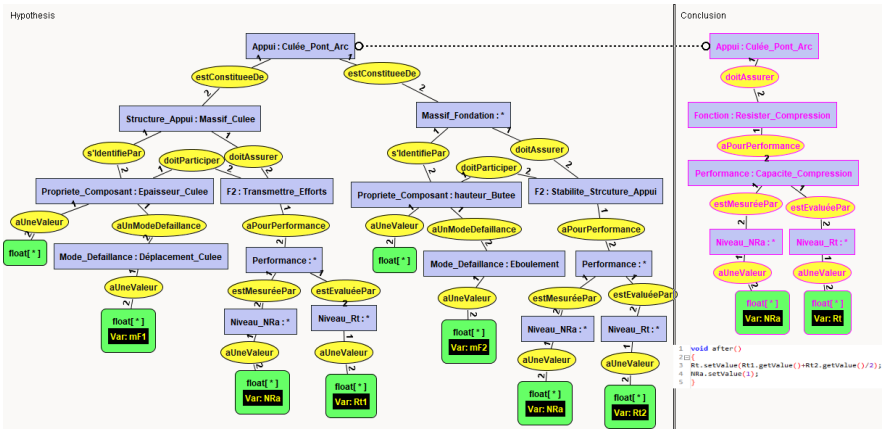


A5.3.b : Graphe de simulation de mécanisme d'échappement (configuration 1)

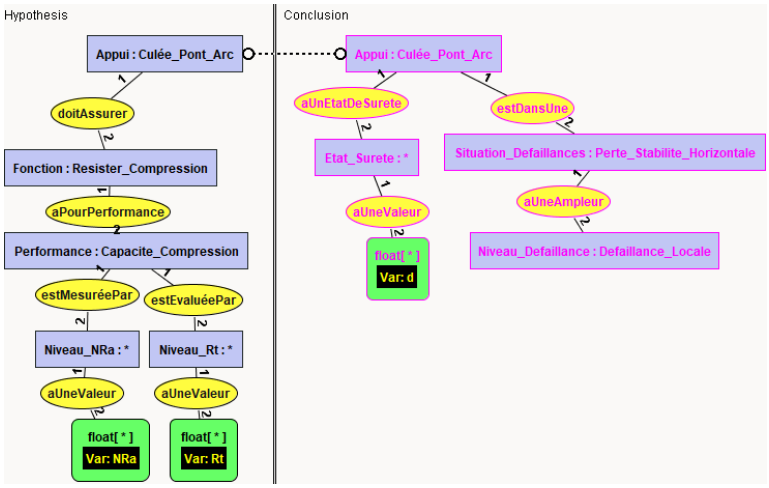


Annexe 5.4 : règles de mécanisme de défaillance de culée de pont arc

A5.4.a : Graphe de règle modélisant un cadre d'analyse fonctionnelle de culée de pont

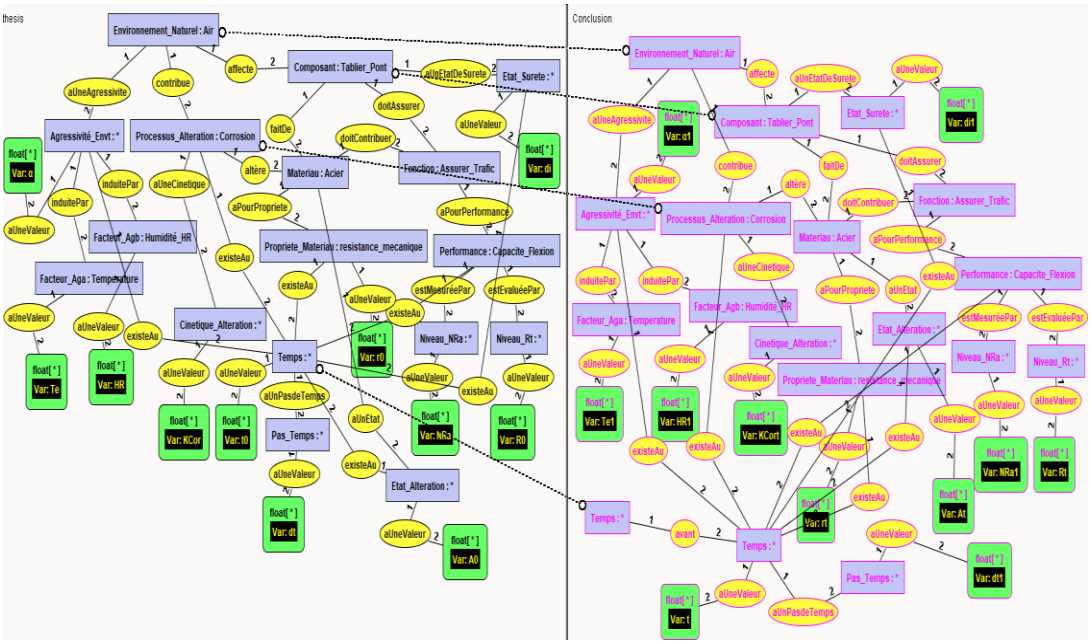


A5.4b: Graphe de règle décrivant le fait que la culée soit dans une situation de défaillance



Annexe 5.5 : cadre de simulation de processus de corrosion des composants de pont

A5.5a Graphe de règle experte pour la simulation du processus de corrosion

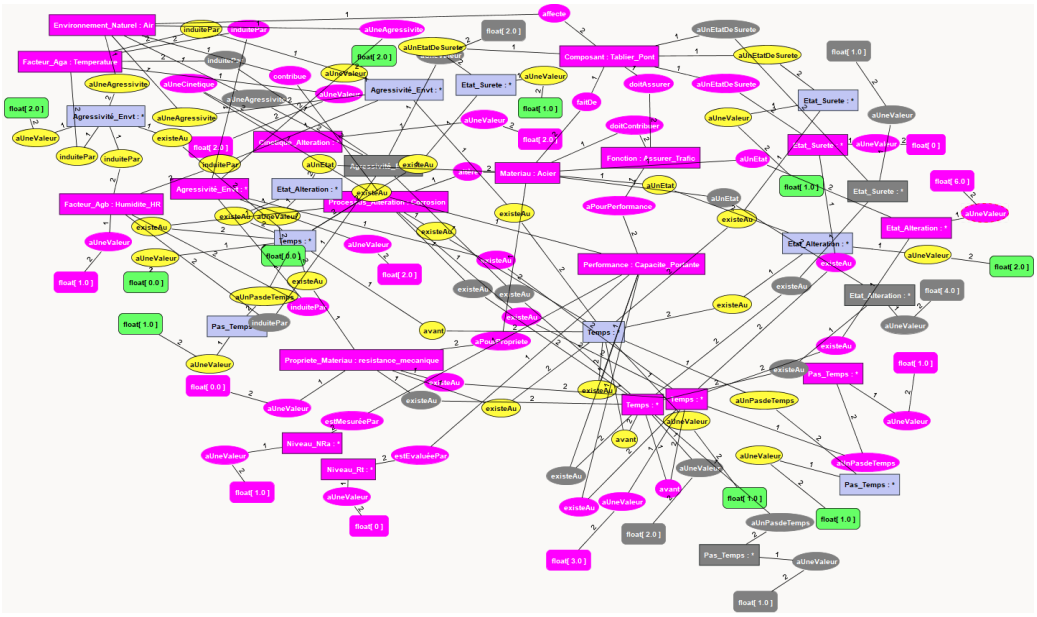


A5.5 b : Formule logique de la règle experte décrivant le processus de corrosion

```
void after()
{
t.setValue(t0.getValue()+dt.getValue());
dt1.setValue(dt.getValue());
a.setValue(HR.getValue()*Te.getValue());
a1.setValue(a.getValue());
KCor.setValue(a.getValue());
KCort.setValue(KCor.getValue()*dt1.getValue());
int rt_Calcule=(int)(r0.getValue()-KCort.getValue());
rt.setValue(rt_Calcule);
int At_Calcule=(int)(A0.getValue()+KCort.getValue());
At.setValue(At_Calcule);
NRa1.setValue(NRa.getValue());
Te1.setValue(Te.getValue());
HR1.setValue(HR.getValue());
R0.setValue(5);
di.setValue(NRa.getValue());
int Rt_calcule =(int)(5 * rt.getValue()/(float)(r0.getValue()));
Rt.setValue(Rt_calcule);
{
if (Rt.getValue()<NRa.getValue()) {
di1.setValue(0);}
else{
di1.setValue(di.getValue());}
}

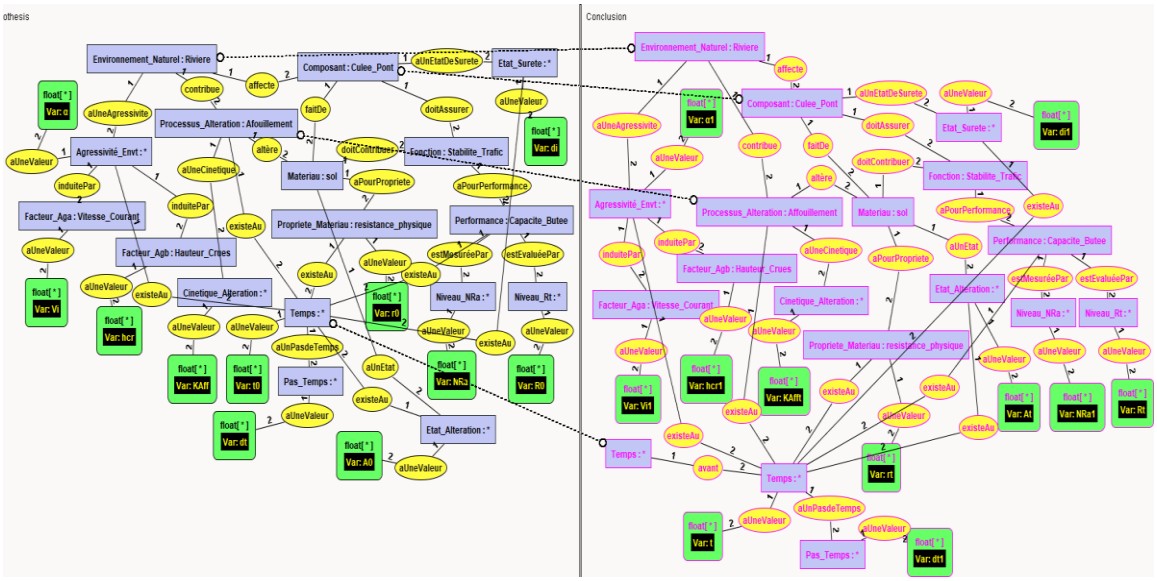
}
```

A5.5c : Extrait de simulation de corrosion du tablier pour une cinétique KCor (t) = 2



Annexe 5.6 : Cadre de simulation du processus d'affouillement de berges de pont

A5.6a : Graphe de la règle experte pour décrire le processus d'affouillement

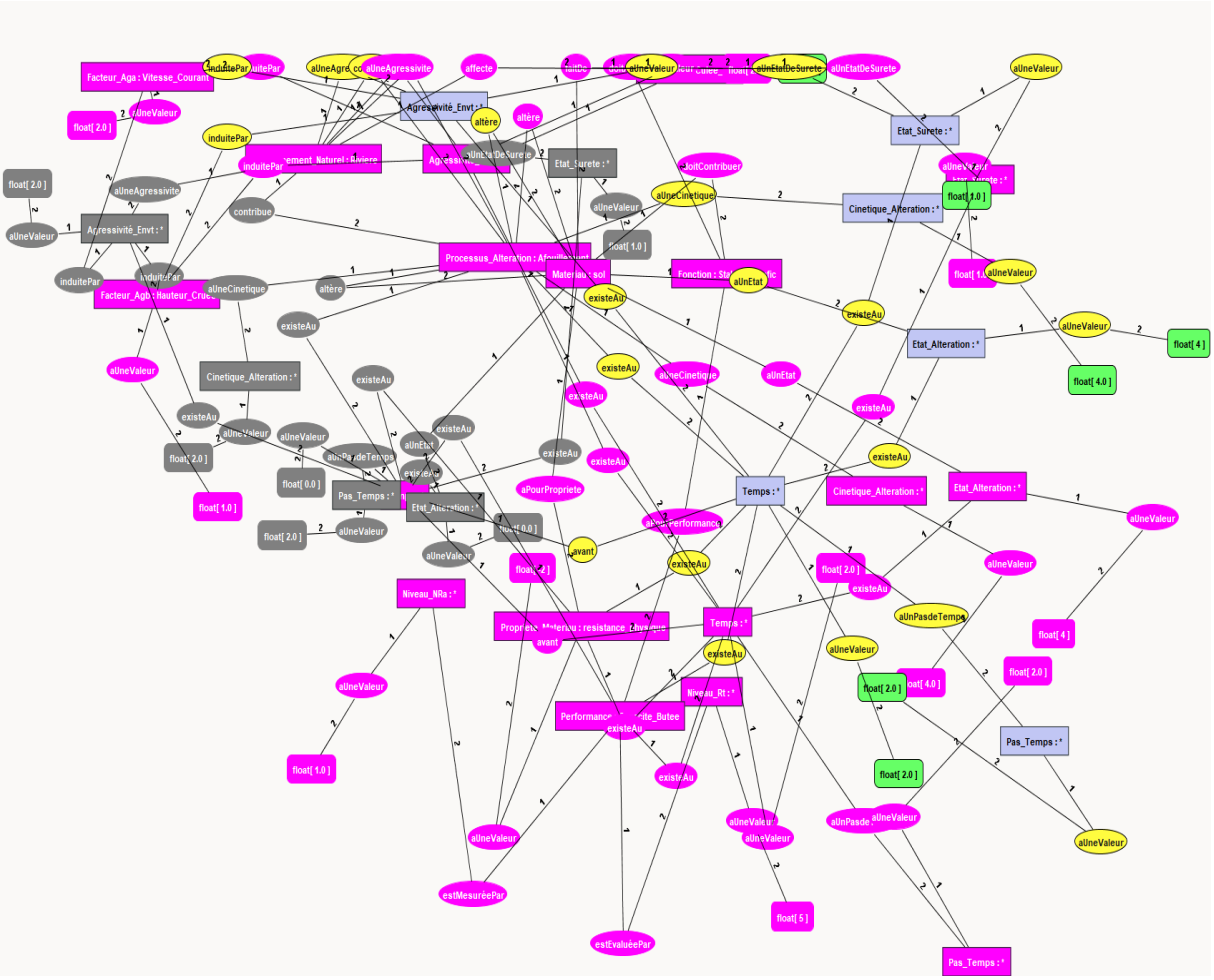


A5.6b : Formule logique de la règle experte pour modéliser l'affouillement

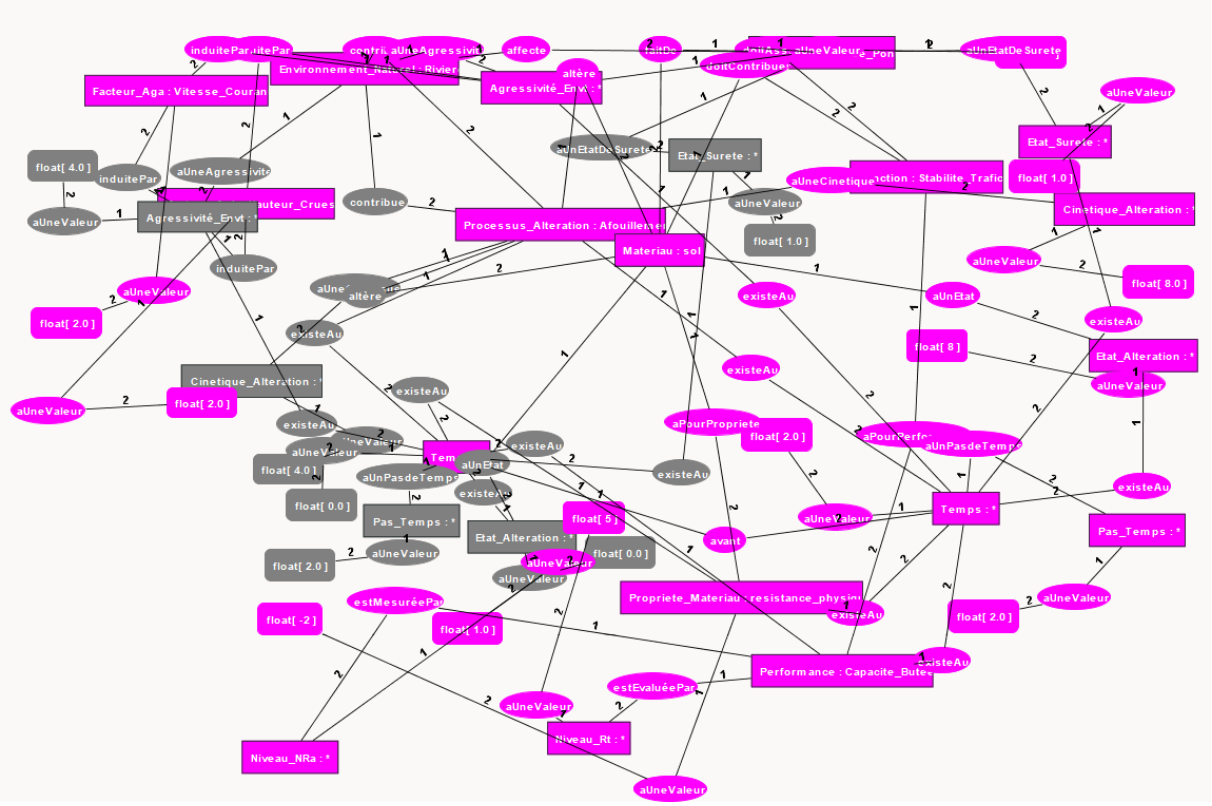
```
void after()
{
t.setValue(t0.getValue()+dt.getValue());
dt1.setValue(dt.getValue());
a.setValue(Vi.getValue()*hcr.getValue());
a1.setValue(a.getValue());
KAff.setValue(a.getValue());
KAfft.setValue(KAff.getValue()*dt1.getValue());
int rt_calcule = (int) (r0.getValue()-KAfft.getValue());
rt.setValue(rt_calcule);
int At_calcule = (int) (A0.getValue()+KAfft.getValue());
At.setValue(At_calcule);
NRa1.setValue(NRa.getValue());
Vi1.setValue(Vi.getValue());
hcr1.setValue(hcr.getValue());
di.setValue(NRa.getValue());
R0.setValue(5);
int Rt_calcule = (int) (5*(float)(rt.getValue())/r0.getValue());
Rt.setValue(Rt_calcule);
{
if (Rt.getValue()<NRa.getValue()) {
di1.setValue(0);}
else{
di1.setValue(di.getValue());}
}

}
```

A5.6d : simulation du processus d'affouillement (alpha=2, dt =2)

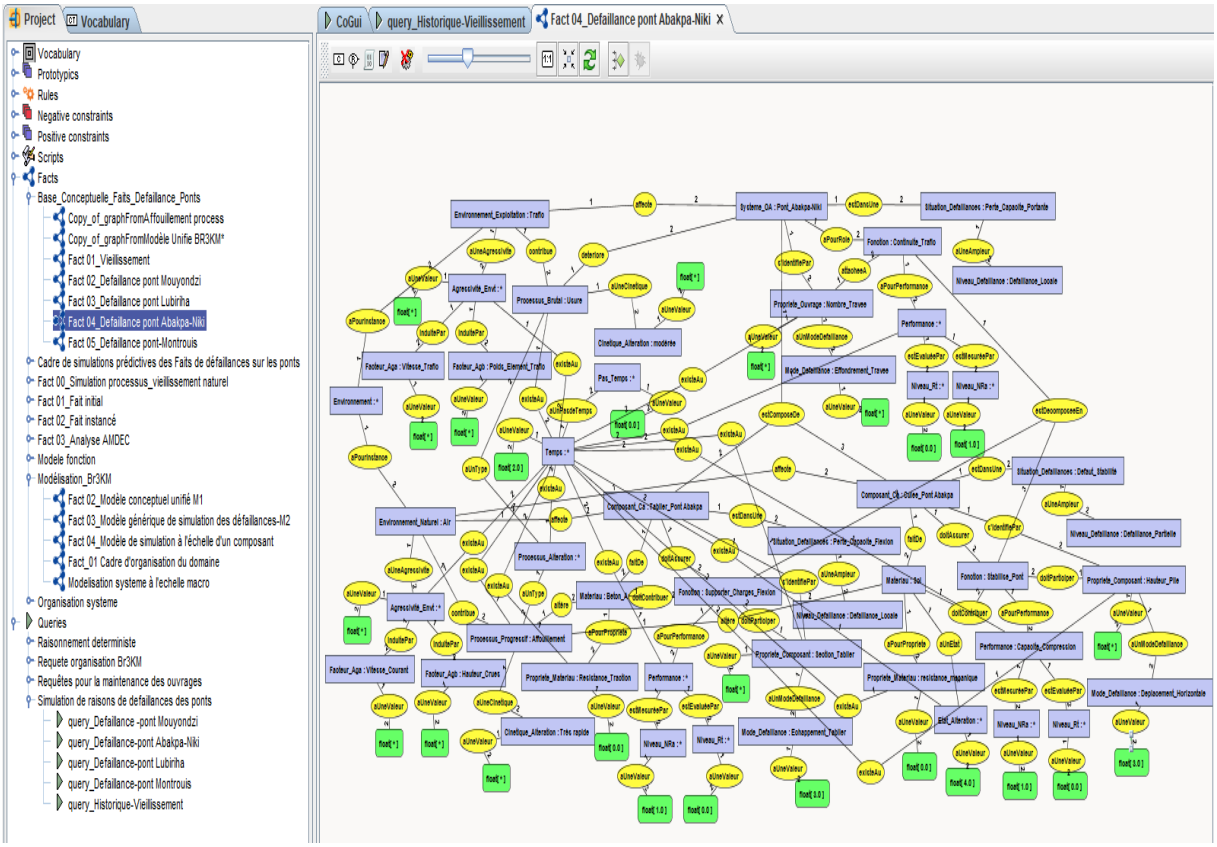


A5.6e : simulation du processus d'affouillement (alpha=4, dt=2)



A5.6f : Illustration de la visualisation des faits spécifiques sous CoGui

La fenêtre gauche (fig.4.24) montre la liste des différents modules de simulations de la modélisation Br3KM et la fenêtre droite visualise la structure conceptuelle d'un Fait spécifique (cas du pont Abakpa-Nike).

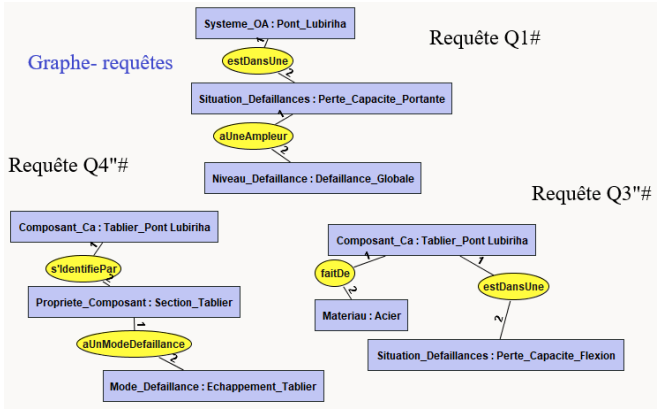


Annexe 6: Illustration des graphes d'interrogation de la base de Faits de défaillances des ponts

Annexe 6.1: Explication de la défaillance du pont Lubiriha

Les détails sur le cas de défaillance du pont Lubiriha constatée en décembre 2018 (Congo RDC) ont été donnés au chapitre 3 (§3.2.3.3). Les figures 4.28 et 4.29 décrivent le cadre d'interprétation des raisons de cette défaillance à travers la simulation des requêtes.

A-6.1a : Graphe de requêtes pour l'explication de la défaillance du pont Lubiriha



A6.1b : Graphe de projection expliquant les raisons de la défaillance du pont Lubiriha

