



Full Length Research Paper

Modélisation des processus d'altération des ponts : application au contexte local du Congo

Sylvain NDINGA OKINA^{1,2*}, Franck TAILLANDIER², Denys BREYSSE³, Cédric BAUDRIT⁴, Louis AHOUE¹

¹ Laboratoire Génie Civil, ENSP, Université Marien NGOUABI-Brazzaville, Congo

² I2M, UMR 5295, F-33405 Université de Bordeaux- Talence, France

³ INRAE-I2M, USC 1368, F-33405, Univ. Bordeaux- Talence, France

⁴ Irstea, Université Aix Marseille, RECOVER, Aix-en-Provence, France

Received November 2020 – Accepted December 2020



*Corresponding author. s.ndingokina@gmail.com

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Résumé:

La modélisation de connaissance revêt une importance particulière en ingénierie des ponts, pour la description du vieillissement des ouvrages hétérogènes (anciens, détériorés), et manquant d'historique de l'exploitation. Les données d'inspection peuvent avoir des formats très différents selon les contextes : observations visuelles, données d'auscultation, informations expertes... L'unification de ces formats à l'aide des graphes conceptuels s'avère une préconisation intéressante et fiable pouvant permettre à l'ingénieur ou au technicien d'évaluer le degré d'urgence d'entretien ou suivre l'état des ouvrages. Grâce aux algorithmes numériques de la logique de description du premier ordre du formalisme conceptuel, le cadre d'évaluation systématique proposé permet la simulation de l'état des ouvrages au cours du temps. Il combine la connaissance de l'expert et les hypothèses théoriques. Le transfert des connaissances ainsi produites entre les experts pourra à terme améliorer l'efficacité des pratiques actuelles en matière d'évaluation des ponts et de leur suivi dans le temps.

Mots clés : Evaluation systématique ; Altération des ponts ; Modélisation ; Surveillance des ponts

Abstract

Knowledge modeling is importance particularly in bridge engineering to describe the aging of heterogeneous structures (i.e., old, deteriorated) which lack the exploitation history. The inspection data can have very different formats depending on the context such as visual observations, auscultation data, knowledge of the expert. Therefore, the unification of these formats by using conceptual graphs is an interesting and reliable recommendation that can allow the engineer or technician to assess the degree of urgency of maintenance or monitoring the state of structures. Thanks to numerical algorithms of the first-order logic description of conceptual formalism, the proposed systematic framework permit simulation over time state of structures. It combines expert knowledge and theoretical hypotheses. The transfer of knowledge thus produce between experts will eventually ameliorate the efficiency of present practices in terms of bridge monitoring and their follow-up over time.

Keyword: Systematic monitoring; alteration of bridges; Modeling; Bridges monitoring.

Cite this article :

Sylvain NDINGAOKINA, Franck TAILLANDIER, Denys BREYSSE, Cédric BAUDRIT, Louis AHOUE (2020). Modélisation des processus d'altération dans les ponts : application au contexte local du Congo. Revue RAMReS – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 2(1), pp. 32-41. ISSN 2630-1164.

1. Introduction

Les altérations fréquentes des ponts en service peuvent conduire à des pertes de performance des composants, et ainsi altérer leurs fonctions. Les processus en jeu sont souvent multiples et variés (corrosion, affouillement...), dépendant des conditions d'exploitation (manque d'entretien, environnement agressif, erreurs humaines...). Les défaillances, i.e., les

dysfonctions possibles ou probables qui peuvent survenir peuvent nécessiter des réparations lourdes faute de mesures d'anticipation [1]. Les conséquences économiques qui résultent de ces réparations lourdes sont souvent non négligeables induisant une augmentation des coûts d'entretien, la perturbation du trafic, etc.

La méconnaissance des mécanismes de ces altérations induit une difficulté pour la gestion des ouvrages [2]. De plus les différents systèmes d'aide à la gestion des

données des ponts (BMS) dans le monde (e.g. PONTIS, BRIDGIT) [3], contiennent un volume important de données disparates. Ces outils souffrent d'un manque d'organisation formelle de l'information et nécessitent beaucoup d'information, ce qui limite leur capacité à servir de support efficace au suivi de l'état des ouvrages. Dans le contexte local du Congo, en raison de compétences opérationnelles limitées et de contraintes budgétaires, les ponts existants sont rarement inspectés [4,5]. Cela induit un manque de données sur l'état des ponts, et peut conduire, faute d'anticipation des facteurs de risque à des altérations pouvant nécessiter de lourdes réparations voire, la défaillance globale de l'ouvrage. Les facteurs de risque peuvent être : (a) des processus multiples d'altérations (corrosion, affouillement, pourriture, usure...). (b) un environnement agressif (chargement excessif, température et humidité relative variables, erreurs humaines, inondation, mouvements de terre...), etc. Une analyse d'un échantillon de 12 ponts [5] a montré que parmi ceux-ci : 33,33% des altérations sont liées à la corrosion, 25% à l'affouillement, 29,16% au vieillissement naturel, 16,6% aux défauts structurels et 12,5% pour d'autres dégradations. Établir des choix d'interventions dans le contexte du Congo présente une complexité certaine. L'impact constaté des altérations sur la qualité de service et la sécurité des ouvrages est rarement direct, ce qui ne facilite guère le processus d'aide à la décision pour choisir les interventions à mener. A la difficulté de prédire les évolutions des désordres, s'ajoute celle de la formalisation des connaissances et de leur diffusion. Cela permettrait de bénéficier de retours d'expériences afin de faire progresser les pratiques. La modélisation de connaissances a été récemment appliquée en génie civil à des fins de description formelle, d'analyse de détériorations et de décision [6]. Un modèle de connaissance (ontologie) consiste en la représentation formelle et explicite de l'information sur un domaine, afin de faciliter la compréhension des faits et le partage de cette connaissance [7-8]. Cependant les modèles actuels de connaissance [6, 8, 9,10] ont certaines limites les rendant plus difficile à employer dans le contexte présenté. La première chose est que ces modèles reposent sur une structure de données difficile à appréhender par des non spécialistes ; ils prennent la forme d'une base de données relationnelle dans laquelle les données sont formalisées sous la forme de tableaux dont les liens ne sont pas directement explicites. Ce point est d'autant plus critique lorsque les compétences locales sont lacunaires (exemple du Congo). Le deuxième inconvénient est qu'ils proposent peu d'inférences (i.e. raisonnement automatisé permettant de construire de la nouvelle connaissance) permettant d'enrichir les réflexions des utilisateurs.

Les Graphes conceptuels (CGs), permettent de répondre à ces limites : ils permettent de compléter le formalisme des ontologies, en apportant un support graphique et un moteur d'inférence dédié [11, 12,13]. En cela, les CGs apparaissent comme un outil particulièrement intéressant pour l'analyse des défaillances d'ouvrages. A partir des CGs, nous avons

construit un modèle conceptuel qui s'appuie sur la logique de description graphique et des inférences du premier ordre des graphes conceptuels pour l'évaluation automatique de l'altération des composants de pont.

Le modèle une fois implémenté doit aussi permettre l'actualisation automatique de l'évolution de l'état des ponts. Le partage de cette connaissance aux techniciens et ingénieurs pourra à terme permettre, un suivi efficace des ouvrages assisté par des algorithmes (informatique). Le reste de l'article est organisé en 3 sections principales : La section 2 décrit le formalisme des graphes conceptuels et la méthode. La section 3 présente les résultats, notamment le modèle implémenté, les simulations de son application et la discussion. La section 4 expose la conclusion et les perspectives.

2. Matériels et méthodes

2.1. Illustration des potentialités des Graphes Conceptuels en ingénierie des ponts

Les graphes conceptuels (CGs) sont un format de représentation graphique et logique de la connaissance introduit par J. Sowa [12]. Il s'agit d'un format logique et schématique qui permet de représenter la connaissance sous une forme graphique à la fois lisible et appréhendable par l'humain et par l'ordinateur. Le principal bénéfice de ce formalisme est la description naturelle et flexible de la connaissance par le formalisme graphique, mais aussi le recours aux inférences automatiques de règle experte ou de requête [14]. Cela permet de (a) déduire un nouveau graphe qui sera ajouté à un graphe initial de fait. Il s'agit de tirer des conclusions à partir des hypothèses générales. (b) induire un autre graphe à partir des faits spécifiques pour en tirer des conclusions générales. Une règle experte formalise des raisonnements logiques sous la forme (si hypothèse) alors (conclusion) [15]. L'hypothèse est une liste de conditions structurées et la conclusion représente la connaissance générée si l'hypothèse est vraie.

Les graphes représentent la connaissance formalisée par des concepts (nœud rectangle) et des relations entre les concepts (nœud ovale). Un concept est une classe d'objets ou une propriété dans un domaine d'étude ayant des valeurs, identifié par un nom, et défini dans le système. Exemple :

- Un composant est un élément matériel qui doit avoir des performances pour remplir des fonctions d'un ouvrage en interaction à un environnement.
- Un environnement est ce qui est extérieur au composant ou à la structure, mais qui peut changer son état.

Une relation est un lien qui unit les concepts entre eux de manière à structurer des modèles de faits et à transférer l'information entre les différents concepts. L'interaction entre deux concepts va être modélisée par une relation type binaire d'arité = 2. Par exemple,

affecte (environnement, composant) est une relation binaire se traduisant par : un environnement affecte un composant. La figure 1 montre comment est modélisée l'agressivité d'un environnement (air naturel) sur un pont. L'agressivité de l'air naturel pour un pont en béton ou métallique peut se traduire par un processus de corrosion [16]. Cette corrosion résulte de la manifestation du produit de deux facteurs en jeu (température, humidité relative). La modélisation (fig.1) décrit le fait qu'une corrosion est active (note d'échelle = 2) lorsqu'il s'est produit une forte température (i.e., note d'échelle = 2) et une humidité relative élevée (i.e., note d'échelle = 3).

Les graphes verts à gauche correspondent à la connaissance initiale (avant l'analyse). Les graphes rouge/bleu foncés à droite correspondent à la connaissance déduite par l'inférence de la règle Ra#. L'interprétation de la règle experte Ra# repose sur l'évaluation de criticité du risque [17], qui s'interprète : si température et humidité relative = produit de facteurs d'agressivité de l'air naturel, et si forte température (note = 2) et fréquente humidité relative (note =3), alors agressivité de l'air naturel = corrosion (de degré d'agressivité = 2).

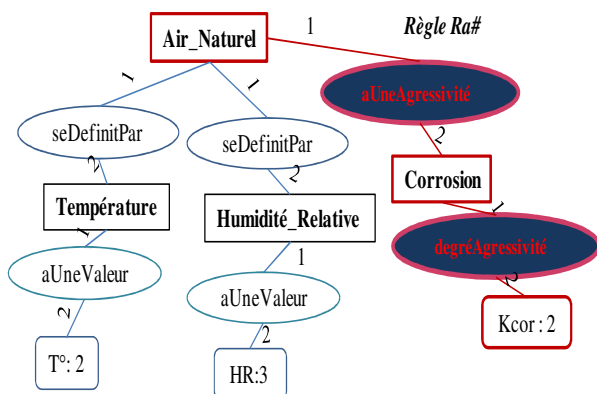


Figure 1 : Graphe modélisant l'agressivité de l'air naturel dans un pont

La logique de raisonnement telle que formalisée (fig.1) en langage naturel (graphe) met en évidence le caractère explicite des GCs et facilité à être comprise, y compris par des non experts. La connaissance ainsi générée (graphe KCor = 2) permet d'être renseigné du degré d'agressivité d'un processus donné d'altération), ce qui est nécessaire pour mesurer son influence sur l'état apparent d'un composant de pont. Cela intéresse les ingénieurs dans l'analyse des faits observés dans la mesure où elle ouvre à des décisions basées sur la vérification automatique des hypothèses (inférence des règles expertes). Nous illustrerons la suite de ce raisonnement par l'application du modèle instancié (§3.3). Avant de pouvoir appliquer des raisonnements automatisés, il faut dans un premier temps recueillir et formaliser la connaissance liée à la défaillance des ponts. C'est l'objet de la partie 2.2.

2.2. Méthode adoptée

Le recueil et le formalisation de la connaissance s'inspire de « Methontology » qui est une méthode visant à décrire la connaissance d'un domaine et structurer les faits [9] permettant de construire un modèle de connaissance. Ce choix est justifié car cette méthode permet (1) une démarche holistique de modélisation qui permet un apprentissage en cours de production d'informations, (2) une approche qui intègre l'ensemble des activités essentielles de production de la connaissance, c'est-à-dire, de l'analyse à l'implémentation du modèle, en passant par la vérification des hypothèses formalisées. Elle s'articule selon quatre grandes étapes comme illustrée sur la figure 2.

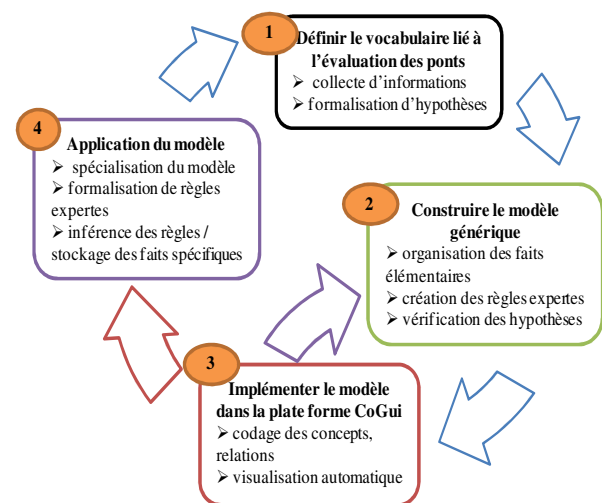


Figure 2 : Démarche holistique de modélisation

Nous illustrons maintenant les états de la modélisation (§2.3).

2.3. Illustration des étapes de modélisation

2.3.1. Support de connaissances

La modélisation utilise des informations issues de cinq sources (moyens) : (1) littérature (par ex. des modèles mécaniques...) [18], (2) expertise (connaissances des experts) [19], (3) systèmes de gestion des ponts (PONTIS, BRIDGIT) [3], (4) publications récentes et (5) bases de connaissances des modèles disponibles [9, 10]. Les CGs reposent sur un support de vocabulaire qui définit l'ensemble des concepts et relations qui seront utilisés dans le modèle de connaissance. Ce vocabulaire est structuré sous la forme d'une taxonomie hiérarchisée. Il rassemble six groupes de concepts types (Ouvrage, Composant, Matériau, Environnement, Processus d'altération, Etat apparent) par des relations structurelles (binaires). La figure 3 présente l'extrait du support. La relation représentée par des flèches orientées vers le haut, est une relation d'héritage, qui se lit « sorte de » ou « est un(e) ». La

notion d'héritage signifie que le concept hérite des propriétés de son parent (i.e. le concept, resp. la relation, visé) [11].

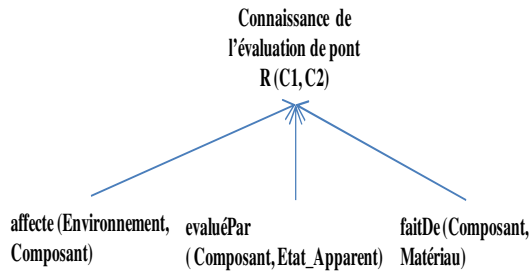


Figure 3 : Extrait du support formel de connaissances

Les concepts et relations formalisés permettent de structurer le raisonnement des experts et de produire des nouvelles connaissances (graphes), par l'organisation des faits puis leur analyse. Le tableau 1 est une représentation matricielle qui illustre les interactions entre les six concepts retenus :

a = Composant, b= Ouvrage, c= Matériau, d= Environnement, e= Processus d'altération, f= Etat apparent. R représente un lien binaire, et R= 0 signifie qu'il n'existe pas de lien entre les concepts. R= 1 signifie qu'il existe une interaction binaire entre deux concepts modélisés.

Tableau 1 : Organisation matricielle des concepts

R	a	b	c	d	e	f
a	0	1	1	0	0	1
b	1	0	0	0	0	1
c	0	0	0	0	1	0
d	1	1	0	0	1	0
e	0	0	1	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0

La figure 4 illustre la modélisation graphique des connaissances organisées à partir du tableau 1 avec les relations correspondantes.

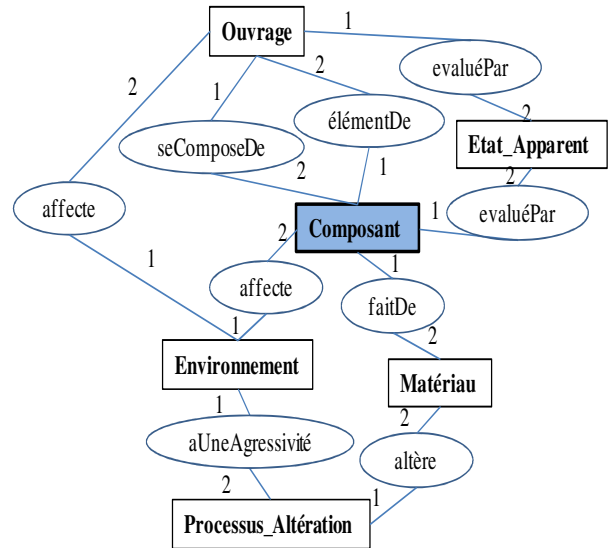


Figure 4 : Illustration de l'organisation graphique de connaissance à l'échelle d'un composant d'ouvrage

Par exemple, pour tout type de pont, il existe un environnement (ex. : l'air naturel) qui affecte tout composant fait d'un matériau (ex. : tablier métallique) ayant un état apparent. Le graphe modélisé correspond à un domaine ouvert qui peut être développé à partir des concepts de base (composant ou ouvrage) pour construire un modèle représentatif. Il décrit le fait qu'un environnement affecte un composant ou un ouvrage lorsque les conditions sont réunies, en contribuant à l'altération de son matériau avec un état apparent. Les relations (affecte, altère) sont des liens d'influence qu'il faut analyser pour évaluer l'évolution de l'état apparent (§3.3). Nous présentons maintenant les résultats de la modélisation (§3).

3. Résultats

3.1. Modèle conceptuel pour l'évaluation de l'état des ouvrages

L'environnement et les processus d'altération qu'il génère au cours du temps (agressivité) représentent les facteurs de cause qui affectent les performances des composants d'un pont en dégradant son état. Les effets possibles ou certains de ces facteurs sont les altérations observables (défauts structurels, fissures). Le modèle (fig.5), est une structuration déterministe à l'échelle d'un composant de l'ouvrage, et modélise l'hypothèse que l'action d'un environnement agressif (processus d'altération) entraîne une évolution de la condition de l'ouvrage après un certain temps delta t [17]. Cette évolution est une modification de l'état du composant concerné.

Un mauvais état de tablier dans un pont peut par exemple correspondre à la présence des fissures qui peuvent être dues à une « altération très avancée », e.g.,

corrosion très active » à un instant donné [19]. Une telle description fine de faits permet de définir des règles expertes appropriées pour la simulation de cette évolution selon le pas de temps défini. Il faut que la modélisation soit générique pour prendre en compte les différentes possibilités d'agrégation de données.

Cette généricité consiste à modéliser chaque nœud concept par son type (e.g. Composant) suivi d'un marqueur générique (e.g. *) noté « Composant : * ».

L'utilisation de ce marqueur générique indique qu'il s'agit d'un individu non spécifié (les relations s'appliquent à toute instance du même concept).

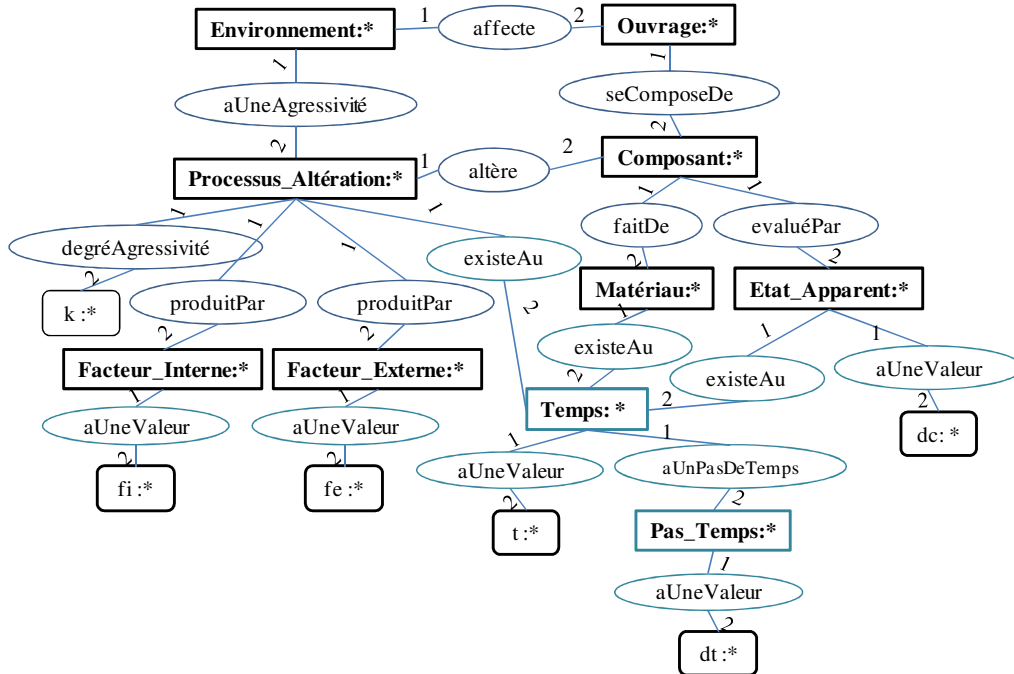


Figure 5 : Structure générique du modèle pour l'évaluation de l'altération de composant d'ouvrage

Les relations d'influence « a une agressivité » et « affecte/ altère » gouvernent l'évolution de l'état d'un composant dans le modèle (fig.4), c'est-à-dire son passage d'un état à un autre pendant un temps donné. L'analyse de la relation « a une agressivité » repose sur la mesure de criticité, qui évalue le degré d'agressivité de l'environnement (K). Elle est le produit des facteurs d'agressivité en jeu (facteur interne et externe) :

$$K = f(fi, fe) \quad [\text{Eq.1}]$$

fi: facteur interne,
fe: externe.

Alors que la relation « affecte/ altère » est analysée par une loi linéaire du vieillissement de matériaux, qui simule les évolutions de l'état apparent (dc) [20,21] :

$$dc(t) = dc(t_i) - K \cdot \Delta t \quad [\text{Eq.2}]$$

dc : état apparent initial, *dc(t)* état apparent après un instant *t*,

t_i = instant initial de mesure,

t = instant d'observation de l'état apparent,

K = agressivité de l'environnement,

Δt = intervalle de temps ($\Delta t = t - t_i$).

Ces deux relations sont évaluées respectivement par la règle R1# et par la règle R2#, qui seront présentées en (§3.4). La relation de temporalité (existe au) modélise le passage d'un état au cours du temps dans les règles R1# et R2#. Le modèle (fig.4) de défaillance a été implémenté sous la plate-forme CoGui, qui est un support informatique dédié à la manipulation et au stockage des graphes conceptuels [22]. Ce modèle répond à deux utilisations particulières :

- (1) d'une part, prédire par les règles, l'état d'un composant de pont sur la base des données d'inspection et de l'analyse de l'expert. Cela est utile pour évaluer le degré d'urgence d'interventions.
- (2) Et d'autre part, de stocker la connaissance factuelle analysée sous la forme d'une base de faits d'altération pour servir d'historique d'inspection. L'ambition ici est de permettre le questionnement de la base de connaissances pour savoir, par exemple ce qui s'est passé dans l'ouvrage avant une altération.

Le premier usage est illustré dans les parties 3.3 et 3.4. L'utilisation du modèle nécessite au préalable de renseigner la base de connaissance avec des faits observés.

3.2. Formalisation de règles expertes pour l'exploitation du modèle

L'évaluation de l'état d'un composant de pont consiste en l'inférence d'une règle experte R# qui formalise les équations 1 et 2 (§3.1). La règle R# prend en compte l'effet de l'agressivité de l'environnement et simule l'altération du composant au cours du temps (vieillessement) [5].

Les règles R1# et R2# sont formalisées dans le cadre d'une modélisation quantitative et déterministe de scénarios d'altération. Ces règles modélisent le fait que les évolutions des composants dans un pont, consistent en une variation de leur état apparent (équations 1 et 2). La figure 6 présente les graphes formalisant ces deux règles.

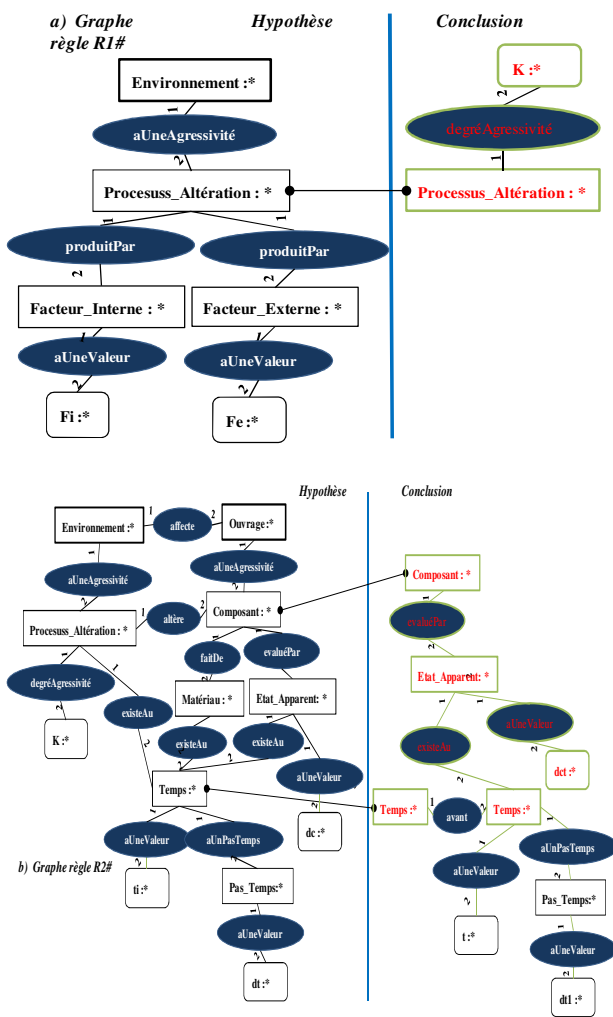


Figure 6 : Graphe formalisant les règles expertes, (a) R1# mesurant le degré d'agressivité de l'environnement, (b) R2# mesurant l'évolution de la condition du composant

La règle R1# s'applique pour les processus d'altération dont le degré d'agressivité est le produit de la température et de l'humidité relative, tels que la corrosion, la pourriture, etc. R2# est une règle générique.

Nous allons illustrer comment le modèle (vocabulaire, structure de relations) peut être exploité pour interpréter ce qui peut se passer dans un pont suite à un processus d'altération en contexte d'insuffisance d'entretien. Il faut dans ce cadre, (a) renseigner la base avec des altérations spécifiques identifiées, (b) définir les notes d'échelles d'agressivité de l'environnement et de l'état d'altération (tableaux 2 et 3), (c) les simuler à travers la règle R# pour modéliser l'évolution d'un composant du pont retenu.

3.3. Application du modèle

L'application du modèle consiste en l'évaluation déterministe de l'altération des composants dans des ponts par l'inférence de la règle experte formalisée (fig.6, §3.2).

3.3.1. Faits des observations

Deux types d'altération dans les ponts au Congo sont retenus pour l'application du modèle. Il s'agit de, (1) la corrosion du tablier métallique du pont Mouyondzi due à l'absence d'entretien, (2) la pourriture du tablier en bois du pont Tonato due à l'absence d'entretien. Les deux ponts sont des ouvrages datant des années 1960.

3.3.2. Notes des facteurs de risque et caractéristiques de la structure

Les valeurs calculées de l'agressivité de l'environnement et des propriétés de la structure (performance, état apparent) sont transformées en des notes discrètes de 1 à 5, la note la plus risquée dépend du facteur de risque analysé. La note risquée de l'agressivité de l'environnement (tableau 2) et l'état d'altération du composant (tableau 3) correspond à la valeur « 4 » [5].

Tableau 2 : Notes d'échelle de l'agressivité de l'environnement

Notes	Occurrence	Degré d'agressivité
1	altération très fréquente	faible agressivité
2	altération peu fréquent	agressivité moyenne
3	altération probable	agressivité modérée
4	altération peu probable	forte agressivité
5	altération rare	très forte agressivité

La note est obtenue à partir du produit des facteurs de risque associés (voir illustration §2.1).

Tableau 3 : Condition d'état et degré d'urgence d'intervention

Notes	Condition d'état	Urgence d'intervention
1	bon	suivi courant
2	acceptable	suivi courant
3*	endommagé : diminution d'épaisseur	entretien sans urgence
4	mauvais état : atteinte à la durabilité	entretien en urgence
5	état de ruine : perte de sécurité	entretien urgent

(*) La note «3» correspond au seuil acceptable de la condition d'un composant ou de l'ouvrage [23]. La simulation des notes discrètes établies dans le modèle est montrée dans ce qui suit (§3.3.3).

3.3.3. Illustration des graphes de faits d'altération suite à l'inférence des règles R1# et R2#

Les inférences issues des règles expertes R1# et R2# sur le modèle instancié aux faits d'altération de corrosion montrent comment se construit de manière déterministe et automatique le scénario de mécanisme d'évolution des états dans un ouvrage.

Les figures 7 et 8 montrent les résultats de ces inférences réalisées dans CoGui. Il s'agit de la simulation d'un scénario (1#): facteur interne (température = 1), facteur externe (Humidité relative = 1), état apparent initial dc = 0, temps initial t₀ = 0, pas de temps dt = 1an.

Les graphes de nœud rose sont des variables déduites à partir de la simulation des règles R1# et R2# (sortie du modèle). Et les graphes de nœud gris sont toutes les données d'entrée (facteurs d'agressivité « fi, fe », bon état apparent « dc », pas de temps « dt»). Ils représentent aussi le chemin de passage de l'inférence de la règle avant de générer la nouvelle connaissance.

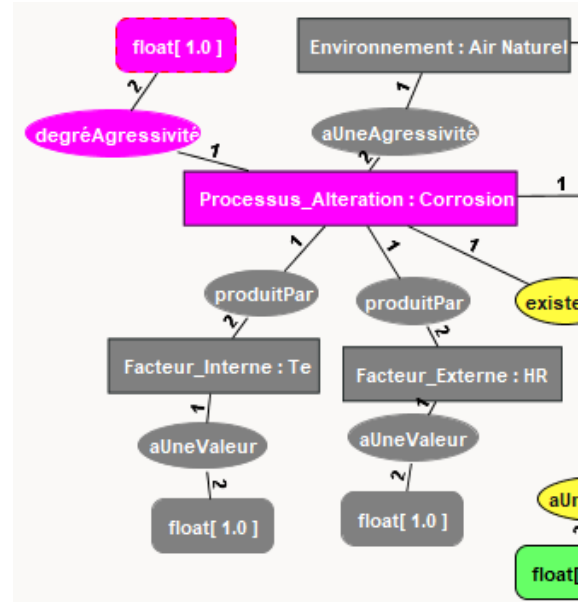


Figure 7 : Graphe, degré d'agressivité de corrosion Kcor = 1 obtenu par l'inférence de la règle R1#

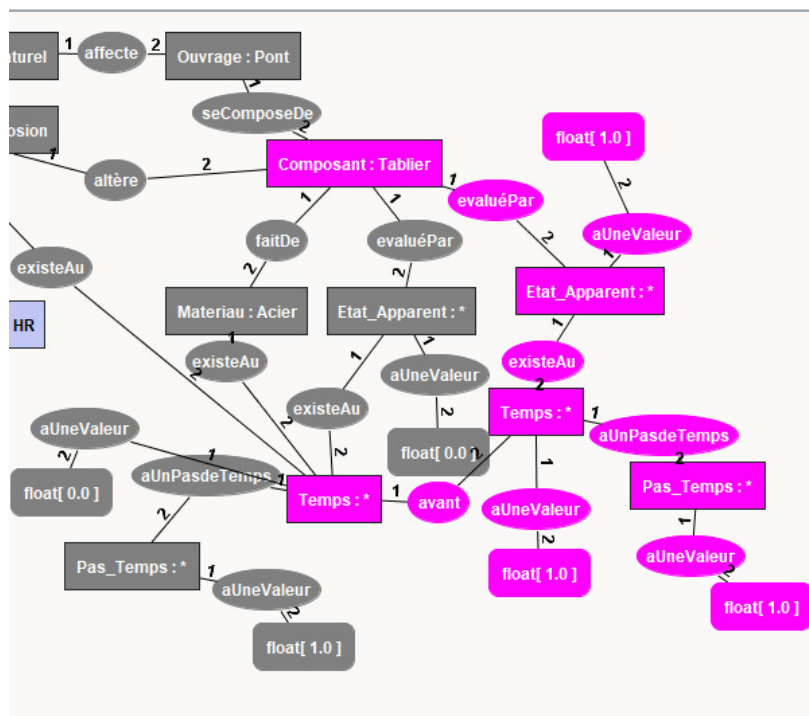


Figure 8 : Graphe, évolution de l'état apparent du tablier passant de dc = 0 à dc(t) = 1 pour dt = 1an suite à l'inférence de la règle R2#.

Afin de simuler plusieurs itérations nécessaires à l'observation des évolutions de l'état du composant, une règle unique R# qui combine les règles R1# et R2# a été formalisée. L'écriture logique de cette règle dans CoGui est donnée en figure 9.

Elle permet la déduction des valeurs, du degré d'agressivité du processus de corrosion (Kcor), de l'indice de l'état apparent au cours du temps dc(t), et l'instant d'observation de l'évolution de l'état (t).

```

1 void after()
2 {
3   t.setValue(t0.getValue()+dt.getValue());
4   dt1.setValue(dt.getValue());
5   Kcor.setValue(HR.getValue()*Te.getValue());
6   HR1.setValue(HR.getValue());
7   Te1.setValue(Te.getValue());
8   Kcort.setValue(Kcor.getValue()*dt1.getValue());
9   dct.setValue(dc.getValue()+Kcort.getValue());
10 }
11

```

Figure 9 : Ecrition logique de la règle R# dans CoGui

L'inférence de la règle R# à travers le modèle (fig.4) relative à un processus de corrosion d'un tablier de pont

existant (cas de pont Niari) fournit des résultats pour différentes itérations des scénarios considérés. La figure 10 présente un extrait de graphe de simulations du scénario 1 où 5 itérations ont été réalisées afin d'estimer l'instant final (t) pour lequel le tablier est dans une condition de ruine (indice d'état dc= 5).

Les variables d'entrée sont les suivantes : $T_e = 1$, $H_R = 1$, $dt = 1$, $t_0 = 0$, $dc = 0$. Ce graphe (fig.10) montre qu'il faut 3ans sous l'action d'une faible agressivité de la corrosion pour que le tablier soit dans un mauvais état, alors que cette condition deviendra alarmante (état de ruine) à l'instant $t = 5$ ans. Les valeurs qui illustrent la variation de la condition du tablier analysé sont synthétisées au tableau 4. Pour les scénarios 2 et 3, les simulations ont consisté en 3 itérations afin d'atteindre le mauvais état. La particularité avec ces deux scénarios de simulation par rapport au scénario 1 réside dans l'importance du degré d'agressivité de corrosion (modérée et forte, voir tableau 2) qui contribue au vieillissement rapide avec le même pas de temps, du tablier de pont. Cela se traduira par l'urgence ou non des entretiens pour anticiper sur les possibles défaillances dans l'ouvrage.

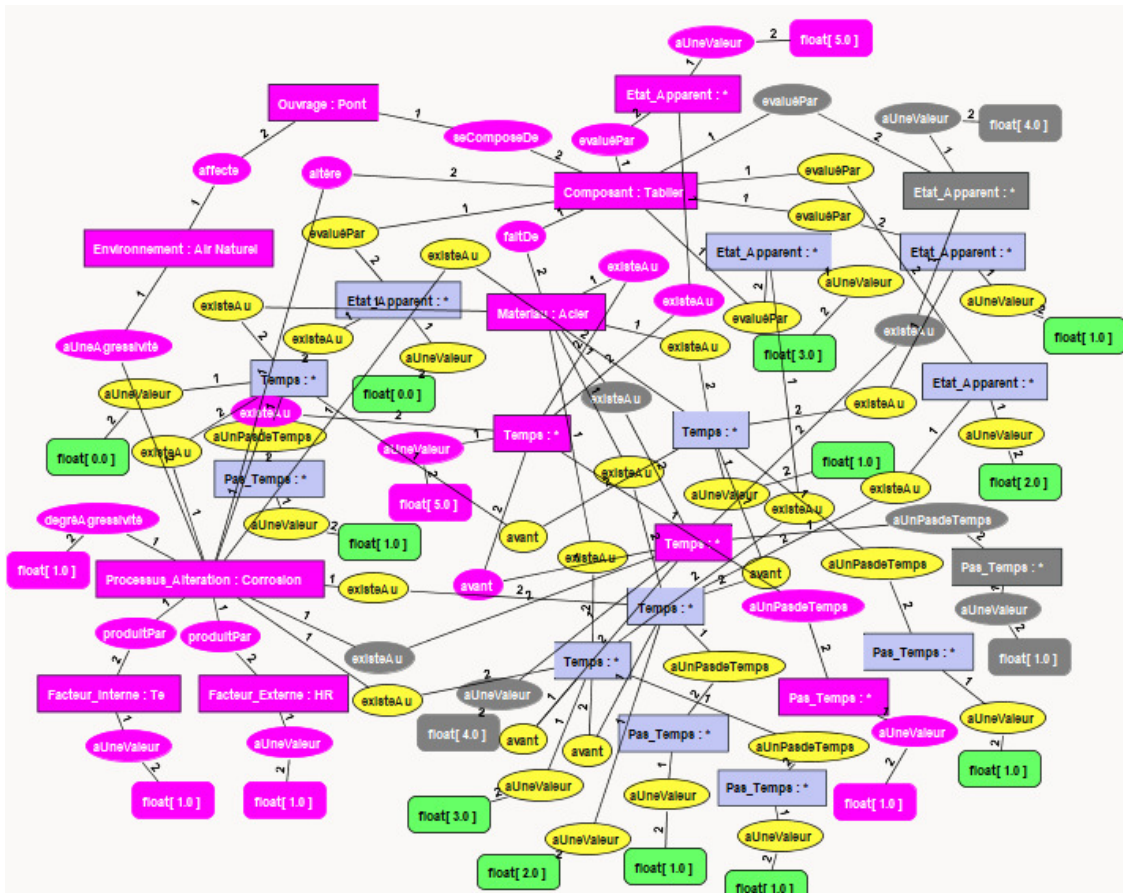


Figure 10 : Extrait de résultats de la simulation de 5 itérations pour le scénario 1# d'altération due à la corrosion du tablier de pont

Tableau 4 : Synthèse de valeurs de simulations du vieillissement du tablier d'un pont

	Scenario 1 : faible corrosion					Scenario 2 : corrosion modérée			Scenario 3 : forte corrosion		
	1	2	3	4	5	1	2	3	1	2	-
Temps(t)	1	2	3	4	5	1	2	3	1	2	-
Etat apparent dc(t)	1	2	3	4	5	2	4	6	4	8	-

La figure 11 illustre la variation de la condition de l'état du tablier au cours du temps (scénario 1, scénario 2 et scénario 3). Les trois courbes sur la figure 11 montrent qu'avec le même pas de temps (dt=1 an), lorsque la condition de l'environnement change entre deux observations, le composant, ou la cinétique de la perte de performance change. La conséquence du déclenchement tardif des actions préventives de maintenance du pont dans ces conditions pourra se traduire en termes de limitation de trafic ou d'indisponibilité de l'ouvrage.

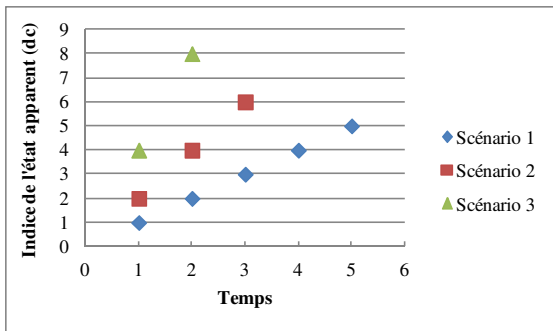


Figure 11 : Évolutions de l'état du tablier suite à la corrosion

Ces simulations permettent de mettre lumière les altérations progressives observées dans les ponts Tonato et Niari. L'approche de simulation du processus de corrosion est également applicable pour le processus de pourriture de bois. Nous discutons au paragraphe 3.4, des atouts et des limites de la modélisation mise en œuvre.

3.4 Discussion

La méthode proposée pour la simulation du vieillissement des composants de ponts paraît pertinente au regard des résultats obtenus (fig.5, 6, 7, 8, 10,11, 12). Les figures 7, 8 et 10 montrent l'utilisation du modèle pour l'évaluation quantitative des évolutions de l'état des ponts en intégrant une loi du vieillissement de matériau. Au-delà de la dimension d'évaluation prédictive de la variabilité de l'état de composant au cours du temps, l'une des avancées essentielles de ce cadre d'analyse est la possibilité de définir des actions préventives de maintenance. La

figure 12 montre une illustration de l'utilisation du modèle en phase de maintenance. Il s'agit d'une déduction de l'urgence d'entretien d'un composant de pont au regard de sa cinétique d'altération et de l'indice d'état à partir d'une nouvelle règle appelée Rm# [24]. Le raisonnement de la règle experte Rm# est : si altération inacceptable du composant de pont à l'instant t, et si indice de l'état dc = 3, alors entretien urgent. Le raisonnement de la règle experte Rm# est : si altération inacceptable du composant de pont à l'instant t, et si indice de l'état dc = 3, alors entretien urgent.

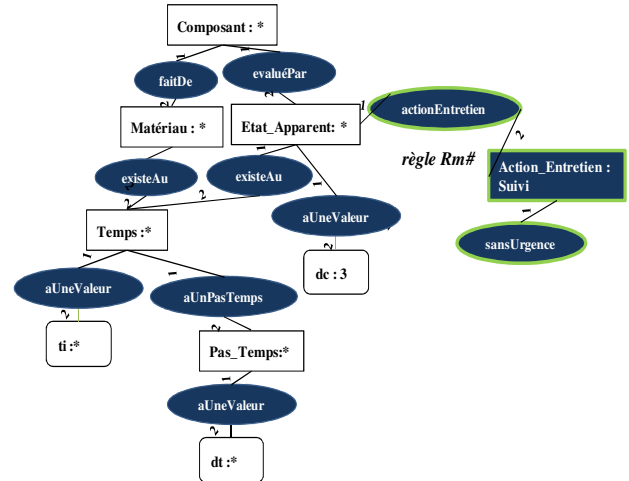


Figure 12 : Graphe déduisant l'action d'entretien préventif d'un composant suite à l'altération

L'intégration d'un tel cadre de modélisation aux systèmes de gestion existants (BMS), permettrait de rendre effective l'amélioration de l'efficacité des décisions en matière de maintenance préventive. La modélisation développée est significative en ingénierie des ponts au regard de celles discutées en introduction, dans la mesure où elle permet la maîtrise de risque d'altération autres que la corrosion et la pourriture, nécessite de développer des nouvelles règles expertes. Cela va impliquer, soit la recherche des lois existantes dans la littérature, soit de procéder à des expérimentations en laboratoire. Aussi, un autre aspect qui n'est pas abordé dans le modèle, est la corrélation entre l'état apparent d'un composant et la fonction qu'il doit assurer au cours de l'exploitation. La considération de ces deux points indiqués pourra permettre in fine l'amélioration du modèle actuel.

4. Conclusion

La démarche de l'évaluation systématique de l'altération des ponts proposée dans ce travail repose sur des simulations déterministes (inférence à partir de règles expertes). Les connaissances mise en forme (formalisation) ont permis de construire le modèle de simulation du vieillissement d'un composant de pont. Il était question de répondre à trois questions : *Comment interpréter l'effet de l'agressivité de l'environnement vis-à-vis de la performance d'un composant ou de l'ouvrage ? Comment évolue l'état d'un composant en*

interaction avec un environnement au cours du temps ? Quelle action engagée suite à une altération ?

Sur la base des raisonnements à l'aide du formalisme des Graphes Conceptuels, ce qui inclut l'usage des opérations de la logique du premier ordre dudit formalisme, le travail de modélisation a consisté à : a) la formalisation du support de connaissance et b) la construction et l'implémentation du modèle de simulation. L'application du modèle sur des processus de corrosion d'acier et de pourriture du bois a permis d'apporter des réponses à ces questions. Une telle approche d'évaluation des ponts avec un modèle générique développé peut-être étendue à l'évaluation d'autres domaines ouvrages d'art de génie civil. La particularité de cette modélisation réside dans : (a) la prédiction des évolutions de l'état de ponts grâce à des inférences de règles expertes qui déduisent des instants d'observations et l'indice de l'état correspond. Elle ouvre à une réactualisation des données d'inspection (b) la détermination du degré d'urgence d'entretien. Le recours aux algorithmes des graphes conceptuels paraît être une voie intéressante en modélisation des ouvrages, puisque, ne nécessitant pas un grand groupe d'experts pour le diagnostic d'ouvrages hétérogènes et à données limitées. Les utilisateurs du modèle implémenté peuvent être, les techniciens, les ingénieurs ou les universitaires pour, faciliter le transfert d'informations entre eux et la compréhension des raisonnements. Ce travail se poursuivra par la modélisation du domaine d'analyse fonctionnelle et de l'aide à la décision en matière de maintenance préventive d'ouvrages. Il traitera des lois d'autres processus d'altération (affouillement, usure...), des hypothèses d'analyse fonctionnelle et de choix d'actions de maintenance. Il s'agira aussi de montrer comment la modélisation peut être questionnée en phase d'exploitation.

Remerciements

La plate-forme logicielle d'implémentation CoGui, est développée par l'équipe du Laboratoire d'Informatique, de Robotiques et de Micro-électroniques de Montpellier -LIRMM (France).

REFERENCES

[1] Schoefs F., Breyse D., Sheils E., O'Connor A. Conditional maintenance efficiency on randomly degraded structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Lavoisier Ed., 2008.

[2] Cremona C. Modélisation et effet des aléas, partie 2, *Revue Française de Génie Civil*, 6:3, 303, 2002.

[3] O'Connor A.J., Sheils E., Breyse D., Schoefs F. Markovian bridge maintenance planning incorporating corrosion initiation and nonlinear deterioration. *Journal of Bridge Engineering*, Vol.18, No.3, 2013.

[4] Ndinga Okina S., Taillandier F., Baudrit C., Breyse 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.

[5] Ndinga Okina S. Analyse des mécanismes de dégradation des performances des ouvrages d'art existants basée sur les modèles de connaissances et l'ingénierie forensique :

Application aux ponts dans les pays tropicaux « cas du Congo», Thèse de doctorat PhD, Co-direction Université Marien NGOUABI et Université de Bordeaux, 235p, 2019.

[6] Wan C., Zhou Z., Li S., Ding Y., Xu Z., Yang Z., Xia Y., Yin F. Development of a bridge management system based on the building information modeling technology. *Sustainability* 11, 4583, 2019.

[7] Lee C.G., Satish B.M., Chao Huang, Bastam N.F.: A study of U.S. Bridge Failures (1980-2012), Technical Report MCEER-13-0008, Jun 15, 2013.

[8] Ren G., Ding R., Li H. Building an ontological knowledge for bridge maintenance. *Advance in Engineering Software* 130, pp24-40, 2019

[9] Helmerich R: Riveted Steel Bridges: Semantic Management of Knowledge, Report serii PRE nr3/2013, Ph.D. Institute of Civil Engineering Wroclaw Univ. of Technology, Berlin, 2013

[10] Jiang x., Wang S., Wang J., Lyu S., Skitmore M., A decision method for construction safety risk management based on ontology and improved BR: Example of a subway project. *Inter. Journal of Environment Research and Public Health*, 2020.

[11] Sowa J.F. *Conceptual Structures: Information Proc. in Mind and Machine*. Addison-Wesley, 1984.

[12] Breyse D., Taillandier F., Baudrit C. Knowledge model for forensics in civil engineering, 40th IABSE Symp., Nantes (France), 19-21 September, 2018.

[13] Tan J.-S., Elbaz K., Wang Z.-F., Shen J.S., Chen J., 2020. Lessons Learnt from bridge collapse: A View of sustainable management. *Sustainability* 12, 1205, 2020.

[14] 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.

[15] Boissier D., Henry E., Boulémia C. Help with building foundation design: expertise model. *French Journal of Civil Engineering*, Vol.3, No.5, 1999.

[16] Qin S., Cui W., Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements, Elsevier Science Ltd, 2003.

[17] 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, p.169-186, 2006.

[18] Baroth J., Schoefs F., Breyse D., *Construction Reliability: Safety, Variability and Sustainability*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2011.

[19] Kosgodagan A., Morales-Napoles O., Maljaars J., Courage W. Expert judgment in life-cycle degradation and maintenance modeling for steel bridges. *Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*, Delft, Netherlands, Oct, 2016.

[20] Breyse D. and Vasconcelos E.C. Evaluation of management strategies for sewer system performances, *International Conference DminUce (London)*, 2002

[21] Decker et al. 08 Decker JB., Rollins KM and Ellsworth JC. Corrosion rate evaluation and prediction for piles based on long-term field performance. *J. Geotech Geoenviron* 2008; 134:341-351.

[22] Mugnier M.-L. *Conceptual Graph rules and equivalent rules: A synthesis*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

[23] 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.

[24] Frangopol D. M., Kallen M.-J., Noortwijk J.M. Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions, *Pro.Struct.Engng Mater*, 6:197-212, 2004.