



**Optimisation des investissements sur les ponts par la
méthode coûts-avantages
Valorisation des revenus et du modèle de détérioration**

Mémoire

Jean-Sébastien Fortin

Maîtrise en génie civil
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Jean-Sébastien Fortin, 2017

**Optimisation des investissements sur les ponts par la
méthode coûts-avantages
Valorisation des revenus et du modèle de détérioration**

Mémoire

Jean-Sébastien Fortin

Sous la direction de :

Josée Bastien, directrice de recherche
Gabriel John Power, codirecteur de recherche

Résumé

Cette étude a pour but de contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine des systèmes de gestion de ponts (Bridge Management System (BMS)) par le développement d'un outil décisionnel pour optimiser les réparations sur les ponts. Cet outil décisionnel se base sur la valeur actualisée nette pour considérer le moment optimal de réparation. Il met ainsi à l'avant-plan la création de richesse permise par un réseau routier efficace. De plus, il permet d'étudier l'incertitude sur plusieurs variables, soit les valeurs financières d'inflation et d'actualisation, ainsi que l'évolution du débit routier. La flexibilité de l'outil décisionnel permet de vérifier l'impact de plusieurs variables. Ainsi, le modèle de détérioration présentement utilisée par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec est comparé à deux autres modèles, soit un modèle markovien basé sur la théorie des chaînes de Markov et un modèle stochastique développé dans le cadre de cette étude. Le projet innove en considérant les revenus générés par un pont et l'incertitude sur les variables futures de détérioration d'éléments de ponts, d'inflation et d'actualisation, ainsi que celles relatives à l'évolution du débit routier.

Considérant la récente implantation du système de gestion du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, cette étude se base sur plusieurs hypothèses. Pour cette étude, la durée de vie maximale du pont est établie à 100 ans, la dégradation et la réparation d'un ouvrage est analysée aux 5 ans et une seule réparation majeure peut être effectuée sur la durée de vie. De plus, cette réparation permet de remettre le pont dans son état initial (neuf) et la détérioration de quelques éléments principaux (la dalle en béton armé et les poutres d'acier) du pont représente la détérioration globale de la structure.

En se basant sur les données du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports et à l'aide d'une analyse probabiliste de 20 000 simulations, l'étude met en évidence l'importance de considérer la variabilité sur la détérioration d'un élément/pont, sur le taux d'intérêt et dans une moindre mesure, l'inflation.

Ainsi, lorsque seul l'état de la dalle représente l'état global du pont et en utilisant l'approche déterministe, une réparation entre 25 et 30 ans est appropriée. Un taux d'intérêt plutôt faible peut même repousser ce choix à 35 ans. Le choix de date optimale de réparation est très étalé avec l'approche markovienne considérant les probabilités élevées de maintien du pont en bon état. Finalement, l'approche stochastique favorise une réparation entre 20 et 35 ans selon la rapidité de la détérioration. Ce choix peut encore une fois changer légèrement avec l'ajout de taux d'intérêt et d'inflation variables.

Lorsque seul l'état de la dalle et des poutres est considéré représenter l'état de l'ensemble du pont, l'approche déterministe propose une réparation à 25 ans pour le dalle en béton armé et une réparation à 30 ans pour les poutres en acier. Les paramètres financiers stochastiques peuvent affecter ce choix rendant possible une réparation optimale de 25 à 35 ans pour les deux types d'éléments. Les moments optimaux de réparation sont très étalés pour l'approche markovienne considérant les probabilités élevées de maintien des éléments en bon état. Finalement, l'approche stochastique propose une réparation entre 20 et 35 ans pour le dalle en béton armé et entre 15 et 40 ans pour les poutres en acier. Ces moments de réparations sont aussi affectés légèrement par l'ajout d'un taux d'intérêt et d'inflation variables.

Une analyse de sensibilité permet de considérer l'impact de plusieurs paramètres du modèle considéré, soit la matrice de transition, la pénalité d'état, la variabilité de la matrice pour une détérioration stochastique et l'ajout d'un avantage de réparation simultanée à deux éléments. Une modification de la matrice de transition a surtout un impact sur la volatilité des résultats, alors qu'une modification sur la pénalité d'état crée une translation sur la distribution du moment optimal de réparation pour une détérioration de type markovienne et stochastique. La variabilité de la matrice pour une détérioration stochastique a directement un impact sur la volatilité du moment optimal de réparation. Plus le pourcentage de variation de la matrice est faible, plus les moments optimaux de réparation seront concentrés (plage moins étendue). Finalement, s'il est considéré que la réparation simultanée de deux éléments coûte moins cher que lorsque ces deux éléments sont réparés à des dates différentes (avantage de réparation simultanée de deux éléments plutôt que deux réparations distinctes), il y a alors un impact sur le moment optimal de réparation. Cet effet est principalement perceptible lorsque les dates de réparation optimales sont séparées de moins de 10 ans. Pour une détérioration

déterministe, il suffit que la réparation simultanée coûte de 3,72% de moins que deux réparations distinctes pour favoriser de réparer les deux éléments simultanément à 30 ans, la dalle étant réparée à 25 ans sans avantage (réduction des coût) de réparation simultanée. Cependant, un avantage de réparation simultanée a peu d'impact sur le moment optimal de réparation lorsque la détérioration se base sur un modèle markovien en raison de la grande répartition des moments optimaux de réparation. Enfin, l'avantage de réparation simultanée a un impact considérable pour une détérioration stochastique, la majorité des réparations se produisant entre 15 et 40 ans.

Abstract

This study extends the existing literature on Bridge Management Systems (BMS) by developing a decision-making program to optimize bridge rehabilitations. This decision-making tool analyses the net present value to consider the optimal moment to repair a bridge. It highlights wealth creation by the maintenance of an efficient road network. Moreover, it allows the study of uncertainty on several parameters, such as financial values of inflation and interest rates as well as the evolution of traffic flow.

The ability of the decision-making tool to verify the impact of several variables and the deterioration model currently used by the *ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports* is compared to two other models; a Markovian model and a stochastic model developed under this study. This project breaks new ground by considering the revenue generated by the bridge's efficiency. It also considers uncertainty on several parameters, such as financial values of inflation and interest rate, and the evolution of traffic flow.

Considering the recent establishment of the management system used by the *ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports*, this study is based on several assumptions. The life span of the bridge is limited to 100 years, degradation and repairs can only be done every 5 years, a single repair can be made over the bridge lifespan and the bridge condition is represented by only a few bridge components (elements).

The study highlights the importance of considering variability on the deterioration of an element/bridge, interest rates and, to a lesser extent, inflation based on the *ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports* data and using a probabilistic analysis of 20,000 simulations.

Thus, when the bridge is only represented by its reinforced concrete deck and using the deterministic deterioration approach, a repair between 25 and 30 years is appropriate. A rather low interest rate can even push this choice to 35 years. This choice is very broad with the Markovian approach considering the high probabilities of keeping the bridge in good

condition. Finally, the stochastic approach favors repair between 20 and 35 years depending on the speed of deterioration. This choice may again change slightly with the addition of both a variable interest rate and a variable inflation rate.

When a reinforced concrete deck and steel beams are considered to represent the entire bridge, the deterministic approach suggests a 25-year repair for the reinforced concrete deck and a 30-year repair for the steel beams. Stochastic financial parameters can affect this choice, making an optimal repair of 25 to 35 years possible for both elements. The optimal moments of repair are very spread out for the Markovian approach considering the high probabilities of maintaining the elements in good condition. Finally, the stochastic approach proposes a repair between 20 and 35 years for the reinforced concrete deck and between 15 and 40 years for the steel beams. These repairs are slightly affected by the addition of a variable interest rate and inflation rate as well.

An in-depth analysis shows the impact that several parameters have on the model considered. These parameters include: the transition matrix, the state penalty, the variability of the matrix for stochastic deterioration, and the addition of a simultaneous repair advantage. A change in the transition matrix mainly has an impact on the volatility of the results, whereas a modification on the state penalty shifts the optimal repair time distribution for Markovian and stochastic deteriorations. The variability of the matrix for stochastic deterioration directly affects the volatility of the optimal repair time. For example, the lower the percentage of variation of the matrix, the more the optimal repair moments will be concentrated (or fixed). Finally, the implementation of a simultaneous repair benefit mainly has an impact when the optimal repair time is within 10 years of a simultaneous repair. For a deterministic deterioration, a reduction in costs of 3.72% is sufficient to reconcile repair dates to 30 years, the bridge being repair at 25 years without this benefit. However, this advantage has little impact on Markovian deterioration due to the wide distribution of optimal repair times but a considerable impact on stochastic deterioration, with the majority of repairs occurring within a range of 15 to 40 years.

Table des matières

RÉSUMÉ	III
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES FIGURES	XVII
LISTE DES SYMBOLES	XXI
AVANT-PROPOS	XXV
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.2 MISE EN CONTEXTE	2
1.2.1 <i>Contexte du Québec</i>	2
1.2.2 <i>Problématiques et besoins pour le gestionnaire</i>	5
1.3 OBJECTIFS	7
1.4 STRUCTURE DU MÉMOIRE	7
CHAPITRE 2 : SYSTÈMES DE GESTION DES PONTS	9
2.1 REVUE DE LITTÉRATURE	9
2.2 CHOIX DE L'APPROCHE DÉCISIONNELLE POUR L'ÉTUDE	11
CHAPITRE 3 : MODÈLE DE DÉTÉRIORATION	15
3.1 REVUE DE LITTÉRATURE	15
3.1.1 <i>Modèles de détérioration déterministes</i>	16
3.1.2 <i>Modèles de détérioration basés sur l'intelligence artificielle</i>	17
3.1.3 <i>Modèles de détérioration stochastiques</i>	17
3.1.3.1 Les chaînes de Markov	18
3.2 MÉTHODE D'INSPECTION AU MTMDDET	20
3.2.1 <i>Modèle de gestion SGS-5016 (1996 - 2008)</i>	20
3.2.1.1 Fréquence d'inspection	21
3.2.1.2 Cote d'évaluation du matériau (CEM)	22
3.2.1.3 Cote d'évaluation du comportement (CEC)	23
3.2.1.4 Indice fonctionnel de la structure (IFS)	24
3.2.1.5 Indice d'état d'une structure (IES)	27
3.2.1.6 Indice de vulnérabilité sismique (IVS)	29
3.2.1.7 Indice combiné d'une structure (ICOS)	30
3.2.2 <i>Modèle de gestion GSQ-6026 (2008-aujourd'hui)</i>	31
3.2.2.1 Fréquence d'inspection	31
3.2.2.2 Évaluation de l'état du matériau d'un élément	32
3.2.2.3 Cote d'évaluation du comportement (CEC)	33
3.2.2.4 Indice de matériau de la structure (IMS)	34
3.2.2.5 Indice de comportement de la structure (ICS)	34
3.2.2.6 Indice de condition générale (ICG)	36
3.2.3 <i>Conciliation des deux systèmes</i>	37
3.2.3.1 Évaluation de l'état des matériaux	37
3.2.3.2 Évaluation de l'état du comportement	39
3.2.3.3 Comparaison des indices et choix pour l'étude	40
3.3 MODÈLES DE DÉTÉRIORATION THÉORIQUES	41
3.3.1 <i>Modèles de détérioration existants développés par les gestionnaires de ponts</i>	41

3.3.2	<i>Analyse des modèles de détérioration existants</i>	44
3.3.3	<i>Proposition d'un nouveau modèle de détérioration</i>	46
CHAPITRE 4 : PARAMÈTRES DU MODÈLE		55
4.1	MODÈLE DE DÉTÉRIORATION	55
4.1.1	<i>Modèle de détérioration déterministe</i>	56
4.1.2	<i>Modèle de détérioration markovienne</i>	57
4.1.3	<i>Modèle de détérioration stochastique</i>	57
4.2	COÛTS DE CONSTRUCTION (CC)	59
4.3	PRIX VIRTUEL DU TEMPS ÉCONOMISÉ (PV).....	60
4.4	TEMPS ÉCONOMISÉ PAR PASSAGE (TS)	60
4.5	DÉBIT JOURNALIER MOYEN ANNUALISÉ (DJMA) STOCHASTIQUE	61
4.6	PÉNALITÉ D'ÉTAT (PE).....	62
4.7	COÛT UNITAIRE (CU)	63
4.8	NOMBRE D'UNITÉS (NU)	64
4.9	VALEUR RÉSIDUELLE (VR).....	64
4.10	TAUX D'INFLATION GÉNÉRALE (Π_G) STOCHASTIQUE.....	65
4.11	TAUX D'INFLATION STOCHASTIQUE DES MATÉRIAUX (Π_M)	66
4.12	TAUX D'ACTUALISATION (R) STOCHASTIQUE	68
4.12.1	<i>Taux d'actualisation sans risque (rf)</i>	69
4.12.2	<i>Prime de risque</i>	70
CHAPITRE 5 : MÉTHODOLOGIE		71
5.1	VALEURS FINANCIÈRES STOCHASTIQUES	71
5.2	DÉBIT JOURNALIER MOYEN ANNUALISÉ STOCHASTIQUE.....	73
5.3	DÉTÉRIORATION DES ÉLÉMENTS ET RÉPARATION	74
5.4	CALCUL DES COÛTS	77
5.5	CALCUL DES REVENUS.....	78
5.6	VALEUR ACTUALISÉE NETTE ET ANALYSE	78
CHAPITRE 6 : RÉSULTATS ET ANALYSE		81
6.1	ÉTUDE POUR UNE DALLE EN BÉTON ARMÉ	81
6.1.1	<i>Détérioration déterministe de la dalle</i>	83
6.1.1.1	Paramètres financiers et de débit routier déterministes.....	83
6.1.1.2	Paramètres financiers et de débit routier stochastiques.....	84
6.1.2	<i>Détérioration markovienne de la dalle</i>	87
6.1.2.1	Paramètres financiers et de débit routier déterministes.....	88
6.1.2.2	Paramètres financiers et de débit routier stochastiques.....	97
6.1.3	<i>Détérioration stochastique de la dalle</i>	102
6.1.3.1	Paramètres financiers et de débit routier déterministes.....	102
6.1.3.2	Paramètres financiers et de débit routier stochastiques.....	106
6.1.4	<i>Résumé des résultats pour l'étude de la détérioration de la dalle en béton armé</i>	107
6.2	ÉTUDE SUR UNE DALLE EN BÉTON ARMÉ ET DES POUTRES EN ACIER.....	109
6.2.1	<i>Détérioration déterministe de la dalle en béton et des poutres en acier</i>	111
6.2.1.1	Paramètres financiers et de débit routier déterministes.....	111
6.2.1.2	Paramètres financiers et de débit routier stochastiques.....	112
6.2.2	<i>Détérioration markovienne de la dalle en béton et des poutres en acier</i>	117
6.2.2.1	Paramètres financiers et de débit routier déterministes.....	117
6.2.2.2	Paramètres financiers et de débit routier stochastiques.....	124
6.2.3	<i>Détérioration stochastique de la dalle en béton et des poutres en acier</i>	129
6.2.3.1	Paramètres financiers et de débit routier déterministes.....	130
6.2.3.2	Paramètres financiers et débit routier stochastiques	132
6.2.4	<i>Résumé des résultats pour l'étude de la détérioration de la dalle en béton armé et des poutres en acier</i> 136	
CHAPITRE 7 : ANALYSE DE SENSIBILITÉ		139
7.1	MATRICE DE TRANSITION	139

7.1.1	<i>Modèle de détérioration déterministe</i>	139
7.1.2	<i>Modèle de détérioration markovien</i>	140
7.1.3	<i>Modèle de détérioration stochastique</i>	141
7.1.4	<i>Résumé des impacts de la matrice de transition</i>	141
7.2	PÉNALITÉ D'ÉTAT	142
7.2.1	<i>Modèle de détérioration déterministe</i>	142
7.2.2	<i>Modèle de détérioration markovienne</i>	143
7.2.3	<i>Modèle de détérioration stochastique</i>	144
7.2.4	<i>Résumé des impacts de la pénalité d'état</i>	145
7.3	BORNES POUR L'APPROCHE STOCHASTIQUE	145
7.4	AVANTAGE D'UNE RÉPARATION SIMULTANÉE	146
7.4.1	<i>Modèle de détérioration déterministe</i>	147
7.4.2	<i>Modèle de détérioration markovien</i>	147
7.4.3	<i>Modèle de détérioration stochastique</i>	155
7.4.4	<i>Résumé des impacts de l'avantage de réparation simultanée</i>	157
CHAPITRE 8 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE		165
8.1	CONCLUSIONS	165
8.2	PERSPECTIVES DE RECHERCHE	170

BIBLIOGRAPHIE..... 173

ANNEXE A : COMPLÉMENT SUR LES MODÈLES DE GESTION DU MTMDETA-1

A.1	TYPE DE STRUCTURES	A-1
A.2	CLASSIFICATION DES ÉLÉMENTS	A-7
A.3	COMPLÉMENT SUR L'INDICE FONCTIONNEL DE STRUCTURE (IFS)	A-14
A.4	COMPLÉMENT SUR L'INDICE D'ÉTAT D'UNE STRUCTURE (IES)	A-19
A.5	COMPLÉMENTS SUR DE L'INDICE DE MATÉRIAU DE LA STRUCTURE (IMS)	A-31

ANNEXE B : COMPLÉMENT SUR LES PARAMÈTRES DU MODÈLE..... B-1

B.1	DONNÉES SUR LE PARC AUTOMOBILE QUÉBÉCOIS	B-1
-----	---	-----

ANNEXE C : CODE INFORMATIQUE..... C-1

C.1	VALEURS FINANCIÈRES	C-1
C.1.1	<i>Inflation générale déterministe</i>	C-1
C.1.2	<i>Inflation générale stochastique</i>	C-1
C.1.3	<i>Inflation des matériaux et de la main-d'œuvre déterministe</i>	C-3
C.1.4	<i>Inflation des matériaux et de la main-d'œuvre stochastique</i>	C-4
C.1.5	<i>Taux d'intérêt ajusté au risque déterministe</i>	C-5
C.1.6	<i>Taux d'intérêt ajusté au risque stochastique</i>	C-6
C.2	DÉBIT JOURNALIER MOYEN ANNUALISÉ	C-7
C.2.1	<i>Débit journalier moyen annualisé déterministe</i>	C-7
C.2.2	<i>Débit journalier moyen annualisé stochastique</i>	C-8
C.3	DÉTÉRIORATION DES ÉLÉMENTS	C-8
C.3.1	<i>Détérioration déterministe de la dalle</i>	C-8
C.3.2	<i>Détérioration markovienne de la dalle</i>	C-11
C.3.3	<i>Détérioration markovienne de la dalle avec 2 réparations</i>	C-14
C.3.4	<i>Détérioration stochastique de la dalle (modèle proposé)</i>	C-18
C.3.5	<i>Détérioration déterministe de la dalle et des poutres</i>	C-24
C.3.6	<i>Détérioration markovienne de la dalle et des poutres</i>	C-28
C.3.7	<i>Détérioration stochastique de la dalle et des poutres</i>	C-34
C.4	CALCUL DES COÛTS	C-48
C.4.1	<i>Un seul élément</i>	C-48

C.4.2	<i>Un seul élément et deux réparations possibles.....</i>	<i>C-49</i>
C.4.3	<i>Deux éléments</i>	<i>C-50</i>
C.5	CALCUL DES REVENUS.....	C-52
C.5.1	<i>Un seul élément.....</i>	<i>C-52</i>
C.5.2	<i>Deux éléments</i>	<i>C-53</i>
C.6	VALEUR ACTUALISÉE NETTE ET ANALYSE	C-54
C.6.1	<i>Un seul élément.....</i>	<i>C-55</i>
C.6.2	<i>Un seul élément et deux réparations possibles.....</i>	<i>C-57</i>
C.6.3	<i>Deux éléments</i>	<i>C-58</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1 - Dépenses d'entretien et de développement du réseau routier québécois (chaussées et structures) (MTQ 2009, MTQ 2010, MTQ 2011, MTQ 2012, MTQ 2013, CEIC 2014, MTQ 2014)</i>	<i>4</i>
<i>Tableau 1.2 - Pourcentage des structures en bon état par année sur le réseau routier au Québec (MTQ 2014)</i>	<i>4</i>
<i>Tableau 1.3 - Surplus annuels et cumulés récents et prévus du Fonds des réseaux de transport terrestre (MFQ 2012)5</i>	
<i>Tableau 3.1 – Fréquence d’inspection en années selon le type de structure (MTQ 2004)</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 3.2 – Évaluation du comportement des éléments (MTQ 2004).....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 3.3 – Valeurs de base pour chaque paramètre du calcul de l'IFS (MTQ 2000)</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 3.4 – Valeurs de base pour chaque catégorie structurale en fonction du type de pont (MTQ 2000).....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 3.5 – Valeurs de base pour éléments secondaires et accessoires en fonction du type de pont (MTQ 2000) .</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 3.6 – Facteurs de pondération pour les coefficients sismiques (MTQ 2000)</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 3.7 – Fréquence d’inspection en années selon le type de structure (MTQ 2012)</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 3.8 – Lien entre les degrés de sévérité et l'état du matériau (MTQ 2012)</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 3.9 – Critères généraux d'évaluation du comportement des éléments (MTQ 2012).....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 3.10 - Pourcentage résiduel d'une partie d'élément en fonction de son état (MTQ 2015)</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 3.11 - Répartition entre les degrés de sévérité de dommage à utiliser selon la cote d'évaluation du matériau.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 3.12 - Conversion des cotes de comportement du système SGS-5016 au système GSQ-6026</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 3.13 – Choix de valeur résiduelle d'une partie d'élément en fonction de son état selon le système SGS-5016 pour un élément principal</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 3.14 - Valeur résiduelle d'une partie d'élément en fonction de son état (MTQ 2015)</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 3.15 - Valeur résiduelle pour un élément selon l'état du matériau selon le FDOT (Sobanjo and Thompson 2011)</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 3.16 - Temps de transition moyen pour chacun des états selon différents modèles.....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 3.17 - Caractéristiques de la distribution aléatoire de la détérioration d'une dalle en béton armé neuve en fonction du temps écoulé depuis la construction</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 3.18 - Fonction de distribution aux valeurs minimales, médianes et maximales des lois présentées au</i>	
<i>Tableau 3.17.....</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 6.1 – Valeur des paramètres généraux pour la détérioration d'un seul élément.....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau 6.2 - Valeur des paramètres financiers et de débit selon l'approche</i>	<i>82</i>
<i>Tableau 6.3 - Valeur actualisée nette pour chaque scénario et perte par rapport au scénario optimal pour la détérioration déterministe et les paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>84</i>
<i>Tableau 6.4 - Valeur cumulative des différentes paramètres aléatoires pour une détérioration déterministe avec des paramètres financiers et de débit stochastiques</i>	<i>85</i>

<i>Tableau 6.5 - Revenus bruts pour les trois scénarios optimaux avec une détérioration déterministe et des paramètres financiers et de débit stochastiques.....</i>	<i>86</i>
<i>Tableau 6.6 - Valeurs actualisées nettes moyennes pour chaque scénario optimal pour une détérioration déterministe et des paramètres financiers et de débit stochastiques.....</i>	<i>87</i>
<i>Tableau 6.7 - Nombre de scénarios possibles pour se rendre à un état pour chaque période de 5 ans avec la détérioration markovienne pour un élément.....</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 6.8 - Répartition des moments optimaux de réparation selon l'état lors de la réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes.....</i>	<i>92</i>
<i>Tableau 6.9 – Nombre de simulations pour chaque état lors de la réparation optimale selon le type de paramètres utilisé pour une détérioration markovienne.....</i>	<i>100</i>
<i>Tableau 6.10 - Détérioration moyenne pour les simulations réparées avant 35 ans pour une détérioration stochastique avec des paramètres financiers et de débit déterministes.....</i>	<i>105</i>
<i>Tableau 6.11 – Valeur des paramètres pour la détérioration de deux éléments simultanément.....</i>	<i>109</i>
<i>Tableau 6.12 - Valeur des paramètres financiers et de débit selon l'approche déterministe ou stochastique.....</i>	<i>110</i>
<i>Tableau 6.13 - Valeurs actualisées nettes (en M\$) pour différents moments de réparation pour des paramètres déterministes et une détérioration déterministe de la dalle et des poutres.....</i>	<i>113</i>
<i>Tableau 6.14 - Perte de valeur actualisée nette (en k\$) par rapport au moment de réparation optimal pour des paramètres déterministes et une détérioration déterministe de la dalle et des poutres.....</i>	<i>114</i>
<i>Tableau 6.15 - Valeur cumulative des différents paramètres stochastiques pour une détérioration déterministe de deux éléments avec des paramètres financiers et de débit stochastiques.....</i>	<i>115</i>
<i>Tableau 6.16 - Valeur actualisée nette moyenne pour chaque scénario optimal de réparation pour une détérioration déterministe de deux éléments et des paramètres financiers et de débit stochastiques.....</i>	<i>116</i>
<i>Tableau 6.17 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit déterministes.....</i>	<i>119</i>
<i>Tableau 6.18 - Répartition des moments optimaux de réparation pour la dalle en béton armé et les poutres en acier si elles sont étudiées seules ou ensemble pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes.....</i>	<i>120</i>
<i>Tableau 6.19 - Répartition des états lors de la réparation d'une dalle en béton armé et des poutres en acier selon qu'elles soient étudiées seules ou conjointement pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes.....</i>	<i>122</i>
<i>Tableau 6.20 - Revenus et coûts bruts pour les poutres suite à une détérioration en B à 90 ans selon une approche de réparation à 90 ans ou aucune réparation sur la durée de vie.....</i>	<i>123</i>
<i>Tableau 6.21 - Facteur d'indexation et d'actualisation des revenus et de coûts de 90 à 100 ans.....</i>	<i>123</i>
<i>Tableau 6.22 – Revenus et coûts nets pour les poutres suite à une détérioration en B à 90 ans selon une approche de réparation à 90 ans ou aucune réparation sur la durée de vie.....</i>	<i>124</i>
<i>Tableau 6.23 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit stochastiques.....</i>	<i>125</i>
<i>Tableau 6.24 - Répartition des moments optimaux de réparation pour la dalle en béton armé et les poutres en acier si elles sont étudiées seules ou ensemble pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit stochastiques.....</i>	<i>127</i>
<i>Tableau 6.25 – Répartition des états lors de la réparation d'une dalle en béton armé et des poutres en acier selon qu'elles soient étudiées seules ou conjointement pour une détérioration markovienne et des paramètres stochastiques.....</i>	<i>127</i>

<i>Tableau 6.26 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>131</i>
<i>Tableau 6.27 - Répartition des moments optimaux de réparation pour la dalle en béton armé et les poutres en acier si elles sont étudiées seules ou ensemble pour une détérioration stochastique et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>132</i>
<i>Tableau 6.28 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit stochastiques</i>	<i>133</i>
<i>Tableau 6.29 – Répartition des moments optimaux de réparation pour la dalle en béton armé et les poutres en acier s'ils sont étudiés seuls ou ensemble pour une détérioration stochastique et des paramètres financiers et de débit stochastiques</i>	<i>134</i>
<i>Tableau 7.1 - Matrice limite pour modifier le choix optimal avec l'approche déterministe</i>	<i>140</i>
<i>Tableau 7.2 – Approche linéaire et du MTMDET pour la pénalité d'état</i>	<i>142</i>
<i>Tableau 7.3 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres déterministes sans avantage de réparation simultanée</i>	<i>148</i>
<i>Tableau 7.4 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres déterministes avec 10% d'avantage de réparation simultanée</i>	<i>149</i>
<i>Tableau 7.5 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres déterministes avec 30% d'avantage de réparation simultanée</i>	<i>150</i>
<i>Tableau 7.6 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres déterministes avec 50% d'avantage de réparation simultanée</i>	<i>151</i>
<i>Tableau 7.7 – Différence entre les moments optimaux de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments avec paramètres déterministes pour un avantage de réparation simultanée de 10% par rapport à aucun avantage</i>	<i>152</i>
<i>Tableau 7.8 - Différence entre les moments optimaux de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments avec paramètres déterministes pour un avantage de réparation simultanée de 30% par rapport à aucun avantage</i>	<i>153</i>
<i>Tableau 7.9 - Différence entre les moments optimaux de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments avec paramètres déterministes pour un avantage de réparation simultanée de 50% par rapport à aucun avantage</i>	<i>154</i>
<i>Tableau 7.10 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres déterministes sans avantage de réparation simultanée</i>	<i>158</i>
<i>Tableau 7.11 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres déterministes avec 10% d'avantage de réparation simultanée</i>	<i>159</i>
<i>Tableau 7.12 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres déterministes avec 30% d'avantage de réparation simultanée</i>	<i>160</i>
<i>Tableau 7.13 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres déterministes avec 50% d'avantage de réparation simultanée</i>	<i>161</i>
<i>Tableau 7.14 - Différence entre les moments optimaux de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments avec paramètres déterministes pour un avantage de réparation simultanée de 10% par rapport à aucun avantage</i>	<i>162</i>
<i>Tableau 7.15 - Différence entre les moments optimaux de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments avec paramètres déterministes pour un avantage de réparation simultanée de 30% par rapport à aucun avantage</i>	<i>163</i>

<i>Tableau 7.16 - Différence entre les moments optimaux de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments avec paramètres déterministes pour un avantage de réparation simultanée de 50% par rapport à aucun avantage</i>	164
<i>Tableau A.1 – Classification des ponceaux (tiré de MTQ 2015)</i>	A-1
<i>Tableau A.2 - Classification des ponts à dalle épaisse (tiré de MTQ 2015)</i>	A-2
<i>Tableau A.3 - Classification des ponts à poutres à âme pleine (tiré de MTQ 2015)</i>	A-3
<i>Tableau A.4 - Classification des ponts à poutres-caissons (tiré de MTQ 2015)</i>	A-4
<i>Tableau A.5 - Classification des ponts à poutres triangulées (tiré de MTQ 2015)</i>	A-4
<i>Tableau A.6 - Classification des ponts en arc (tiré de MTQ 2015)</i>	A-5
<i>Tableau A.7 - Classification des ponts à câbles (tiré de MTQ 2015)</i>	A-5
<i>Tableau A.8 - Classification des autres types d'ouvrages (tiré de MTQ 2015)</i>	A-6
<i>Tableau A.9 - Classification des éléments selon leur importance selon le modèle d'avant 2008 (tiré de MTQ 2004)</i>	A-7
<i>Tableau A.10 - Classification des éléments selon leur importance en fonction du modèle de gestion actuel (tiré de MTQ 2012, MTQ 2015)</i>	A-11
<i>Tableau A.11 - Types d'obstacles traversés par un ouvrage routier (MTQ 2005)</i>	A-14
<i>Tableau A.12 - Classification fonctionnelle du réseau routier québécois (MTQ 2005)</i>	A-15
<i>Tableau A.13 - Capacité souhaitable et minimale souhaitable en fonction de la classification fonctionnelle (MTQ 2000)</i>	A-16
<i>Tableau A.14 - Débit journalier maximum en fonction de la classification fonctionnelle et du nombre de voie de circulation (MTQ 2000)</i>	A-16
<i>Tableau A.15 - Dégagements horizontaux selon les paramètres du pont (MTQ 2000)</i>	A-17
<i>Tableau A.16 - Dégagement vertical recommandé et obligatoire selon l'obstacle traversé (MTQ 2000)</i>	A-17
<i>Tableau A.17 - Largeur de voie recommandée et minimale souhaitable en fonction de la classification fonctionnelle et du nombre de voies (MTQ 2000)</i>	A-18
<i>Tableau A.18 - Combinaison d'éléments principaux pour le calcul de l'IES (MTQ 2000)</i>	A-19
<i>Tableau A.19 - Combinaison d'éléments secondaires et accessoires pour le calcul de l'IES (MTQ 2000)</i>	A-22
<i>Tableau A.20 - Facteurs de pondération pour les calculs de cotes pour les éléments principaux par fiche d'inspection (MTQ 2000)</i>	A-27
<i>Tableau A.21 - Facteurs de pondération pour les calculs de cotes pour les éléments secondaires et accessoires par fiche d'inspection (MTQ 2000)</i>	A-28
<i>Tableau A.22 - Résultats d'inspection à des fins d'exemple (MTQ 2000)</i>	A-29
<i>Tableau A.23 - Cotes pour chacun des groupes d'éléments pour l'exemple de calcul de l'IES</i>	A-29
<i>Tableau A.24 - Liste des coûts de remplacements des éléments d'un pont (MTQ 2015)</i>	A-31
<i>Tableau B.1 - Données sur le parc automobile québécois de 1987 à 2013 (SAAQ 2015)</i>	B-1

Liste des figures

<i>Figure 1.1 – Répartition des années de construction des structures routières en service (MTQ 2011)</i>	2
<i>Figure 2.1 - Schéma du système GSQ-6026 (tiré de Yan 2008, [traduction libre])</i>	10
<i>Figure 2.2 - Module de Planification Stratégique du système GSQ-6026 (Ellis et coll. 2008, [traduction libre])</i>	11
<i>Figure 3.1 – Évaluation de la condition du matériau (MTQ 2004)</i>	23
<i>Figure 3.2 - Conciliation des modèles pour l'évaluation de l'état du matériau effectuée dans le cadre de cette étude</i>	38
<i>Figure 3.3 - Courbes de détérioration pour une dalle de pont en béton armé neuve selon différents modèles</i>	45
<i>Figure 3.4 - Courbes de détérioration pour une dalle de pont initialement neuve</i>	48
<i>Figure 3.5 - Courbes de valeur résiduelle et de détérioration pour un dalle neuve et distribution de la détérioration à 5 ans</i>	51
<i>Figure 3.6 - Courbes de valeur résiduelle et de détérioration pour une dalle de 5 ans</i>	52
<i>Figure 3.7 - Courbe de distribution pour la simulation pour la détérioration de 5 à 10 ans d'une dalle à valeur résiduelle de 89,5%</i>	52
<i>Figure 4.1 - Détérioration d'une dalle en béton armé neuve et de poutres neuves selon le modèle de dégradation déterministe</i>	56
<i>Figure 4.2 - Courbes de détérioration médiane et extrêmes pour une dalle en béton armé neuve suivant une détérioration stochastique</i>	58
<i>Figure 4.3 - Courbes de détérioration médiane et extrêmes pour une poutre neuve selon une détérioration stochastique</i>	59
<i>Figure 4.4 - Exemple de calcul du temps économisé grâce à l'utilisation d'un pont</i>	61
<i>Figure 5.1 - Interactions entre les processus</i>	71
<i>Figure 5.2 - Schéma des processus pour la simulation des valeurs financières</i>	72
<i>Figure 5.3 - Légende pour les schémas de processus</i>	73
<i>Figure 5.4 - Processus pour le calcul du DJMA</i>	74
<i>Figure 5.5 - Processus pour la détérioration selon le modèle déterministe</i>	75
<i>Figure 5.6 - Processus pour la détérioration selon le modèle markovien</i>	76
<i>Figure 5.7 – Processus pour la détérioration selon le modèle stochastique</i>	76
<i>Figure 5.8 - Processus pour la détérioration globale des éléments</i>	77
<i>Figure 5.9 - Processus pour le calcul des coûts</i>	78
<i>Figure 5.10 - Processus pour le calcul des revenus</i>	78
<i>Figure 6.1 - Répartition des simulations selon la date optimale de réparation pour la détérioration déterministe et les paramètres financiers et de débit déterministes</i>	83
<i>Figure 6.2 - Répartition des simulations selon la date optimale de réparation pour la détérioration déterministe et les paramètres financiers et de débit stochastiques</i>	85

<i>Figure 6.3 - Répartition des simulations selon la date optimale de réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>88</i>
<i>Figure 6.4 - Scénarios de détérioration ne nécessitant jamais de réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>89</i>
<i>Figure 6.5 - Scénario de dégradation pouvant ne nécessiter aucune réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>90</i>
<i>Figure 6.6 - Valeur actualisée nette pour une dalle se dégradant à 85 ans a) sans réparation b) avec réparation à 85 ans et sans détérioration par la suite c) avec réparation à 85 ans et avec détérioration à 95 ans pour une détérioration markovienne avec paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>90</i>
<i>Figure 6.7 - Répartition des états de la dalle (pont) lors de la réparation optimale pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>91</i>
<i>Figure 6.8 - Répartition des moments optimaux de réparation selon l'état lors de la réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>92</i>
<i>Figure 6.9 - Temps d'attente dans l'état B avant la réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>93</i>
<i>Figure 6.10 - Temps d'attente dans l'état C avant la réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>94</i>
<i>Figure 6.11 - Réparation hâtive suivie a) d'une détérioration rapide b) d'un maintien en bon état</i>	<i>95</i>
<i>Figure 6.12 - Temps d'attente dans l'état D avant la réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>95</i>
<i>Figure 6.13 - Scénario optimal de réparation lorsque deux réparations sont possibles sur la durée de vie d'une dalle de béton armé de pont pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>96</i>
<i>Figure 6.14 - État lors de la réparation optimale lorsque deux réparations sont possibles pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>97</i>
<i>Figure 6.15 - Répartition des simulations en fonction du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit stochastiques</i>	<i>98</i>
<i>Figure 6.16 - Répartition des états de la dalle en béton armé lors de la réparation optimale pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit stochastiques</i>	<i>98</i>
<i>Figure 6.17 - Répartition du délai pour la réparation optimale pour le scénario avec paramètres financiers et de débit stochastiques par rapport au scénario à paramètres financiers et de débit déterministes pour une détérioration markovienne</i>	<i>99</i>
<i>Figure 6.18 - Répartition du moment optimal de réparation lorsque deux réparations sont possibles sur la durée de vie pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit stochastiques</i>	<i>101</i>
<i>Figure 6.19 - État lors de la réparation optimale lorsque deux réparations sont possibles pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit stochastiques</i>	<i>101</i>
<i>Figure 6.20 - Répartition des simulations selon la date optimale de réparation pour une détérioration stochastique et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>102</i>
<i>Figure 6.21 - Évolution de la valeur résiduelle moyenne pour les simulations réparées après 30 ans pour une détérioration stochastique avec des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>103</i>
<i>Figure 6.22 - Évolution de la valeur résiduelle moyenne pour les simulations réparées avant 35 ans pour une détérioration stochastique avec des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	<i>104</i>

<i>Figure 6.23 - Répartition des simulations selon la date optimale de réparation pour une détérioration stochastique et des paramètres financiers et de débit stochastiques</i>	106
<i>Figure 6.24 – Délai pour la réparation optimale pour le scénario avec paramètres financiers et de débit stochastiques par rapport aux paramètres financiers et de débit déterministes pour une détérioration stochastique</i>	107
<i>Figure 6.25 - Répartition des moments optimaux de réparation pour la dalle et les poutres en acier pour une détérioration déterministe et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	111
<i>Figure 6.26 - Répartition des moments optimaux de réparation pour la dalle et les poutres en acier pour une détérioration déterministe et des paramètres financiers et de débit stochastiques</i>	112
<i>Figure 6.27 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	118
<i>Figure 6.28 - Répartition de l'état lors de la réparation pour deux éléments selon la détérioration markovienne et les paramètres financiers et de débit déterministes</i>	121
<i>Figure 6.29 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit stochastiques</i>	126
<i>Figure 6.30 - Délai pour la réparation optimale pour le scénario avec paramètres financiers et de débit stochastiques par rapport aux paramètres financiers et de débit déterministes pour une détérioration markovienne de la dalle en béton armé lorsque deux éléments sont considérés</i>	128
<i>Figure 6.31 - Délai pour la réparation optimale pour le scénario avec paramètres financiers et de débit stochastiques par rapport aux paramètres financiers et de débit déterministes pour une détérioration stochastique des poutres en acier lorsque deux éléments sont considérés</i>	129
<i>Figure 6.32 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit déterministes</i>	130
<i>Figure 6.33 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit stochastiques</i>	133
<i>Figure 6.34 - Délai pour la réparation optimale pour le scénario avec paramètres financiers et de débit stochastiques par rapport aux paramètres financiers et de débit déterministes pour une détérioration stochastique de la dalle en béton armé lorsque deux éléments sont considérés</i>	135
<i>Figure 6.35 - Délai pour la réparation optimale pour le scénario avec paramètres financiers et de débit stochastiques par rapport aux paramètres financiers et de débit déterministes pour une détérioration stochastique des poutres en acier lorsque deux éléments sont considérés</i>	135
<i>Figure 7.1 – Répartition des moments optimaux de réparation pour l'approche markovienne avec 3 matrices de transition (sévère, de base et légère)</i>	140
<i>Figure 7.2 - Répartition des moments optimaux de réparation pour l'approche stochastique avec 3 matrices de transition (sévère, de base et légère)</i>	141
<i>Figure 7.3 - Moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne selon différentes approches de pénalité d'état</i>	143
<i>Figure 7.4 - Moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique selon différentes approches de pénalité d'état</i>	144
<i>Figure 7.5 - Moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique selon différents pourcentages de bornes extrêmes</i>	146

Liste des symboles

$[P_f^*]$	Matrice de transition à fréquence de f années où l'état absorbant est nul
$[P_f]$	Matrice de transition à fréquence de f années
AN_t	Avantage net de la structure à l'année t
$\overline{C(0)}$	Vecteur de répartition initial des états d'un élément
$\overline{C(t)}$	Vecteur de répartition des états d'un élément au temps t
C_1	Coefficient sismique pour le type de pont
C_2	Coefficient sismique pour la complexité de comportement structural
C_3	Coefficient sismique pour le nombre de discontinuités
C_4	Coefficient sismique pour le type de supports verticaux
C_5	Coefficient sismique pour le type d'appareil d'appui
C_6	Coefficient sismique pour le biais du pont
C_7	Coefficient sismique pour le nombre de poutres
C_8	Coefficient sismique pour la présence de services publics
CEC_{CAT}	Cote d'évaluation du comportement pour une catégorie d'éléments
CEC_{GR}	Cote d'évaluation du comportement pour un groupe d'éléments
CU_e	Coût unitaire de construction de l'élément e
$C_{e,t}$	Coûts de réparation de l'élément e à l'année t
C_i	Cote du groupe d'élément i
C_t	Coûts de réparation du pont à l'année t
D_{AF}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour l'affichage
D_{AP}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour les conditions d'approche
D_{AU}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour les autres éléments
D_{CA}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour la capacité portante
D_{DH}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour le dégagement horizontal inférieur
D_{DVI}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour le dégagement vertical inférieur
D_{DVS}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour le dégagement vertical supérieur
D_F	<i>Points de démérite</i> maximaux pour les fondations
D_H	<i>Points de démérite</i> maximaux pour le comportement hydraulique
$DJMA_t$	Débit journalier moyen annualisé à l'année t
D_{JT}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour les joints de tablier
D_P	<i>Points de démérite</i> maximaux pour le platelage
D_{PC}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour la présence de pistes cyclables
D_{RV}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour le revêtement
D_S	<i>Points de démérite</i> maximaux pour les systèmes structuraux
D_{SC}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour les éléments relatifs à la sécurité
D_{SR}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour la surface de roulement
D_T	<i>Points de démérite</i> maximaux pour la présence de trottoirs
D_{TR}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour le volume du trafic
D_{VC}	<i>Points de démérite</i> maximaux pour la largeur de voie carrossable
F_1	Facteur de pondération sismique pour le type de pont

F_2	Facteur de pondération sismique pour la complexité de comportement structural
F_3	Facteur de pondération sismique pour le nombre de discontinuités
F_4	Facteur de pondération sismique pour le type de supports verticaux
F_5	Facteur de pondération sismique pour le type d'appareil d'appui
F_6	Facteur de pondération sismique pour le biais du pont
F_7	Facteur de pondération sismique pour le nombre de poutres
F_8	Facteur de pondération sismique pour la présence de services publics
F_d	Facteur d'importance du détour
$[I]$	Matrice identité
I_{AF}	Indice d'inadéquation pour l'affichage
I_{AP}	Indice d'inadéquation pour les conditions d'approche
I_{AU}	Indice d'inadéquation pour les autres éléments
I_{CA}	Indice d'inadéquation pour la capacité portante
I_{CAT}	Indice d'inadéquation pour une catégorie d'éléments
I_{DH}	Indice d'inadéquation pour le dégagement horizontal inférieur
I_{DVI}	Indice d'inadéquation pour le dégagement vertical inférieur
I_{DVS}	Indice d'inadéquation pour le dégagement vertical supérieur
I_F	Indice d'inadéquation pour les fondations
I_H	Indice d'inadéquation pour le comportement hydraulique
I_{JT}	Indice d'inadéquation pour les joints de tablier
I_P	Indice d'inadéquation pour le platelage
I_{PC}	Indice d'inadéquation pour la présence de pistes cyclables
I_{RV}	Indice d'inadéquation pour le revêtement
I_S	Indice d'inadéquation pour les systèmes structuraux
I_{SC}	Indice d'inadéquation pour les éléments relatifs à la sécurité
I_{SR}	Indice d'inadéquation pour la surface de roulement
I_T	Indice d'inadéquation pour la présence de trottoirs
I_{TR}	Indice d'inadéquation pour le volume du trafic
I_{VC}	Indice d'inadéquation pour la largeur de voie carrossable
I_i	Indice du groupe d'élément i
K_a	Facteur d'affichage de la structure
K_c	Facteur de circulation
NU_e	Nombre d'unité de l'élément e
P_{EP}	<i>Points de démérite</i> pour les éléments principaux
P_{ES}	<i>Points de démérite</i> pour les éléments secondaires et accessoires
PE_t	Pénalité d'état d'un pont à l'année t
P_{ij}	Probabilité de transition de l'état i à l'état j
$[R]$	Matrice de corrélation entre les valeurs financières décomposée selon Cholesky
RB_A	Revenus bruts annuels générés par les poutres à l'état A en fin de vie ($DJMA$ max)
RB_B	Revenus bruts annuels générés par les poutres à l'état B en fin de vie ($DJMA$ max)
R_t	Revenus de la structure à l'année t
T_i	Temps moyen de rétention dans l'état i d'un événement markovien
VAN_{t-u}	Valeur actualisée nette pour une réparation de l'élément 1 au temps t et de l'élément 2 au temps u
\overline{VR}	Vecteur de répartition de la valeur résiduelle selon les états possibles

$VR_{e,t}$	Valeur résiduelle de l'élément e au temps t
$Z_{G,q}$	Partie stochastique au trimestre q attribuée au taux d'inflation générale
$Z_{M,q}$	Partie stochastique au trimestre q attribuée au taux d'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre
$Z_{r,q}$	Partie stochastique au trimestre q attribuée au taux d'actualisation sans risque
$dW_{G,q}$	Processus <i>Wiener</i> à fréquence annuelle au trimestre q attribuée au taux d'inflation générale
$dW_{M,q}$	Processus <i>Wiener</i> à fréquence annuelle au trimestre q attribuée au taux d'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre
$dW_{r,q}$	Processus <i>Wiener</i> à fréquence annuelle au trimestre q attribuée au taux d'actualisation sans risque
rf_q	Taux d'actualisation sans risque annualisé au trimestre q
rf_t	Taux d'actualisation sans risque annualisé à l'année t
rm_t	Rendement attendu du marché à l'année t
r_t	Taux d'intérêt annualisé à l'année t
δ_t	Pourcentage d'augmentation du <i>DJMA</i> à l'année t
$\varepsilon_{G,q}$	Partie stochastique au trimestre q du modèle d'évolution du taux d'inflation générale
$\varepsilon_{M,q}$	Partie stochastique au trimestre q du modèle d'évolution du taux d'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre
$\varepsilon_{r,q}$	Partie stochastique au trimestre q du modèle d'évolution du taux d'actualisation sans risque
$\pi_{G,q}$	Taux d'inflation générale annualisé au trimestre q
$\pi_{G,t}$	Taux d'inflation générale annualisé à l'année t
$\pi_{M,q}$	Taux d'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre annualisé au trimestre q
$\pi_{M,t}$	Taux d'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre annualisé à l'année t
$[\rho]$	Matrice de corrélation entre les valeurs financières
σ_G	Écart-type de la partie stochastique attribuée au taux d'inflation général
σ_M	Écart-type de la partie stochastique attribuée au taux d'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre
σ_r	Écart-type de la partie stochastique attribuée au taux d'actualisation sans risque
CC	Coûts de construction initiaux du pont
CEC	Cote d'évaluation du comportement
CEM	Cote d'évaluation du matériau
$DJMA$	Débit journalier moyen annualisé
E	Nombre d'éléments de la structure
F	Facteur de capacité de surcharge lors de l'évaluation de la capacité portante
FP	Facteur de pondération
ICG	Indice de condition général d'une structure
$ICOS$	Indice combiné d'une structure
ICS	Indice de comportement de la structure
IES	Indice d'état de la structure
IFS	Indice fonctionnel de la structure
IMS	Indice de matériau de la structure
IVS	Indice de vulnérabilité sismique

L	Longueur du détour
PV	Prix virtuel d'une heure économisée sur la route
RS	Facteur de risque sismique
TS	Temps économisé par l'utilisation de la structure
VAN	Valeur actualisée nette
VR	Valeur résiduelle de l'élément
c	Pourcentage de camions multiplié au $DJMA$
e	Nombre d'éléments dans un groupe d'éléments
f	Fréquence de la matrice de transition
m	Nombre de travées sur un pont
n	Nombre d'états possibles d'une chaîne de Markov
q	Temps en trimestres
t	Temps en années
α	Paramètre de retour à la moyenne du modèle de taux d'actualisation sans risque
β	Niveau de risque d'un actif pour le calcul de la prime de risque
β	Paramètre de retour à la moyenne du modèle de taux d'actualisation sans risque
γ	Paramètre de volatilité du modèle de taux d'actualisation sans risque
φ	Vitesse de retour à la moyenne d'un processus de retour à la moyenne
ψ	Moyenne à long terme d'un processus de retour à la moyenne
ω	Durée de vie maximale du pont

Avant-Propos

Ce projet de recherche a été financé par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) par le programme FONCER-INFRA ainsi que par le Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB). Je remercie également le Canadien National pour le support financier. Enfin, je remercie le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, plus précisément Monsieur René Gagnon, pour sa collaboration à la réalisation de ce projet.

Je remercie madame Josée Bastien, directrice, et monsieur Gabriel Power, codirecteur, pour l'opportunité offerte pour la réalisation de ce projet, ainsi que pour leur disponibilité et les précieux conseils offerts durant ce passage aux études supérieures. Je veux aussi souligner l'aide d'Alexandra Parenteau pour sa collaboration lors de son stage au centre de recherche.

Je tiens aussi à souligner le travail de monsieur Nicolas Rouleau qui m'a aidé à développer ce projet de recherche et soutenu dans l'avancement au cours de ma première année de maîtrise.

Je veux aussi remercier l'équipe du CRIB qui m'a soutenu académiquement, ainsi que l'ensemble de mes collègues de recherche qui ont permis la cohésion études et vie sociable. Leur présence a permis de rendre ces années plus agréables. Je tiens notamment à souligner le support d'Antoine, Bromassin, Charles, Éric, Félix-Antoine, Fiset, Jesse, Julie, Marc-Antoine, Max, Roxanne, Sébastien, Tony, Vince et Xavier qui ont été de fiers partenaires de recherche.

Finalement, je remercie ma famille pour leurs encouragements constants tout au long de mes études qui se sont prolongées sur plus d'une décennie. Sans leur support, je n'aurais pu réaliser ces accomplissements.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Introduction générale

Au cours des années 60 et 70, le réseau routier a connu une expansion importante pour favoriser le développement économique. Cette expansion a eu pour effet d'augmenter le nombre de ponts routiers ce qui entraîne aussi une charge de travail supplémentaire pour les gestionnaires des réseaux routiers. À l'époque, la gestion de ces structures se faisait selon les besoins : lorsque des bris étaient constatés, ils étaient réparés. Cette méthode était de type réactif plutôt que de type préventif. En plus d'être très dispendieuse et peu efficiente, cette approche ne permettait pas toujours d'effectuer à temps les réparations nécessaires, ce qui pouvait entraîner de très graves conséquences pour les utilisateurs et leur sécurité.

Pour remédier à la situation, des programmes d'inspection des structures ont été développés. Ces inspections périodiques permettent de mieux comprendre l'évolution de la détérioration des structures et, ainsi, mieux prévoir les interventions nécessaires. L'inspecteur attribue à chaque élément de la structure une cote correspondant à son état (détérioration, capacité à remplir sa fonction), puis l'état des différents éléments est utilisé pour attribuer une cote globale à la structure. Les normes entourant le nombre de cotes possibles et la correspondance de ces dernières sont établies par le gestionnaire. Par contre, avec la complexité et l'étendue du réseau routier, les coûts engendrés par ces nouveaux systèmes de gestion des ponts (coûts d'inspection, de gestion de données et de réparation) deviennent très importants pour des budgets de plus en plus serrés.

Pour pallier ce nouveau problème de financement, des approches d'optimisation des dépenses sont de plus en plus utilisées par les gestionnaires. Pour ce faire, il faut estimer le moment d'intervention futur qui permettra de maximiser les bénéfices offerts par le pont en fonction des dépenses impliquées. Des facteurs de sécurité doivent aussi être pris en compte afin d'assurer la sécurité des usagers. La fiabilité de cette méthode repose donc sur une bonne prédiction des différents paramètres futurs touchant tant au pont et à son utilisation qu'à l'économie générale.

1.2 Mise en contexte

1.2.1 Contexte du Québec

Au Québec, l'évolution du réseau routier a été très importante durant la Révolution tranquille. À l'heure actuelle, une grande portion des structures ont atteint leur durée de vie utile, cette dernière ayant parfois été écourtée par des carences dans l'entretien des infrastructures (Boulet 2007). Un parc d'infrastructure vieillissant requiert une rigueur importante au niveau du suivi des dommages afin de minimiser les risques pour la population. La répartition des années de construction des ponts en service au Québec à l'année 2011 est présentée à la Figure 1.1.

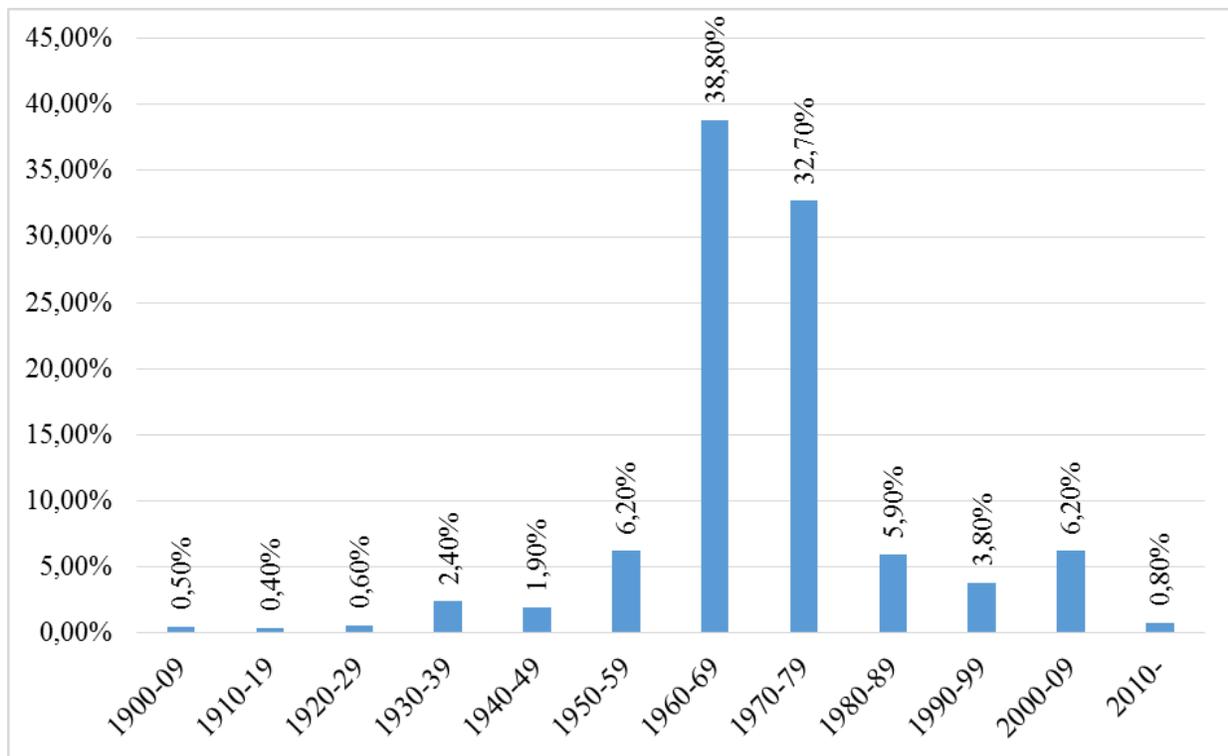


Figure 1.1 – Répartition des années de construction des structures routières en service (MTQ 2011)

En termes d'actifs en 2011, cela représente 5 241 structures sur le réseau provincial (incluant 545 murs, tunnels et stations de pompage) et 4 279 ponts sur le réseau municipal (MTQ 2011, CEIC 2014). L'ensemble de ces structures est géré par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET, anciennement le ministère des Transports du Québec (MTQ)) qui assure la sécurité des usagers par un système d'inspection et d'entretien

régulier. Les actifs financiers pour ces opérations sont majoritairement gérés par un fonds indépendant du budget annuel du gouvernement québécois. Un montant additionnel peut être prélevé de l'enveloppe budgétaire gouvernementale. En effet, depuis 1996, c'est le Fonds de conservation et d'amélioration du réseau routier qui est affecté au financement des travaux de conservation des chaussées et des structures. En 2010, ce fonds s'est aussi fait attribuer la responsabilité du réseau de transport en commun et a d'abord été renommé le Fonds des infrastructures routières et de transport en commun, puis finalement le Fonds des réseaux de transport terrestre (FORT) (Québec 1996, CAA-Québec 2012, Québec 2015). Le financement de ce fonds se fait à partir de la taxe sur l'essence au Québec et une partie des droits perçus sur l'immatriculation et le permis de conduire (CAA-Québec 2012). Cela signifie donc que la majorité des sommes investies dans le transport routier annuellement provient des utilisateurs du réseau.

L'effondrement d'une partie du viaduc de la Concorde le 30 septembre 2006 a amené plusieurs questionnements sur la qualité du système d'inspection et d'entretien. De plus, ce drame a créé une insécurité populaire par rapport à l'état global du réseau de structures routières. Les conclusions de la commission d'enquête sur l'effondrement d'une partie du viaduc de la Concorde (CEVC 2007) suggèrent que plusieurs manquements lors de la conception et la construction de l'ouvrage combinés à une réaction tardive face à la dégradation de l'ouvrage sont responsables de la catastrophe. Puisqu'une partie importante des structures québécoises ont été construites à la même période que cette structure, la Commission recommanda alors que des efforts importants soient déployés sur la remise en état des structures vieillissantes afin d'assurer la sécurité du public.

La réponse du gouvernement du Québec a été un plan pluriannuel de redressement de l'état du réseau routier. Ce plan vise, entre autres, à obtenir un pourcentage de structures en bon état sur le réseau supérieur de 80% d'ici 2022, alors que ce pourcentage avait atteint un creux historique de 53% en 2006 (MTQ 2007). Cet ambitieux objectif nécessite d'importants investissements pour la mise à niveau des structures. Les montants passés pour l'entretien du réseau (incluant la chaussée) et le développement du réseau prélevés du FORT sont présentés au Tableau 1.1. Il est à noter que les données pour les années financières 2013-2014 et 2014-2015 n'étaient pas encore disponibles au moment d'écrire ce document.

Tableau 1.1 - Dépenses d'entretien et de développement du réseau routier québécois (chaussées et structures) (MTQ 2009, MTQ 2010, MTQ 2011, MTQ 2012, MTQ 2013, CEIC 2014, MTQ 2014)

	Dépenses d'entretien (G\$)	Dépenses de développement (G\$)	TOTAL (G\$)
2000-2001	0,47	0,10	0,57
2001-2002	0,59	0,14	0,73
2002-2003	1,11	0,27	1,38
2003-2004	0,68	0,24	0,92
2004-2005	0,74	0,19	0,93
2005-2006	0,94	0,37	1,31
2006-2007	0,89	0,56	1,45
2007-2008	1,17	0,67	1,84
2008-2009	1,77	1,00	2,77
2009-2010	1,95	1,11	3,06
2010-2011	1,94	1,45	3,39
2011-2012	2,03	1,46	3,49
2012-2013	2,00	1,20	3,20

À première vue, l'augmentation des dépenses est très marquée dès 2008, confirmant la volonté gouvernementale d'améliorer l'état du réseau routier suite à la commission d'enquête sur l'effondrement d'une partie du viaduc de la Concorde. Bien qu'une partie du budget du plan de redressement soit alloué aux ponts municipaux (environ 120 millions par année), cette catégorie de pont n'est pas assujettie à l'objectif du 80% de ponts en bon état. Somme toute, l'état des structures s'est grandement amélioré depuis 2007 tel que présenté au Tableau 1.2, qui montre l'évolution de la proportion des structures en bon état (aucune réparation nécessaire), entre 2000 et 2014.

Tableau 1.2 - Pourcentage des structures en bon état par année sur le réseau routier au Québec (MTQ 2014)

	Réseau Supérieur (%)	Réseau Municipal (%)		Réseau Supérieur (%)	Réseau Municipal (%)
2000-2001	59,9	55,8	2007-2008	54,5	43,0
2001-2002	58,7	54,2	2008-2009	57,7	38,6
2002-2003	58,1	53,1	2009-2010	61,8	43,8
2003-2004	56,8	51,6	2010-2011	66,2	46,6
2004-2005	54,8	49,3	2011-2012	68,1	48,7
2005-2006	53,3	46,1	2012-2013	69,9	49,7
2006-2007	52,9	44,8	2013-2014	71,2	50,4

Une autre donnée intéressante est celle du solde du fonds (FORT) au cours des dernières années et les prévisions à cet effet. Cette donnée est très parlante sur la santé financière du fonds qui, bien que confortable à l'heure actuelle, risque d'être affaiblie par les demandes futures. Les derniers budgets provinciaux ne sont pas très loquaces à cet effet. Il faut donc remonter au budget de 2012-2013 pour trouver ces données qui sont présentées au Tableau 1.3.

Tableau 1.3 - Surplus annuels et cumulés récents et prévus du Fonds des réseaux de transport terrestre¹ (MFQ 2012)

	Surplus annuel	Surplus cumulé
2011-2012	509 M\$	1 146 M\$
2012-2013	397 M\$	1 543 M\$
2013-2014	277 M\$	1 820 M\$
2014-2015 ¹	73 M\$	1 893 M\$
2015-2016 ¹	(109 M\$)	1 784 M\$
2016-2017 ¹	(399 M\$)	1 385 M\$

Il est à noter que malgré le dernier surplus cumulé, soit en 2013-2014, d'environ 1,8 G\$, de nombreux déficits sont à prévoir (les données de 2014 à 2017 sont des prévisions). Il faut aussi relativiser ce surplus qui ne correspond qu'à environ 50% des dépenses annuelles. De plus, il reste beaucoup de travail avant d'atteindre l'objectif de 80% des structures en bon état. Il faut aussi considérer l'hypothèse d'une amélioration technique possible due à la modification des critères d'évaluation (voir section 3.2). La politique économique du gouvernement actuel, misant sur la réduction des dépenses, jumelée aux déficits prévus du fonds et à la pression économique constante nécessaire pour maintenir le réseau en bon état est préoccupante pour le gestionnaire, qui doit toujours accomplir davantage avec moins de ressources. L'amélioration du modèle de gestion des structures permettant l'optimisation des décisions financières serait donc grandement bienvenue.

1.2.2 Problématiques et besoins pour le gestionnaire

Malgré la diversité des modèles de gestion de structures existants et leur évolution constante, il demeure difficile pour un gestionnaire de les appliquer à son réseau et, ainsi, en soutirer les bénéfices prévus. En effet, le nombre important de paramètres à considérer dans les modèles est un frein important pour le gestionnaire qui n'a pas toujours accès aux données nécessaires pour

¹ Prévvision à partir de l'année financière 2013-2014

appliquer ces paramètres et utiliser efficacement ces modèles. De plus, la majorité de ceux-ci se basent sur des approches déterministes pour lesquelles l'incertitude des variables considérées est négligée (Morcoux et Akhnoukh 2006, Sobanjo et Thompson 2011).

Pour la gestion d'un pont, un des paramètres les plus importants concerne l'évolution de l'endommagement. En effet, pour bien planifier les réfections nécessaires, il est essentiel de déterminer l'évolution des dommages ou de l'état des structures avec le plus de précision possible. À ce niveau, plusieurs modèles d'endommagement des structures routières ont été développés au fil des années. Bien entendu, plusieurs facteurs physiques ont un impact sur l'évolution de la dégradation d'un pont et la prise en compte de l'ensemble de ces facteurs devient rapidement complexe. Il existe aussi des modèles simplifiés qui se concentrent seulement sur l'état d'un élément ou d'une structure et de son évolution dans le temps, peu importe la nature des défauts. Ainsi, le gestionnaire étudie seulement l'évolution de l'endommagement (état) global du pont. Cette méthode, souvent représentée à l'aide de chaînes de Markov, tient compte des observations passées sur l'ensemble du réseau pour prédire l'évolution de l'endommagement d'un pont. Malgré tout, la précision de tels modèles est souvent critiquée en raison des nombreuses hypothèses prises en compte pour leur développement. En effet, ces modèles sont conçus pour un réseau de ponts en particulier et l'étude est à refaire complètement pour un nouveau réseau ou lorsque de nouvelles données s'ajoutent au modèle. Finalement, le gain d'efficacité promis par ces modèles pour le gestionnaire n'est pas toujours au rendez-vous en raison de la fréquence des mises à jour nécessaires (Setunge et Hasan 2011).

De plus, afin de bien comparer et analyser les flux monétaires, l'anticipation de paramètres financiers est essentielle. Dans l'optique d'optimiser les dépenses et de maximiser les bénéfices d'une structure, il faut être capable d'actualiser les valeurs financières futures. Pour ce faire, il faut estimer les taux d'intérêt et les taux d'inflation futurs. Or, les réalités futures sont difficiles à anticiper et des modèles stochastiques doivent donc être utilisés pour estimer ces valeurs. Ce problème est un sujet important du domaine financier. Le gestionnaire doit donc pouvoir compter sur un modèle étoffé tant du point de vue de l'ingénierie que du point de vue financier.

1.3 Objectifs

L'objectif initial de ce projet est la création d'un outil décisionnel pour le gestionnaire d'un réseau de pont basé sur l'optimisation de la valeur actualisée nette (VAN) du pont. Cet outil doit être complet, mais suffisamment simple pour favoriser son utilisation efficace par un gestionnaire. Ainsi, l'accessibilité de l'outil doit être privilégiée. Cet outil doit permettre d'établir certains critères décisionnels qui amèneront le gestionnaire à établir ses choix budgétaires et déterminer le moment optimal pour investir dans la réparation d'un pont en particulier.

Pour arriver à un tel outil, il est essentiel d'étudier et d'analyser les outils de gestion de ponts existants afin de cerner ce qui a déjà été fait et de faire ressortir les avantages et désavantages de chacun d'eux. La phase de développement de l'outil doit se faire en deux temps. Dans un premier temps, il faut déterminer quels sont les flux financiers pris en compte dans le modèle. À cette étape, les méthodes de calcul des bénéfices et des coûts annuels doivent être déterminées. Dans un second temps, il faut déterminer l'approche à utiliser pour déterminer l'évolution de chacun des paramètres qui entrent en jeu tant financiers que physiques. L'outil étant basé sur la valeur actualisée nette du projet, des hypothèses sur l'évolution des taux d'intérêt et d'inflation sont à poser pour comparer les flux financiers à l'année de référence.

Au fil des travaux de recherche, les modèles d'évolution s'amélioreront. Pour cette raison, l'outil développé doit être suffisamment flexible pour permettre l'ajout de nouveaux éléments. De cette façon, il sera possible non seulement d'utiliser de nouveaux modèles évolutifs, mais aussi de comparer deux modèles entre eux et l'impact qu'une modification peut avoir sur la décision du gestionnaire.

1.4 Structure du mémoire

Ce mémoire se présente en différentes sections. Le chapitre 2 se concentre sur les systèmes de gestion des ponts avec une revue de la littérature sur le sujet. Le choix d'une approche décisionnelle considérant les revenus et les coûts d'une structure permettant de choisir le moment d'intervention optimal est effectué à ce chapitre. Le chapitre 3 se consacre aux modèles de détérioration pour anticiper l'endommagement d'une structure ou de l'élément d'une structure. Ce chapitre est très étoffé avec une revue de la littérature sur les modèles de détérioration existants, une explication du

modèle d'inspection du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec et finalement le choix du modèle de détérioration pour cette étude. Chacun des paramètres utilisés pour l'étude est présenté au chapitre 4. Le fonctionnement de l'outil décisionnel informatique est présenté au chapitre 5, accompagné de l'explication des processus de chaque bloc de code. Les résultats et l'analyse pour chaque approches utilisées pour cette étude sont présentés au chapitre 6. Une analyse de sensibilité sur certains paramètres est effectuée au chapitre 7. Enfin une conclusion de ce projet de recherche est présentée au chapitre 8.

CHAPITRE 2 : SYSTÈMES DE GESTION DES PONTS

2.1 Revue de littérature

Les systèmes de gestion des ponts (Bridge Management System) sont des outils informatiques développés pour aider les gestionnaires à suivre l'évolution d'un réseau de pont et à prendre les décisions appropriées pour optimiser les investissements routiers et la sécurité des usagers. Il s'agit à la base d'imposantes bases de données et, selon les besoins du gestionnaire, des modèles de traitement des données sont implémentés au système. Les principales fonctions d'un système de gestion des ponts sont la collecte de données d'inventaire, la collecte de données d'inspections, l'évaluation de l'état et la capacité des structures, le suivi des réparations, des renforcements ou des remplacements et la priorisation des investissements (Hammad et coll. 2006, Hu 2006). Selon Ryall (2001), un bon système de gestion comprend quatre composantes fondamentales : une base de données de stockage, un modèle de coûts et de détérioration, des modèles d'optimisation et d'analyse, et des fonctions de mise à jour et d'amélioration.

Le système de gestion le plus connu est AASHTOWareTM Bridge Management (précédemment connu sous le nom PONTIS) développé aux États-Unis. Ce logiciel a été conçu au début des années 90 par l'*American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) et d'un consortium de départements des Transports de six états, suite à un mandat de la *Federal Highway Administration* (FHWA). La plus récente itération du logiciel permet de faire le suivi d'un cycle de vie complet pour un pont (AASHTO 2015). Aujourd'hui, le système est implanté dans plus de 45 états américains, lui conférant le statut de principal logiciel de ce type aux États-Unis. L'approche du logiciel se fait du *haut vers le bas*, c'est-à-dire qu'elle favorise l'analyse et le développement d'un réseau de ponts. À l'inverse, une approche du *bas vers le haut* est utile pour étudier les stratégies à utiliser pour chaque pont individuel. Les meilleures stratégies sont alors répertoriées jusqu'à l'atteinte du budget du réseau, comme c'est le cas avec BRIDGIT, un autre système développé aux États-Unis (Hammad et coll. 2007). Dans l'Union Européenne, un projet-pilote nommé BRIME a été développé vers la fin des années 90, mais, aujourd'hui, la majorité des états européens possèdent leur propre système de gestion de ponts (Stratt 2010).

Au Québec, le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports a commencé à utiliser un système de gestion des ponts dès 1985 (Hammad et coll. 2007). Le système était alors très modeste et s'est progressivement amélioré depuis. En 1996, le Ministère a implanté le Système de Gestion des Structures (SGS-5016) basé sur le modèle d'inspection de l'époque (Hu 2006). Au début des années 2000, une mise à jour du système s'imposait et, plus tard, suite aux recommandations de la commission d'enquête sur l'effondrement partiel du viaduc de la Concorde (CEVC 2007), le système d'inspection a été revu. Le consortium Dessau-Nurun-Stantec est alors mandaté pour développer un nouveau système de gestion des structures, basé sur un nouveau modèle d'inspection et équipé d'un module de planification stratégique (MPS). Le système de Gestion des Structures du Québec (GSQ-6026) est complètement implanté sur le réseau du MTMDET dès 2008 (Ellis et coll. 2008, Ellis et coll. 2008). La schématisation du logiciel est présentée à la Figure 2.1.

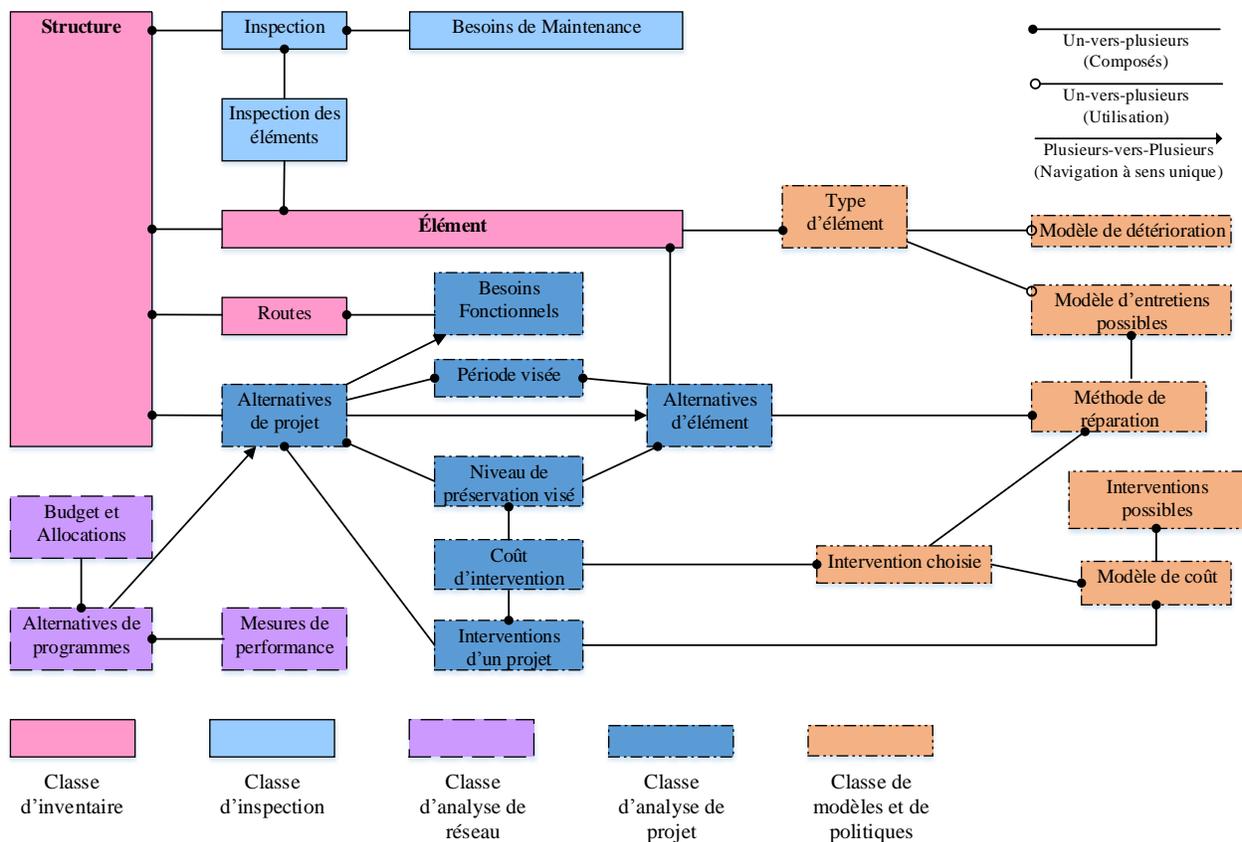


Figure 2.1 - Schéma du système GSQ-6026 (tiré de Yan 2008, [traduction libre])

Ce nouveau système fonctionne du *bas vers le haut*, tel que démontré par le module de Planification Stratégique de la Figure 2.2.

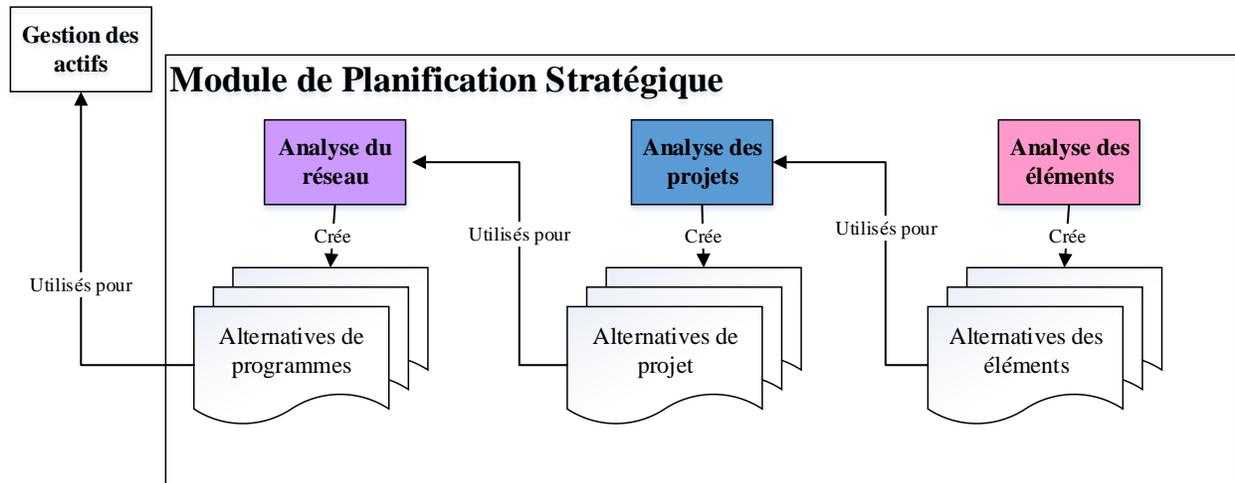


Figure 2.2 - Module de Planification Stratégique du système GSQ-6026 (Ellis et coll. 2008, [traduction libre])

Le but de la présente étude étant d’optimiser la date de réparation majeure d’une structure, deux blocs du système seront étudiés plus attentivement. Dans un premier temps, le modèle de détérioration est central du point de vue de l’ingénierie. Il sera donc analysé et des alternatives seront suggérées. Dans un second temps, l’analyse des projets sera étudiée selon l’approche coûts-avantages afin de maximiser la valeur actualisée nette du scénario de réparation. Il est à noter que seul le moment d’intervention est étudié, et non pas la méthode d’intervention.

2.2 Choix de l’approche décisionnelle pour l’étude

Ici, l’approche utilisée pour le traitement de données se concentre sur l’optimisation du bénéfice d’une ou plusieurs réparations sur la durée de vie d’un pont. Pour ce faire, une analyse coût-avantage sur la durée de vie est utilisée afin de comparer les valeurs actualisées nettes de plusieurs scénarios de réparations afin de trouver des pistes d’optimisation des dépenses. Les valeurs actualisées nettes permettent de comparer des flux financiers provenant d’années différentes en les indexant à une année commune, soit l’année initiale du projet. La valeur actualisée nette (*VAN*) pour un scénario d’investissement particulier est calculée selon l’équation 2.1.

$$VAN = \sum_{t=0}^{\omega} \frac{(R_t - \sum_{e=1}^E C_{e,t})}{\prod_{i=0}^t (1 + r_i)} - CC = \sum_{t=0}^{\omega} \frac{AN_t}{\prod_{i=0}^t (1 + r_i)} - CC \quad 2.1$$

Dans cette équation, le terme ω représente la durée de vie (maximale) en années du pont. R_t et $C_{e,t}$ représentent respectivement les revenus et les coûts du pont à l'année t . Pour les coûts, il faut déterminer les frais de réparation pour chaque élément (e) pour un nombre total de E éléments sur le pont. Il est à noter que la différence entre les revenus et les coûts d'une année correspond à l'avantage net de cette même année (AN_t). Le terme CC représente les coûts de construction initiaux du pont. Finalement, le terme r_i représente le taux d'actualisation pour l'année i . Il faut cependant déterminer ce qui correspond aux revenus et aux coûts annuels du pont. La majorité des ponts étant directement gérés par l'État et sans péage, la création de bénéfices est donc indirecte et il est plus difficile d'obtenir des données sur le sujet. Il faut donc développer un modèle de revenu basé sur la création de richesse produite par une structure et évaluer l'évolution des paramètres qui composent ce modèle. L'équation 2.2 présente le modèle utilisé pour évaluer les revenus dans le temps.

$$R_t = PV \times \prod_{i=0}^t (1 + \pi_{G,i}) \times TS \times DJMA_t \times 365 \times PE_t \quad 2.2$$

Dans cette équation, le terme PV représente le prix virtuel en dollar par heure économisée grâce à l'utilisation du pont. Le terme TS représente le temps économisé lors d'un passage sur le pont par rapport à la seconde alternative la plus rapide. Le $DJMA_t$ représente le débit journalier moyen annualisé à l'année t . Ce terme correspond au nombre moyen de véhicules circulant sur le pont quotidiennement; l'ajout de la constante 365 (jours/année) permet de convertir ce terme en valeur annuelle. Le paramètre $\pi_{G,i}$ représente l'inflation générale dans l'économie à l'année i . Finalement, PE_t représente une pénalité pour la condition du pont à l'année t . Il s'agit d'un terme qui permet de réduire les bénéfices lorsque la structure se détériore. À cette étape, ce terme est générique, mais correspond aux impacts qu'un pont en mauvais état peut avoir sur les bénéfices. Par exemple, ce paramètre peut être associé aux coûts relatifs au risque d'accidents ou de défaillance pour les usagers en empruntant la structure, à la fermeture de voie due aux entretiens de maintien, à la réduction du débit ou de la vitesse de circulation causée par les dommages ou à une fermeture temporaire. Il est à noter que les revenus représentent bien un avantage direct généré pour les usagers. Ainsi, les revenus externes perçus par le gouvernement (taxes, permis et immatriculations)

ne sont pas considérés ici puisqu'ils ne sont pas affectés par l'état d'une structure et seraient fixes pour tous les scénarios.

L'équation 2.3 présente le modèle utilisé pour évaluer les coûts pour la réparation d'un élément dans le temps. Pour connaître le coût global de réfection du pont, ce paramètre doit être calculé pour chaque élément du pont.

$$C_{e,t} = (100 - VR_{e,t}) \times NU_e \times CU_e \times \prod_{i=0}^t (1 + \pi_{M,i}) \quad 2.3$$

Dans cette équation, le paramètre $VR_{e,t}$ correspond à la valeur résiduelle de l'élément e à l'année t . Il s'agit d'une cote évaluée sur 100 en fonction des critères du gestionnaire. Le terme NU_e correspond au nombre d'unités à réparer sur l'élément e . Le terme CU_e correspond au coût unitaire pour la réparation de l'élément e . Finalement, le terme $\pi_{M,i}$ correspond à l'inflation pour le coût des matériaux et de la main-d'œuvre dans le milieu de la construction pour l'année i . Il s'agit d'une valeur différente de celle l'inflation générale, puisque la volatilité dans le milieu de la construction est significativement plus élevée que celle de l'économie générale.

L'étape suivante consiste à déterminer les valeurs à utiliser pour chacune des variables présentées dans les équations précédentes et la méthodologie utilisée pour les déterminer. Les prochains chapitres présentent donc le cheminement dans le choix effectué pour chacune de ces variables. Dans certains cas, une revue de littérature complète est nécessaire pour mettre en contexte le paramètre et la justification du choix pour la présente étude, alors que pour certains paramètres, des hypothèses et une méthodologie sont directement posées.

CHAPITRE 3 : MODÈLE DE DÉTÉRIORATION

Le modèle de détérioration du pont et de ses éléments est la pierre angulaire de ce projet de recherche. Ce chapitre représente donc une partie imposante de ce mémoire, en raison de sa complexité et de l'importance de la mise en contexte. En plus d'une revue de la littérature pour se familiariser avec ce qui a déjà été fait, il faut aussi comprendre le contexte d'inspection des structures au Québec afin de développer un outil pratique. Enfin, une brève revue des fondements théoriques est nécessaire afin de comprendre les modèles statistiques qui sont utilisés.

3.1 Revue de littérature

La littérature sur les modèles d'endommagement est riche. En effet, plusieurs approches sont utilisées pour prévoir l'état d'une structure au fil du temps. D'entrée de jeu, il faut distinguer les modèles de propagation de dommages des modèles d'anticipation de l'état selon les données historiques qui n'ont pas le même objectif.

Les modèles de propagation de dommages permettent principalement d'anticiper l'évolution d'un seul type de dommage sur une structure en fonction de ses conditions initiales et des paramètres environnementaux où elle se trouve. La majorité de ces modèles se consacrent à l'évolution de la corrosion sur les structures en béton armé. En effet, les principaux modèles existants traitent soit de la propagation des ions chlorure dans le béton armé (Bastidas-Arteaga et coll. 2009, Langlois 2010, Liu et Shi 2011, Stewart 2012) ou de l'évolution de la carbonatation (Na et coll. 2012, Peng et Zhang 2012, Bastidas-Arteaga et coll. 2013, Talukdar et Banthia 2013). Or, pour développer un modèle efficient, plusieurs paramètres doivent être représentés par des variables aléatoires afin de considérer l'incertitude dans leur évolution. Ces paramètres sont obtenus selon les observations passées ou selon des essais en laboratoire. Il est cependant difficile pour un gestionnaire de réseau de ponts d'utiliser ce type de modèle puisqu'il nécessite une grande quantité de données de monitoring et d'essais. Ils deviennent donc rapidement lourds. Pour ces raisons, les modèles d'évolution des dommages sont surtout utilisés pour suivre l'évolution de dommages sur une structure spécifique afin d'assurer sa sécurité et ne s'appliquent pas sur l'ensemble des structures du réseau. Cette étude ne considère donc pas cette approche.

Les modèles d'anticipation de l'état selon les données historiques sont plus intéressants pour un gestionnaire de réseau de pont puisque le suivi se fait simplement à partir de l'état actuel du pont. Cet état est obtenu directement lors des inspections générales des structures, selon les modalités du gestionnaire. Les causes de l'endommagement ne sont donc pas prises en compte dans une telle analyse permettant un suivi global, mais efficient à coût plus faible pour la gestion du risque du réseau routier. Le développement de tels modèles se base sur l'expérience passée afin de décrire des tendances de détérioration. Ces tendances sont utilisées pour anticiper la détérioration d'un pont et de ses éléments. En effet, l'ensemble des données prélevés lors des inspections servent de base de données pour anticiper l'évolution de l'état. À l'aide de la base de données, un modèle de détérioration est développé pour évaluer l'état futur du pont. Il faut cependant noter que l'application de tels modèles de détérioration demeure un défi pour les gestionnaires. Bu et coll. (2013) mentionnent certains obstacles pour les gestionnaires. Parmi ceux-ci, le fait que les systèmes de gestion de ponts ne soient apparus qu'il y a environ deux décennies limite grandement le nombre d'inspections disponibles (et donc la base de données) pour développer un modèle crédible à long terme. De plus, le changement d'état doit être perceptible entre deux inspections afin d'évaluer les temps moyen de ce changement. Ainsi, puisque la détérioration d'une structure se fait à long terme, il faut plusieurs inspections sur une même structure avant d'avoir des données crédibles sur celle-ci et plusieurs structures pour avoir un modèle fiable pour le réseau complet.

À cette étape, il est bien de catégoriser les différents modèles d'anticipation de l'état selon les données historiques. Selon Setunge et Hasan (2011), il existe trois grands types de modèles : les modèles déterministes, les modèles basés sur l'intelligence artificielle et les modèles stochastiques.

3.1.1 Modèles de détérioration déterministes

Les modèles déterministes tentent d'expliquer l'endommagement d'une structure selon des équations mathématiques considérant plusieurs variables observées. L'hypothèse d'un lien de causalité direct entre les variables observées et l'endommagement est posée pour ce type de modèle. Ainsi, aucun facteur aléatoire n'est inclus lors de l'application. Cela signifie que pour une condition initiale donnée, le modèle produira toujours le même résultat. Afin de pouvoir utiliser un tel modèle, il faut que la connaissance des paramètres influents sur le résultat soit parfaite, ce qui est rarement le cas lors de la détérioration d'une structure. Morcoux et coll. (2002), repris par Setunge et Hasan (2011), soulignent que ce type de modèle peut être approprié pour un réseau avec

une large population, mais énumère aussi plusieurs faiblesses soulevées par d'autres auteurs : (1) ils négligent l'incertitude causée par la variabilité intrinsèque liée à la détérioration d'une structure et par l'existence de paramètres explicatifs non observables ou non considérés jusqu'à présent (Jiang et Sinha 1989, Madanat et coll. 1995), (2) ils prédisent l'état moyen d'une famille de structure sans tenir compte de l'historique ou l'état actuel de la structure précise à étudier (Shahin et coll. 1987, Jiang et Sinha 1989), (3) ils estiment seulement une détérioration pour une maintenance sans entretien en raison de la difficulté d'estimer les impacts de diverses stratégies d'entretien (Sanders et Zhang 1994), (4) ils ignorent l'interaction entre les mécanismes de détérioration pour différents éléments (Sianipar et Adams 1997) et (5) ils sont difficilement modifiables lorsque de nouvelles données sont disponibles (Morcoux et coll. 2002).

3.1.2 Modèles de détérioration basés sur l'intelligence artificielle

Les modèles basés sur l'intelligence artificielle sont des modèles qui utilisent les technologies informatiques pour prévoir l'endommagement des structures. Ces techniques d'intelligence artificielles utilisent, entre autres, les systèmes experts, les réseaux de neurones artificiels, les algorithmes génériques et le raisonnement au cas par cas pour prédire les conditions futures (Setunge et Hasan 2011). Malgré l'automatisation de plusieurs systèmes pour optimiser l'anticipation de la détérioration, ce type de modèle affiche les mêmes faiblesses que les modèles déterministes (Morcoux et coll. 2002).

3.1.3 Modèles de détérioration stochastiques

Les modèles stochastiques utilisent les variables aléatoires afin d'anticiper la dégradation des infrastructures tout en considérant l'incertitude et le facteur aléatoire de cette dégradation. Ainsi, pour un état initial donné, l'anticipation de la dégradation va varier en fonction des variables aléatoires choisies pour le modèle. Bien qu'il soit possible d'utiliser les lois de probabilités connues, le modèle stochastique le plus utilisé pour prédire la détérioration de ponts est la chaîne de Markov discrète.

La théorie derrière les chaînes markoviennes est présentée à la section 3.1.3.1, mais d'entrée de jeu, il est possible de souligner les avantages et désavantages de tels modèles. Les chaînes de Markov corrigent deux problématiques des modèles déterministes en considérant l'incertitude de la détérioration et en tenant compte de l'état actuel de la structure. Par contre, il faut noter aussi les

limites de cette approche : (1) les hypothèses du modèle concernant les intervalles de temps des transitions discrètes, l'échantillon constant de la population de ponts et les probabilités constantes de la matrice de transition sont inappropriées (Collins 1974), (2) les chaînes markoviennes de premier ordre considèrent seulement l'état actuel de la structure (DeStefano et Grivas 1998) plutôt que tout l'historique de la structure, ce qui est peu réaliste (Madanat et coll. 1997), (3) les modèles de détérioration évaluent souvent seulement la probabilité d'une détérioration de l'ouvrage ou du maintien dans sa condition actuelle, mais ne considèrent pas la probabilité d'entretien et d'amélioration de l'état de la structure (Madanat et Ibrahim 1995), (4) l'interaction entre les mécanismes de détérioration pour les différents éléments de la structure est encore ignorée (Sianipar et Adams 1997) et (5) les probabilités de transition doivent être mises à jour lorsque de nouvelles données sont disponibles suite aux inspections et différentes activités d'entretien, ce qui requiert énormément de temps (Morcoux et coll. 2002).

3.1.3.1 Les chaînes de Markov

Plusieurs auteurs se sont penchés sur le sujet des chaînes de Markov afin d'établir les démonstrations mathématiques et les propriétés de base sur le sujet (Norris 1998, Meyn et Tweedie 2012, Ross 2014). Les chaînes de Markov sont des processus stochastiques qui peuvent prendre un nombre fini de valeurs possibles. Il est aussi possible d'utiliser le terme processus de Markov à temps discret pour nommer ces processus stochastiques. Chaque valeur possible est définie comme un état dans lequel le processus peut se trouver. En supposant un événement aléatoire répété à chaque période de temps, le calcul d'une probabilité de transition d'un état à l'autre au temps t se calcule à l'aide de l'équation 3.1.

$$P[X_{t+1} = j | X_t = i, X_{t-1} = i_{t-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0] = P[X_{t+1} = j | X_t = i] = P_{ij} \quad 3.1$$

L'équation 3.1 signifie que la probabilité d'atteindre l'état j à la période $t + 1$ sachant que le processus est à l'état i à la période t est la même que l'historique passé soit connu ou non. Ceci se résume par la notation P_{ij} , soit la probabilité que le processus se trouvant actuellement à l'état i passe à l'état j durant le prochain essai. Ce principe permet de souligner que les chaînes de Markov possèdent la propriété de Markov (Norris 1998), c'est-à-dire que les distributions conditionnelles de probabilité pour l'état futur sachant l'état présent et les états passés dépendent uniquement de l'état présent. Il est possible de parler de processus « sans mémoire » (*memoryless*).

Puisque l'état futur ne dépend que de l'état présent et que le nombre d'états est fini (n), il peut être pratique de rassembler l'ensemble des probabilités de transition selon chacun des scénarios possibles sous forme de matrice. Le terme matrice de transition (ou de détérioration pour cette étude, ces deux termes seront utilisés comme synonymes) est alors utilisé pour décrire cette matrice. L'équation 2.1 présente une matrice de transition générale.

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots & P_{0j} & \dots & P_{0n} \\ P_{10} & P_{11} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ P_{i0} & P_{i1} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n0} & P_{n1} & \dots & P_{nj} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad 3.2$$

Chaque ligne de la matrice correspond à un état entrant (présent) et chaque colonne à un état sortant (futur). Il est possible de noter certaines propriétés pour une telle matrice et sur les chaînes de Markov en général.

- Une probabilité ne peut être négative, d'où $P_{ij} \geq 0 \forall i, j$.
- La transition doit se faire dans un état quelconque, d'où $\sum_{j=0}^{\infty} (P_{ij}) = 1$.
- Le nombre d'états est fini et normalement défini à partir de 0 ou 1.
 - $i, j = 0, 1, 2, \dots$

Chaque passage par la matrice de transition représente un événement aléatoire en soit. Dans une situation d'événements discrets, comme c'est le cas avec les chaînes de Markov, les événements sont quantifiés selon leur ordre d'exécution. Or, si ces événements aléatoires sont reproduits à une fréquence constante, il est possible de caractériser les résultats en fonction du temps. C'est cette technique qui est utilisée pour anticiper la dégradation d'une structure routière. L'événement aléatoire peut alors représenter l'inspection d'une structure puisque c'est seulement à ce moment qu'il est possible de voir la détérioration depuis la dernière inspection. Le choix de la fréquence de détérioration (soit le moment où la détérioration est constatée) devient donc essentiel pour bien anticiper la dégradation.

Il est aussi possible de souligner certaines propriétés pour les états d'un processus markovien. Si un processus atteint un état duquel il ne peut sortir, il s'agit d'un état absorbant. Cet état aura une

probabilité de 1 sur la diagonale de la matrice de transition. Dans l'étude de la dégradation d'un pont où les réfections ne sont pas considérées, le pire état est normalement absorbant. En effet, une fois le pire état atteint, il est impossible de sortir de cet état puisqu'il est impossible de ne se détériorer davantage ni d'améliorer l'état avec le temps, à moins de réparer la structure. Un état j est aussi considéré accessible à partir d'un autre état i si la probabilité de transition entre ces deux états n'est pas nulle, et ce, peu importe le nombre de répétitions nécessaires. Si l'inverse est aussi vrai (i accessible de l'état j), les deux états sont communicants et la notation $i \leftrightarrow j$ est alors utilisée. Deux états seraient communicants pour la détérioration d'une structure si la réfection était possible. Par exemple, une structure neuve passerait à légèrement dégradé par sa détérioration normale et la structure légèrement dégradé passerait à l'état neuf par une réparation complète. La littérature fait référence à plusieurs autres propriétés des états, mais celles-ci ne sont pas pertinentes dans le cadre de ce projet (Meyn et Tweedie 2012, Ross 2014).

3.2 Méthode d'inspection au MTMDET

Chaque organisation responsable de la gestion des structures utilise son propre système pour inspecter et catégoriser l'état de ses ouvrages et, ainsi assigner les inspections en conséquence. Au Québec, le MTMDET a développé son propre système d'inspection qui évolue au fil du temps. La présente section présentera donc les deux derniers systèmes utilisés par le Ministère. L'étude se limite aux inspections générales puisqu'elles sont plus complètes et elles permettent donc un meilleur suivi de la structure. Les inspections générales sont définies par le MTQ (2012) comme un examen systématique « doigt sur la pièce » de tous les éléments d'une structure dans le but d'en détecter les défauts, d'en déterminer l'importance et d'évaluer leur incidence sur la capacité, la stabilité et la vie utile de la structure ainsi que sur le confort et la sécurité des usagers. Deux modèles de gestion sont présentés dans ce chapitre, soit le modèle du Ministère utilisé jusqu'à 2008 (SGS-5016) et le nouveau modèle utilisé depuis (GSQ-6026).

3.2.1 Modèle de gestion SGS-5016 (1996 - 2008)

Selon ce modèle de gestion, le suivi de l'état des structures se fait à deux niveaux. Dans un premier temps, un inspecteur est dépêché selon une certaine fréquence pour évaluer l'état de chacun des éléments d'une structure et leur attribuer un indice selon l'état du matériau qui compose l'élément et l'état du comportement de cet élément. Dans un deuxième temps, ces données sont entrées dans

un logiciel interne, le logiciel SGS-5016, qui va alors associer des indices globaux à la structure et ses composantes principales.

3.2.1.1 Fréquence d'inspection

La fréquence d'inspection générale d'une structure varie entre 2 et 6 ans selon le type de structure, l'âge virtuel de la structure et l'indice d'état de la structure (IES). Ce dernier indice est un paramètre calculé par le logiciel interne du Ministère, soit le SGS-5016, et sera donc présenté ultérieurement, à la section 3.2.1.5.

Le Tableau 3.1 présente la fréquence d'inspection prescrite pour différents types de structures, en fonction de l'âge virtuel et de l'indice d'état de la structure. Les différents types de structures et leur correspondance utilisée par le Ministère sont présentés à l'annexe A.1.

Tableau 3.1 – Fréquence d'inspection en années selon le type de structure (MTQ 2004)

TYPES DE STRUCTURES : 11, 13, 14, 19, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 41, 42, 43, 47, 48, 52 et 97							
IES	ÂGE (virtuel)						
	0 à 19	20 à 29	30 à 39	40 à 49	50 à 59	60 à 69	70 et +
< 50	3	3	3	3	2	2	2
50 à 69	4	4	4	3	3	3	3
70 à 89	5	5	5	4	4	3	3
90 et +	6	6	6	5	4	3	3
TYPES DE STRUCTURES : 15, 16, 17, 18, 20, 38, 39, 44, 45, 46, 49, 50, 51, 56, 57, 58, 71, 73, 75 et 85							
IES	ÂGE (virtuel)						
	0 à 19	20 à 29	30 à 39	40 à 49	50 à 59	60 à 69	70 et +
< 50	3	3	3	3	2	2	2
50 à 69	4	4	4	3	3	3	3
70 à 89	4	4	4	4	3	3	3
90 et +	5	5	5	4	4	3	3

Tableau 3.1 – Fréquence d’inspection en années selon le type de structure (MTQ 2004) (suite)

TYPES DE STRUCTURES : 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 72, 74, 76, 81, et 82							
IES	ÂGE (virtuel)						
	0 à 19	20 à 29	30 à 39	40 à 49	50 à 59	60 à 69	70 et +
< 50	2	2	2	2	2	2	2
50 à 69	3	3	3	2	2	2	2
70 à 89	3	3	3	3	2	2	2
90 et +	4	4	4	3	3	2	2

L’âge virtuel d’une structure se calcule selon l’équation 3.3, où K_a représente le facteur d’affichage de la structure obtenu selon l’équation 3.4 et K_c représente le facteur de circulation obtenu selon l’équation 3.5.

$$\hat{A}ge\ virtuel = K_a \times K_c \times \hat{A}ge\ réel \quad 3.3$$

$$K_a = \max[1; 1,59 - 0,59 \times F] \quad 3.4$$

$$K_c = \max[1; 0,25 \log(DJMA) + 0,25] \quad 3.5$$

Dans l’équation 3.4, le terme F représente le facteur de capacité de surcharge lors de l’évaluation de la capacité portante de la structure. Il se calcule selon le chapitre 14 de la norme CAN/CSA-S6-00 pour ce modèle de gestion (MTQ 2005). Dans l’équation 3.5, le $DJMA$ est le débit journalier moyen annuel du pont.

3.2.1.2 Cote d’évaluation du matériau (CEM)

La cote d’évaluation du matériau permet d’évaluer l’état du matériau pour chacun des éléments composant la structure. Cette cote varie de 6 pour les éléments pratiquement neufs, jusqu’à 1 pour les éléments en très mauvais état. Cette cote est fonction de l’importance de l’élément. En effet, les éléments d’une structure sont classés selon trois catégories, soit principal, secondaire ou accessoire. Cette classification pour tous les éléments d’une structure est présentée à l’annexe A.2. La cote d’un élément en fonction de l’étendue et de la gravité de l’endommagement s’obtient à l’aide du diagramme de la Figure 3.1.

Évaluation de la condition du matériau

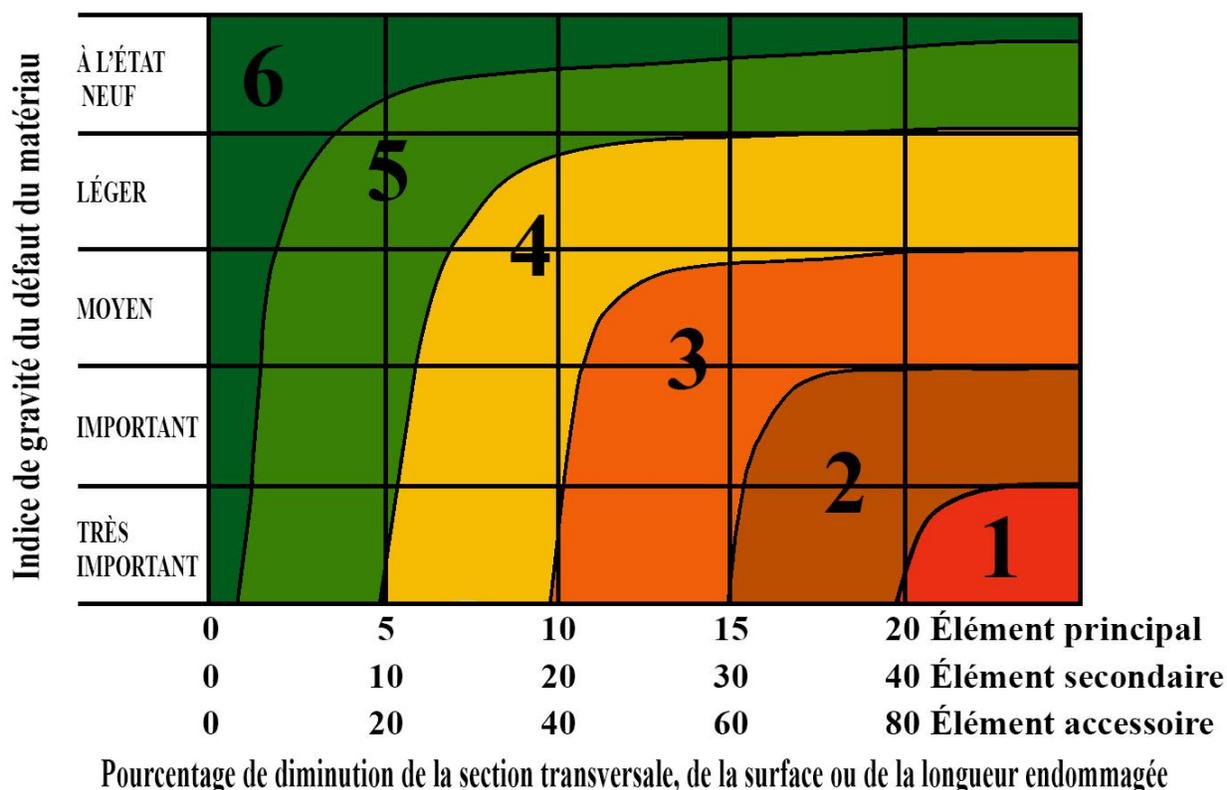


Figure 3.1 – Évaluation de la condition du matériau (MTQ 2004)

Il est à noter que la cote 9 désigne un élément qui n'a pu être inspecté lors de l'inspection générale principalement pour des raisons physiques.

3.2.1.3 Cote d'évaluation du comportement (CEC)

La cote d'évaluation du comportement fait quant à elle référence à la capacité d'un élément à remplir ses fonctions sur la structure. Ce critère considère donc la stabilité et la capacité des éléments et donc indirectement la sécurité des usagers.

La cote d'évaluation du comportement varie de l'état 6 à 1. Encore une fois, les critères d'évaluation sont plus sévères pour un élément principal que secondaire. La cote de comportement d'un élément en fonction du pourcentage de diminution d'aptitude de l'élément et du niveau d'importance de l'élément est présentée au Tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Évaluation du comportement des éléments (MTQ 2004)

ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DES ÉLÉMENTS				
Comportement		Pourcentage de diminution de l'aptitude d'un élément à jouer son rôle		
Cote	Désignation	Élément principal	Élément secondaire	Élément accessoire
6	Excellent	0 à 1%	0 à 2%	0 à 5%
5	Bon	1 à 5%	2 à 10%	5 à 20%
4	Acceptable	5 à 10%	10 à 20%	20 à 40%
3	Médiocre	10 à 15%	20 à 30%	40 à 60%
2	Déficient	15 à 20%	30 à 40%	60 à 80%
1	Critique	> 20%	> 40%	> 80%

Encore une fois, la cote 9 est utilisée pour un élément qui n'a pu être inspecté.

3.2.1.4 Indice fonctionnel de la structure (IFS)

L'indice fonctionnel de la structure évalue l'écart pour chaque fonction du pont par rapport à ce qu'elle devrait être pour répondre aux besoins des usagers (MTQ 2000). Cet écart est quantifié en termes de *points de démerite* pour chaque fonction et additionnés pour la structure globale. Un pont fermé à la circulation aurait un indice fonctionnel nul. L'indice fonctionnel de la structure se trouve mathématiquement à l'aide de l'équation 3.6.

$$IFS = 100 - \left[F_d \times I_{CA} \times D_{CA} + F_d \times I_{AF} \times D_{AF} + \sum_i (I_i \times D_i) \right] \quad 3.6$$

L'indice i représente les différents paramètres étudiés, excluant la capacité calculée et l'affichage qui sont déjà pris en compte dans les termes précédents. Les valeurs D_i représentent les valeurs de base pour chaque fonction de la structure, elle représente donc le nombre maximal de *points de démerite* que peut perdre la structure pour cette fonction. La liste des paramètres étudiés et les valeurs de base pour chacun de ces paramètres sont présentées au Tableau 3.3.

Tableau 3.3 – Valeurs de base pour chaque paramètre du calcul de l'IFS (MTQ 2000)

PARAMÈTRE	VARIABLE	VALEUR DE BASE
Capacité calculée (CA)	D_{CA}	35
Affichage (AF)	D_{AF}	35
Volume du trafic (TR)	D_{TR}	25
Conditions d'approche (AP)	D_{AP}	5
Dégagement horizontal inférieur (DH)	D_{DH}	5
Dégagement vertical inférieur (DVI)	D_{DVI}	15
Dégagement vertical supérieur (DVS)	D_{DVS}	15
Largeur de la voie carrossable (VC)	D_{VC}	15
Comportement hydraulique (H)	D_H	5
Présence de trottoirs (T)	D_T	5
Présence de pistes cyclables (PC)	D_{PC}	5

Ces valeurs de base sont pondérées par un indice d'inadéquation (I_i) qui représente l'importance du défaut pour chaque catégorie. Dans tous les cas, cet indice varie entre 0,0 et 1,0.

Pour la capacité calculée, l'indice (I_{CA}) est basé sur la différence entre la capacité calculée et les capacités souhaitables et minimales souhaitables. Si la capacité est inférieure à la capacité minimale souhaitable, l'indice est égal à 1,0. Si la capacité est égale à la capacité minimale souhaitable, l'indice est égal à 0,5 et si la capacité est supérieure ou égale à la capacité souhaitable, l'indice est égal à 0,0. Si la capacité se situe entre les valeurs souhaitables et minimales souhaitables, l'indice est inversement proportionnel à la capacité (MTQ 2000).

L'affichage sur place est comparé avec les valeurs de capacité souhaitable et de capacité souhaitable minimale. L'indice pour l'affichage (I_{AF}) est donc de 1,0 pour un affichage inférieur à la capacité minimale souhaitable, de 0,5 pour un affichage égal à la capacité minimale souhaitable et de 0,0 pour un affichage supérieur à la capacité souhaitable. L'indice est également inversement proportionnel à l'écart d'affichage dans le cas où l'affichage se situe entre la valeur de capacité minimale souhaitable et la valeur de capacité minimale.

L'indice pour le volume du trafic (I_{TR}) établit si le pont a la capacité de recevoir le débit journalier moyen annuel ($DJMA$). Une valeur de $DJMA$ maximal permissible pour la structure est donc calculée puis comparée avec le $DJMA$ du pont. Si le $DJMA$ du pont est inférieur au maximum

calculé, l'indice est de 0,0. Sinon, l'indice est directement proportionnel au *DJMA* du pont (MTQ 2000).

L'indice pour les approches du pont (I_{AP}) vérifie simplement si le pont est trop étroit par rapport à la route. Si le panneau D-200 est requis à l'entrée du pont, l'indice est de 1,0 et, dans le cas contraire, de 0,0. Le panneau D-200 est un panneau de signalisation indiquant un passage étroit. Il indique que la largeur de la chaussée d'un pont, d'un tunnel ou d'une voie cyclable est moindre qu'à leurs abords (MTMDET 2013).

L'indice pour le dégagement inférieur horizontal (I_{DH}) vérifie si les dégagements du pont, à gauche et à droite, sont suffisants par rapport aux normes. L'indice est de 0,0 si les dégagements sont supérieurs aux normes et augmente en fonction de l'écart entre les valeurs de dégagements nécessaires et les dégagements réels. Une protection latérale permet d'obtenir un indice de 0,0.

Les indices pour le dégagement vertical, tant inférieur (I_{DVI}) que supérieur (I_{DVS}), comparent la valeur des dégagements avec les valeurs recommandées et obligatoires. Dans chacun des cas, si le dégagement est supérieur ou égal à la valeur recommandée, l'indice est de 0,0. Si le dégagement est inférieur à la valeur obligatoire, l'indice est de 1,0. Si le dégagement se retrouve entre la valeur recommandée et obligatoire, l'indice est inversement proportionnel au dégagement mesuré.

L'indice pour la largeur de voie carrossable (I_{VC}) se base sur la comparaison entre la largeur de voie carrossable et les valeurs recommandées et minimales souhaitables. L'indice est donc de 1,0 pour une largeur inférieure à la valeur minimale souhaitable, de 0,5 pour une largeur égale à la valeur minimale souhaitable et de 0,0 pour une largeur supérieure à la valeur recommandée. L'indice est également inversement proportionnel à l'écart de largeur de voie carrossable dans le cas où cette largeur se situe entre la valeur minimale souhaitable et la valeur recommandée.

L'indice pour le comportement hydraulique (I_H) dépend de la vulnérabilité du pont face aux trois problèmes hydrauliques suivants : l'affouillement, les embâcles et les inondations. L'indice est de 1,0 si le pont peut être (prédisposé) affecté par deux des trois problèmes, de 0,5 s'il peut être affecté par un seul des problèmes et de 0,0 si aucun des problèmes ne menace le pont.

L'indice pour la présence de trottoir (I_T) est égal à 1,0 si un trottoir est requis, mais qu'il est inexistant (sauf pour les routes d'accès aux ressources). L'indice est égal à 0,0 dans tous les autres

cas, sauf pour les autoroutes lorsqu'un trottoir n'est pas requis, mais qu'il est existant où l'indice est égal à 1,0 (MTQ 2000). L'indice pour la présence de pistes cyclables (I_{PC}) se calcule exactement de la même façon que pour l'indice de la présence de trottoir et dépend donc simplement de la présence de la piste cyclable si celle-ci est requise ou non.

Des renseignements complémentaires sur le calcul général des indices et pour le calcul des valeurs recommandées et minimales sont présentés à l'annexe A.3.

De plus, dans le cas de la capacité calculée et de l'affichage en place, les valeurs de base sont pondérées par le facteur d'importance du détour (F_d). Ce facteur considère le nombre de véhicules lourds qui sont affectés par un détour pour éviter le pont et la longueur du détour. Ce facteur est donc directement proportionnel au débit journalier moyen annuel ($DJMA$) multiplié au pourcentage de véhicules lourds (c) et à la longueur du détour (L). Sa valeur est supérieure ou égale à 1,0. Le calcul est présenté à l'équation 3.7.

$$F_d = \left[1,0 + \frac{0,5 \times cL}{cL + 250} \right] \quad 3.7$$

3.2.1.5 Indice d'état d'une structure (IES)

L'indice d'état permet de déterminer la condition de la structure globale en fonction de la condition de ses éléments. Tous les éléments sont regroupés selon quatre catégories : les éléments de fondations (**F**), les systèmes structuraux (**S**), le platelage (**P**) et les éléments secondaires et accessoires (**ES**). À l'aide des données de l'inspection, un indice représentant le niveau de dégradation est calculé pour chacune des trois catégories d'éléments principaux. Cet indice multiplié par une valeur de base permet d'obtenir un nombre de *points de démerite* obtenus pour cette catégorie. Il faut finalement ajouter les *points de démerite* associés aux éléments secondaires et accessoires pour obtenir le nombre de *points de démerite* totaux. Afin d'obtenir un indice d'état en termes de pourcentage de l'état de la structure, ces points sont soustraits de l'indice d'une structure neuve, soit 100. Ce calcul est effectué au moyen de l'équation 3.8.

$$IES = 100 - (I_F \times D_F + I_S \times D_S + I_P \times D_P) - P_{ES} \quad 3.8$$

Les termes D_i représentent les valeurs de base pour les trois catégories d'éléments principaux. Ces valeurs de base permettent de pondérer chacun des groupes structuraux en fonction de leur importance sur la structure. Ces valeurs de base pour les différents types de ponts sont présentées au Tableau 3.4.

Tableau 3.4 – Valeurs de base pour chaque catégorie structurale en fonction du type de pont (MTQ 2000)

TYPE DE STRUCTURE	VALEURS DE BASE		
	D_F	D_S	D_P
11, 13, 14, 15, 17, 19, 19, 20	50	25	n/a
31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 39, 75B	35	35	5
> 39 et < 97 (excluant le type 75B)	25	25	25
97	50	40	n/a

Le calcul des points de démerite pour les éléments secondaires et accessoires se fait encore une fois en fonction d'indice d'état pour les différentes catégories d'éléments et de valeurs de base. Ce calcul est effectué au moyen de l'équation 3.9.

$$P_{ES} = I_{RV} \times D_{RV} + I_{SR} \times D_{SR} + I_{JT} \times D_{JT} + I_{SC} \times D_{SC} + I_{AU} \times D_{AU} \quad 3.9$$

Les valeurs en indice représentent le revêtement (**RV**), la surface de roulement (**SR**), les joints de tablier (**JT**), les éléments relatifs à la sécurité (**SC**) et les autres éléments (**AU**). Les valeurs de base pour ces cinq catégories en fonction du type de pont sont présentées au Tableau 3.5.

Tableau 3.5 – Valeurs de base pour éléments secondaires et accessoires en fonction du type de pont (MTQ 2000)

TYPE DE STRUCTURE	VALEURS DE BASE				
	D_{RV}	D_{SR}	D_{JT}	D_{SC}	D_{AU}
11, 14, 15, 17, 18, 19, 20	n/a	n/a	n/a	n/a	25
13	5	n/a	n/a	15	15
31, 32, 33, 34, 38, 39, 41, 42, 43, 50, 52, 56, 57	5	15	15	15	15
35, 36, 37, 46, 47, 48	5	15	n/a	15	15
44, 51, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 71, 72, 73, 74, 75A, 75B, 76, 81, 82	15	15	15	15	15
45, 49, 67	15	15	n/a	15	15
97	5	n/a	n/a	n/a	25

Finalement, le calcul des indices tant pour les catégories d'éléments principaux que pour les catégories d'éléments secondaires et accessoires se fait à l'aide de l'équation 3.10.

$$I_i = \frac{6 - C_i}{5} \quad \mathbf{3.10}$$

Ici, le terme C_i représente la cote du groupe d'éléments i . Le calcul de cette cote est plutôt complexe puisqu'il faut considérer la cote minimale entre la cote de comportement et la cote de matériau pour chaque élément d'un groupe, puis les additionner en fonction d'un facteur de pondération propre à chaque type de structure et à chaque groupe d'éléments. Le calcul du terme C_i est présenté à l'annexe A.4 avec un exemple de calcul. Le terme C_i peut prendre une valeur entre 6 et 1, tout comme les cotes de comportement et de matériau. L'indice I_i prend donc une valeur se situant entre 0,0 et 1,0.

3.2.1.6 Indice de vulnérabilité sismique (IVS)

L'indice de vulnérabilité sismique permet d'établir le risque sismique associé à la structure. Cet indice se calcule à l'aide de l'équation 3.11.

$$IVS = 100 - \left[RS \times FF \times \sum_{i=1}^8 (F_i \times C_i) \right] \quad \mathbf{3.11}$$

Le terme RS représente le facteur de risque sismique. Il dépend principalement de la situation géographique de l'ouvrage et de la probabilité sismique qui lui y associée. La localisation de l'ouvrage est normalisée en fonction des centres de service du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. La valeur de l'indice varie entre 1,0 pour les zones à faible risque et 5,0 pour les zones à risque maximal.

Le terme FF représente le facteur de fondation. Il dépend uniquement de la nature du sol des fondations. Ce facteur varie de 1,0 pour le roc à 2,0 pour un sol liquéfiable.

Les termes C_i représentent des coefficients d'influence sismique. Le terme C_1 représente le type de pont et varie de 0,0 pour des ponceaux ou des ponts acier-bois à 10,0 pour des structures plus massives comme des ponts à poutres en béton armé. Le terme C_2 représente la complexité du comportement structural de la structure. Ce coefficient varie de 0,0 pour des structures standards

ou 10,0 pour les ponts d'échangeur et d'autoroutes surélevées. Le terme C_3 représente le nombre de discontinuités dans la superstructure. Il peut prendre la valeur de 0,0 pour les structures à moins de trois discontinuités à 10,0 pour les structures de plus de quatre discontinuités (MTQ 2000). Le terme C_4 considère le type de supports verticaux. Il varie de 0,0 pour les structures à travée unique jusqu'à 10,0 pour les structures ayant des piles à plusieurs colonnes sans chevêtre. Le terme C_5 considère le type d'appareil d'appui. Il varie de 0,0 pour les structures sans appareils d'appui à 10,0 pour les structures à appareils d'appui à pendule. Le terme C_6 tient compte du biais du pont et varie proportionnellement de 0,0 à 10,0 (MTQ 2000). Le terme C_7 est lié au nombre de poutres. Il varie de 0,0 pour les structures à plus de trois poutres ou les ponts à dalle épaisse à 10,0 pour les structures à une poutre. Finalement, le terme C_8 tient compte de la présence de services publics sur la structure. Une valeur de 0,0 est attribuée lorsqu'il n'y a pas de services publics sur la structure jusqu'à un maximum de 10,0 lorsque des services sont présents. Pour chacun des coefficients précédents, un facteur de pondération (F_i) est attribué. Ces facteurs sont présentés au Tableau 3.6.

Tableau 3.6 – Facteurs de pondération pour les coefficients sismiques (MTQ 2000)

VARIABLE	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8
FACTEUR DE PONDÉRATION	0,22	0,22	0,15	0,13	0,07	0,02	0,07	0,12

3.2.1.7 Indice combiné d'une structure (ICOS)

L'indice combiné de la structure permet de tenir compte des trois indices précédents et d'ainsi attribuer une cote globale à la structure. L'équation 3.12 permet de calculer cet indice global.

$$ICOS = 0,65 \times IFS + 0,30 \times IES + 0,05 \times IVS \quad 3.12$$

L'emphase dans le calcul de cet indice est mise sur la fonctionnalité de l'ouvrage, alors que l'état sert davantage en termes de pérennité de la structure en fonction des investissements à y apporter. Cet indice est utilisé pour établir les stratégies d'intervention. En-deçà d'un seuil critique, seules les interventions urgentes sont effectuées, puisqu'il devient plus avantageux de simplement reconstruire la structure plutôt que de tenter une réfection. Il s'agit donc d'un outil pour le décideur afin de l'aider à choisir ses priorités d'intervention sur l'ensemble du réseau routier.

3.2.2 Modèle de gestion GSQ-6026 (2008-aujourd'hui)

Selon ce modèle de gestion, le suivi de l'état des structures se fait toujours à deux niveaux. Dans un premier temps, un inspecteur est dépêché selon une certaine fréquence pour évaluer l'état de chacun des éléments d'une structure et leur attribuer un indice selon l'état du matériau qui compose l'élément et l'état du comportement de cet élément. Dans un deuxième temps, ces données sont recueillies par un logiciel interne, le logiciel GSQ-6026, qui va alors associer des indices globaux à la structure et ses composantes principales. Ce logiciel étant présentement en utilisation, certains renseignements concernant les méthodes d'évaluation exactes des indices ne sont pas d'ordre publics et ne seront pas présentés dans ce mémoire.

3.2.2.1 Fréquence d'inspection

La fréquence d'inspection générale d'une structure varie entre 2 et 4 ans selon le type de structure, l'âge virtuel de la structure et le minimum entre l'indice de matériau de la structure (IMS) et l'indice de comportement de la structure. (ICS). Ces derniers indices sont des paramètres calculés par le logiciel interne du Ministère, soit le GSQ-6026, et seront présentés ultérieurement, respectivement aux sections 3.2.2.4 et 3.2.2.5.

Les fréquences d'inspection prescrites pour différents types de structures, en fonction de l'âge virtuel et des indices d'états de la structure, sont présentées au Tableau 3.7. Les différents types de structures et leur correspondance utilisée par le Ministère sont présentés à l'annexe A.1.

Tableau 3.7 – Fréquence d'inspection en années selon le type de structure (MTQ 2012)

TYPES DE STRUCTURES : 11, 13, 14, 19, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 41, 42, 43, 47, 48, 52 et 97							
IMS ou ICS (plus petite valeur)	ÂGE (virtuel)						
	0 à 19	20 à 29	30 à 39	40 à 49	50 à 59	60 à 69	70 et +
< 50	3	3	3	3	2	2	2
50 à 69	4	4	3	3	3	3	2
70 à 89	4	4	4	3	3	3	3
90 et +	4	4	4	4	4	3	3

Tableau 3.7 – Fréquence d’inspection en années selon le type de structure (MTQ 2012) (suite)

TYPES DE STRUCTURES : 15, 16, 17, 18, 20, 38, 39, 44, 45, 46, 49, 50, 51, 56, 57, 58, 71, 73, 75 et 85							
IMS ou ICS (plus petite valeur)	ÂGE (virtuel)						
	0 à 19	20 à 29	30 à 39	40 à 49	50 à 59	60 à 69	70 et +
< 50	2	2	2	2	2	2	2
50 à 69	3	3	3	2	2	2	2
70 à 89	3	3	3	3	2	2	2
90 et +	4	4	4	3	3	2	2
TYPES DE STRUCTURES : 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 72, 74, 76, 81, et 82							
IMS ou ICS (plus petite valeur)	ÂGE (virtuel)						
	0 à 19	20 à 29	30 à 39	40 à 49	50 à 59	60 à 69	70 et +
< 50	2	2	2	2	2	2	2
50 à 69	3	2	2	2	2	2	2
70 à 89	3	3	2	2	2	2	2
90 et +	4	3	3	2	2	2	2

L’âge virtuel d’une structure se calcule selon l’équation 3.13, où K_a représente le facteur d’affichage de la structure obtenu selon l’équation 3.14 et K_c représente le facteur de circulation obtenu selon l’équation 3.15.

$$\hat{A}ge\ virtuel = K_a \times K_c \times \hat{A}ge\ r\acute{e}el \quad 3.13$$

$$K_a = \max[1; 1,59 - 0,59 \times F] \quad 3.14$$

$$K_c = \max[1; 0,25 \log(DJMA) + 0,25] \quad 3.15$$

Dans l’équation 3.14, le terme F représente le facteur de capacité en surcharge lors de l’évaluation de la capacité portante de la structure. Ce facteur est calculé à partir du chapitre 14 de la norme CAN/CSA-S6 en vigueur. Dans l’équation 3.15, le $DJMA$ est le débit journalier moyen annuel du pont.

3.2.2.2 Évaluation de l’état du matériau d’un élément

L’évaluation de l’état du matériau permet d’identifier les défauts du matériau d’un élément. L’élément est étudié de façon à établir son état de détérioration selon quatre niveaux de sévérité :

neuf à léger, moyen, important et très important. Ces degrés de sévérité sont associés à une cote (A, B, C, D), telle que présentée au Tableau 3.8.

Tableau 3.8 – Lien entre les degrés de sévérité et l'état du matériau (MTQ 2012)

État du matériau	A	B	C	D
Degré de sévérité	Aucun à léger	Moyen	Important	Très important

Pour chaque élément, une fraction de sa longueur, surface ou volume, en pourcentage est donc attribuée à chaque catégorie. Ce pourcentage représente la proportion de l'élément qui se trouve dans ce degré de dégradation, indépendamment de la nature du ou des défauts. La somme des quatre pourcentages doit toujours être de 100%, indiquant que la totalité de l'élément a été évaluée.

3.2.2.3 Cote d'évaluation du comportement (CEC)

L'évaluation du comportement d'un élément consiste à déterminer l'aptitude de l'élément à jouer son rôle dans la structure. Cette évaluation permet d'établir si les défauts des éléments ont une incidence sur la stabilité d'une structure ou sur sa capacité portante. Le comportement de l'élément est évalué à l'aide d'une cote qui varie de 4 à 1. La cote 4 représente un élément dont les défauts n'ont aucune ou une très légère incidence sur le comportement de l'élément et à l'opposé, la cote 1 représente un élément dont les défauts ont une incidence très importante sur son comportement.

Lors de cette évaluation, il faut prendre en compte l'importance de l'élément étudié. Les éléments sont classés en deux catégories : principaux et secondaires. La catégorie *accessoire* présente dans l'ancien modèle a été complètement retirée dans cette version. La répartition de chacun des éléments selon les deux catégories d'importance est présentée à l'annexe A.2. L'évaluation de la cote du comportement se fait à l'aide du Tableau 3.9.

Tableau 3.9 – Critères généraux d'évaluation du comportement des éléments (MTQ 2012)

ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DES ÉLÉMENTS		
Comportement	Diminution de l'aptitude d'un élément à jouer son rôle	
Cote CEC	Élément principal	Élément secondaire
4	0 à 10%	0 à 10%
3	10 à 20%	10 à 30%
2	20 à 30%	30 à 50%
1	> 30%	> 50%

Le pourcentage de diminution de l'aptitude d'un élément à jouer son rôle n'est pas une donnée facilement mesurable par l'inspecteur. Il s'agit donc davantage d'une appréciation de l'inspecteur que d'une donnée objective. Dans le cas où plusieurs éléments sont regroupés, il faut attribuer à l'ensemble du groupe la cote la plus faible attribuée individuellement parmi les éléments du groupe.

3.2.2.4 Indice de matériau de la structure (IMS)

L'indice de matériau de la structure tient compte de l'évaluation de l'état du matériau de chacun des éléments afin d'attribuer un pourcentage résiduel à la structure. Le pourcentage résiduel (ou valeur résiduelle) représente la partie encore en bon état de la structure. Ces valeurs sont fournies par le MTMDET et seront utilisées pour apprécier la détérioration des éléments. Pour chacun des éléments évalués lors de l'inspection, une note globale résiduelle est calculée en fonction de la répartition. Ainsi, le pourcentage résiduel renseigne sur la proportion de l'élément à réparer. La portion à réparer est considérée comme la partie dépréciée de l'élément qui doit être remise à neuf. Les pourcentages de matériaux résiduels selon les états sont présentés au Tableau 3.10.

Tableau 3.10 - Pourcentage résiduel d'une partie d'élément en fonction de son état (MTQ 2015)

État du matériau	A	B	C	D
Pourcentage résiduel	100%	30%	15%	0

Un coût résiduel et initial est établi pour tous les éléments en fonction du pourcentage résiduel calculé, la taille et le matériau des éléments. Le MTMDET se basent sur des données internes afin d'établir ces coûts par unité pour chaque élément. Les unités de mesure pour chaque élément sont présentées à l'annexe A.5. L'indice de matériau de la structure représente donc un pourcentage résiduel de la structure basé sur les coûts de remplacement et sur certaines modulations. Ainsi, l'indice de matériau correspond au pourcentage de la structure encore en bon état selon les cotes de matériaux obtenues lors de l'inspection générale et le pourcentage résiduel associé à chaque cote.

3.2.2.5 Indice de comportement de la structure (ICS)

L'indice de comportement de la structure permet de déterminer son niveau de sécurité. Il permet de mesurer l'impact des défauts sur la stabilité et la capacité de l'ouvrage. Son calcul se base sur les cotes d'évaluation du comportement des éléments établies lors de l'inspection générale.

Pour ce calcul, il faut prendre en compte la notion d'élément secondaire et principal présenté à l'annexe A.2. Par contre, pour cet indice, certains éléments secondaires sont considérés principaux s'ils sont fortement liés au fonctionnement d'un élément principal. Les éléments principaux sont divisés en trois grandes catégories : les unités de fondation, les systèmes structuraux et le platelage. Pour leur part, les éléments secondaires sont divisés en cinq catégories : la protection de la corrosion, la surface de roulement, les joints de tablier, les éléments de sécurité et les autres éléments.

Le calcul se fait par travée et comporte cinq étapes successives :

i. Calcul de la CEC pour un groupe d'éléments (CEC_{GR})

La première étape du calcul consiste à calculer une cote de comportement pour un groupe d'éléments. La cote de comportement pour chaque groupe est obtenue selon les CEC des éléments attribuées lors de l'inspection générale. Chacune des cotes est pondérée selon l'importance de l'élément sur l'ensemble de la structure à partir de facteurs internes du MTMDET.

ii. Calcul de la CEC pour une catégorie (CEC_{CAT})

Une fois les cotes d'évaluation du comportement pour chacun des groupes obtenues, il faut trouver la cote pour chacune des trois catégories d'éléments principaux et les cinq catégories d'éléments secondaires. Puisque les groupes présents sur une structure et leur importance varient en fonction du type de structure, une combinaison de groupe d'éléments est donnée pour chaque groupe d'éléments en fonction du type de structure.

iii. Calcul des indices d'inadéquation (I_{CAT}) pour chaque catégorie

L'indice d'inadéquation d'une catégorie (I_{CAT}) est une valeur comprise entre 0,0 et 1,0 qui sert à mesurer l'impact global des défauts des éléments faisant partie d'une catégorie donnée (MTQ 2015). Une valeur de 0,0 indique que chacun des éléments de la catégorie remplit parfaitement sa fonction; à l'opposé, une valeur de 1,0 relève la présence de déficiences importantes sur le comportement.

iv. Calcul des points d'indice perdus par catégorie

Le système de « points de démerite » s'applique encore une fois pour cet indice. Pour chaque type de structure, un nombre de points maximal est déterminé pour chacune des huit catégories. Le nombre de points totaux perdus pour une catégorie se trouve donc en fonction de ces nombres de points maximaux, des indices d'inadéquation et de la valeur à neuf des travées.

v. Calcul de l'indice de comportement de la structure (*ICS*)

Finalement, l'indice de comportement de la structure se calcule à l'aide de l'équation 3.16.

$$ICS = \max[0; 100 - P_{EP} - P_{ES}] \quad \mathbf{3.16}$$

Dans cette équation, P_{EP} est la somme des points perdus pour les catégories d'éléments principaux et P_{ES} est la somme des points perdus pour les catégories d'éléments secondaires. P_{ES} ne peut toutefois pas prendre une valeur supérieure à 25.

3.2.2.6 Indice de condition générale (ICG)

L'indice de condition générale est un indice utilisé pour présenter à la population l'état des structures du réseau. Cet indice de condition évalue l'ampleur des travaux à effectuer sur la structure. Sa valeur varie entre 100 pour une structure neuve ou sans travaux nécessaires et 0 pour une structure à reconstruire. Cet indice tient compte les indices de matériaux et les indices de comportement pour établir l'état général de la structure.

En fonction des données du plan de travail (travaux nécessaires) de la structure développé suite à l'inspection général, les coûts estimatifs de réparation de la structure sont comparés au coût initial de construction (valeur à neuf). Les besoins considérés sont les besoins en travaux pour la période 0-5 ans (à court terme) selon le plan de travail de niveau « A » (urgent).

Deux équations permettent de trouver la valeur de l'indice de condition générale. L'équation 3.17 est utilisée lorsque la structure n'est pas décrite comme déficiente selon ses états (matériaux) ou son comportement par sa fiche d'inventaire.

$$ICG = \max \left[75; 100 - 100 \times \left(\frac{Besoins}{Coût\ initial} \right) \right] \quad 3.17$$

Pour des structures décrites comme déficientes selon l'état (matériaux) ou le comportement par leur fiche d'inventaire l'équation 2.1 est utilisée.

$$ICG = 74 - \left[\frac{Besoins}{Coût\ initial} \right] * 100 \quad 3.18$$

3.2.3 Conciliation des deux systèmes

Afin de comparer les données d'inspection et de détérioration, et d'arriver à une étude crédible, il faut être capable d'analyser les tendances de détérioration sur une longue période. Pour ce faire, il faut être capable de suivre l'évolution de l'état d'une structure à partir de l'historique de ses inspections. Ainsi, il faut concilier les méthodes d'évaluation utilisées lors des inspections malgré le changement de système au MTMDET. C'est pourquoi cette section a pour but d'établir une relation entre les indices du système SGS-5016 (pré-2008) et du modèle actuel (GSQ-6026) du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports.

3.2.3.1 Évaluation de l'état des matériaux

Le modèle de classification pour le système SGS-5016 comporte une échelle à six niveaux selon l'indice de gravité des défauts et leur étendue. Le passage d'un niveau à un autre est délimité par une courbe. Pour le système GSQ-6026, les proportions de l'élément appartenant à chacun des quatre degrés de sévérité de détérioration est directement établie, ainsi, il n'y a pas d'échelle de classification à proprement dit. Pour concilier les deux approches, il faut avant tout clarifier les règles de classification.

La sévérité des défauts est seulement graduée selon cinq catégories : neuf, léger, moyen, important et très important. Les courbes séparant les différents états dans le système SGS-5016 peuvent être ambiguës puisqu'elles ne coupent pas verticalement les catégories de sévérité, laissant place à l'interprétation du pourcentage critique de la catégorie. Pour régler ce problème, un nouveau graphique a été créé, où les zones de séparations correspondent aux valeurs moyennes de la courbe entre deux catégories de sévérité. Sur la Figure 3.2, cette modification est présentée. De cette façon,

il est possible d'interpréter les résultats d'inspection afin de catégoriser les éléments selon les deux méthodes d'évaluation.

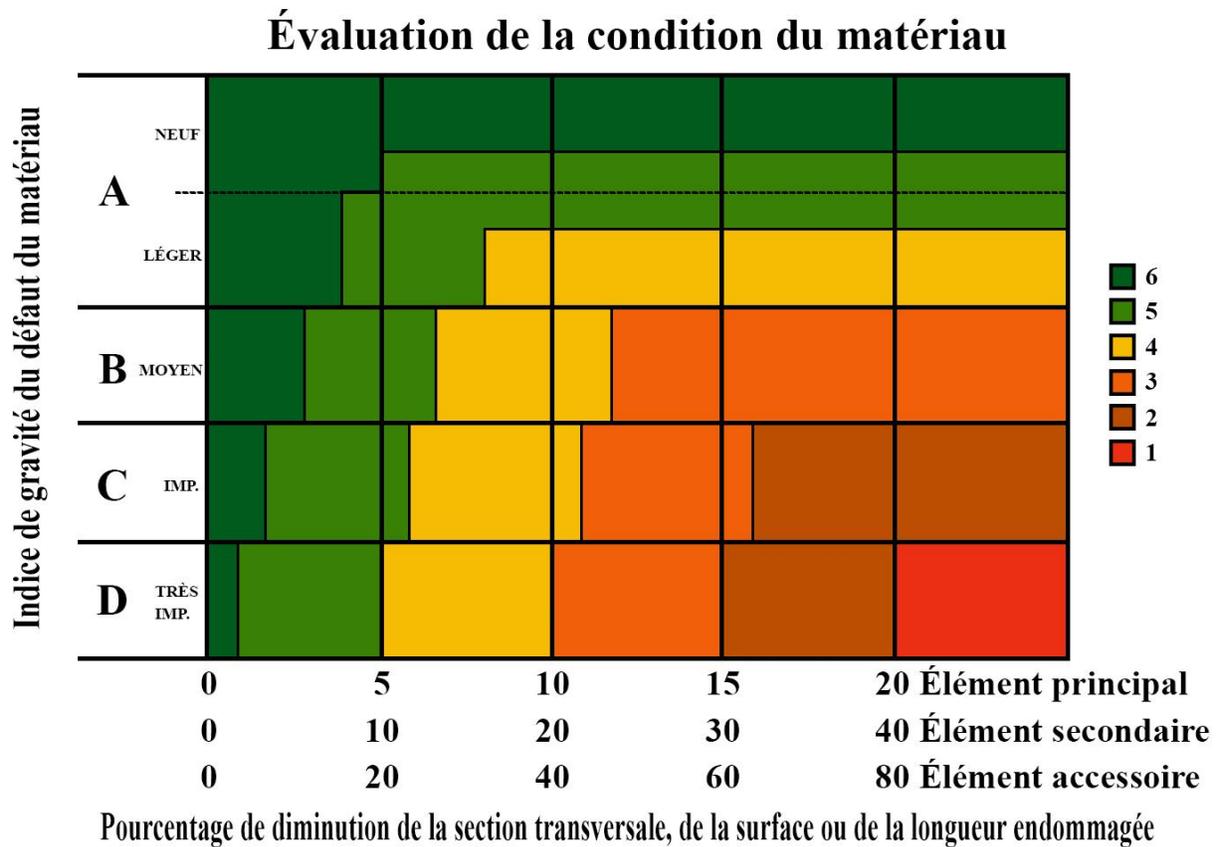


Figure 3.2 - Conciliation des modèles pour l'évaluation de l'état du matériau effectuée dans le cadre de cette étude

À l'aide du graphique, il est possible, à partir de n'importe quelle fiche d'inspection ou de cote de matériau, de convertir les données pour les deux systèmes. Dans le cas où seule la cote d'évaluation du matériau (6 à 1) est connue, le cas le plus critique possible sera considéré pour la conversion. Les répartitions d'indice de gravité considérées pour chaque cote d'évaluation sont présentées au Tableau 3.11. La partie de gauche correspond aux éléments principaux, alors que la partie de droite correspond aux éléments secondaires. Les éléments accessoires sont convertis comme s'ils étaient secondaires.

Tableau 3.11 - Répartition entre les degrés de sévérité de dommage à utiliser selon la cote d'évaluation du matériau.

	RÉPARTITION ÉLÉMENTS PRINCIPAUX					RÉPARTITION ÉLÉMENTS SECONDAIRES			
	A	B	C	D		A	B	C	D
6	94%	3%	2%	1%	6	88%	6%	4%	2%
5	82%	7%	6%	5%	5	65%	13%	12%	10%
4	67%	12%	11%	10%	4	34%	24%	22%	20%
3	0%	69%	16%	15%	3	0%	38%	32%	30%
2	0%	0%	80%	20%	2	0%	0%	60%	40%
1	0%	0%	0%	100%	1	0%	0%	0%	100%

3.2.3.2 Évaluation de l'état du comportement

Pour l'évaluation du comportement, les deux modèles de gestion se basent sur le pourcentage de réduction de capacité de l'élément à remplir sa fonction pour les catégoriser. Le seul problème est que les plages sont différentes et certaines hypothèses sont nécessaires pour faire la réconciliation des modèles. La transition du système SGS-5016 vers le système GSQ-6026 est présentée au Tableau 3.12. Lorsque que la cote du système SGS-5016 peut correspondre à plusieurs cotes du système GSQ-6026, il faut déterminer la cote de façon aléatoire. La probabilité d'obtenir chacune des cotes est alors inscrite dans le tableau.

Tableau 3.12 - Conversion des cotes de comportement du système SGS-5016 au système GSQ-6026

		ÉLÉMENTS PRINCIPAUX					
		Cote du système SGS-5016					
		6	5	4	3	2	1
Cote du système GSQ-6026	4	X	X	X			
	3				X	X	
	2						12,50%
	1						87,50%
		ÉLÉMENTS SECONDAIRES					
		Cote du système SGS-5016					
		6	5	4	3	2	1
Cote du système GSQ-6026	4	X	X				
	3			X	X		
	2					X	16,70%
	1						83,30%

		ÉLÉMENTS ACCESSOIRES					
		Cote du système SGS-5016					
		6	5	4	3	2	1
Cote du système GSQ-6026	4	X	33,33%				
	3		66,67%	50%			
	2			50%	50%		
	1				50%	X	X

3.2.3.3 Comparaison des indices et choix pour l'étude

Bien que les cotes puissent être utilisées pour anticiper la détérioration d'un élément, cela devient plus complexe lorsque c'est la structure complète qui est étudiée. Pour cette raison, il faut se pencher sur le choix d'un indice pour l'anticipation de la détérioration de la structure. Il est à noter qu'aucun lien direct entre les indices des deux systèmes n'est possible. Il faut alors convertir les données d'inspections, puis s'en servir pour recalculer les indices désirés. Selon cette méthode, il est possible de ne pas considérer d'emblée l'indice fonctionnel de la structure (*IFS*), l'indice de vulnérabilité sismique (*IVS*) et l'indice combiné de la structure (*ICOS*) puisque ceux-ci ne dépendent pas des données d'inspection sur les matériaux et le comportement.

L'indice d'état de la structure (*IES*) du système SGS-5016 est intéressant, puisqu'il se calcule avec les cotes de matériaux. Cependant, considérant que cet indice n'est plus utilisé dans le système actuel, il est peu utile de baser l'anticipation de la détérioration d'une structure sur celui-ci. L'étude d'une base de données moins récente serait la seule raison valable de se baser sur cet indice. En effet, il est plus efficace d'utiliser directement les cotes de matériaux et de s'en servir pour obtenir un indice utilisé dans le système actuel.

Pour le nouveau système (GSQ-6026), l'indice de condition générale (*ICG*) peut aussi être écarté, puisqu'il s'agit davantage d'un outil qualitatif et de relations publiques. Cet indice n'est pas suffisamment précis et parlant pour caractériser l'endommagement futur. Le choix devrait donc se faire selon l'indice de comportement de la structure (*ICS*) ou l'indice de matériau de la structure (*IMS*). Bien que les deux approches soient valables, la décision doit être prise en fonction des critères gouvernementaux d'intervention afin d'obtenir un outil utile pour le gestionnaire. Considérant les recommandations de la commission d'enquête sur l'effondrement d'une partie du viaduc de la Concorde de mettre l'accent sur l'endommagement des matériaux et de leur capacité structurale lors des inspections (CEVC 2007), l'évaluation de la structure sera effectuée à l'aide de l'*IMS*.

3.3 Modèles de détérioration théoriques

3.3.1 Modèles de détérioration existants développés par les gestionnaires de ponts

La variété des modèles existants s’explique en grande partie par le choix du modèle d’inspection du gestionnaire. En effet, chaque gestionnaire utilisant une procédure d’inspection et une catégorisation des dommages personnalisée, il devient difficile d’universaliser les modèles de détérioration. Voici quelques modèles proposés par des auteurs ou utilisés par des gestionnaires de structures à travers le monde.

Au Québec, Morcous et Akhnoukh (2006) se sont penchés sur la détérioration des tabliers de ponts en béton armé. Ce choix s’explique par la prédominance de ce type de structure (pont en béton armé) sur le réseau québécois. Cette étude utilisait le modèle de gestion SGS-5016 présenté à la section 3.2. Ainsi, à l’aide de valeurs d’IMS de 1993 à 200, une matrice de détérioration à 6 états et d’une période de 3 ans a été développée. La période de 3 ans signifie que la détérioration est constatée une fois aux 3 ans. Cette matrice de transition est présentée à l’équation 3.19. L’indice associé au nom de la matrice sert à rappeler la période de la matrice de transition.

$$[P_3] = \begin{bmatrix} 0,839 & 0,159 & 0,002 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,958 & 0,040 & 0,002 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,890 & 0,101 & 0,008 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,792 & 0,178 & 0,030 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,625 & 0,375 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{bmatrix} \quad 3.19$$

Pour analyser les modèles sous des valeurs comparables, il faut associer une valeur résiduelle pour chacun des états de cette matrice. Le Tableau 3.11 offre déjà un moyen de concilier le SGS-5016 au nouveau système d’inspection du MTMDET. Ainsi, pour un tablier de pont en béton armé, la valeur résiduelle moyenne pour chacun des états est présentée au Tableau 3.13.

Tableau 3.13 – Choix de valeur résiduelle d’une partie d’élément en fonction de son état selon le système SGS-5016 pour un élément principal

État du matériau	6	5	4	3	2	1
Pourcentage résiduel	97,6%	90,1%	78,6%	47,7%	17,6%	6%

Avec la réforme du système d'inspection en 2008 au ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, ce modèle de détérioration n'est plus applicable. Ainsi, avec le nouveau système de gestion, s'est aussi développé un nouveau modèle de détérioration. Une matrice de transition est développée pour chaque élément du pont. Il s'agit d'une matrice 4 par 4 et d'une période de 5 ans. Il faut noter que ces matrices de transition sont obtenues à l'aide de l'historique d'inspection des structures et de l'avis des experts. Ainsi, les cotes d'évaluation recueillies lors de chaque inspection successive permettent d'évaluer le temps de détérioration moyen d'un élément selon certains critères. Ces matrices se basent sur cette approche et représentent donc la détérioration moyenne pour un élément au Québec. Ainsi, un entretien régulier et des matériaux de base sont considérés dans cette matrice. Une étude pour déterminer l'impact de ces deux facteurs pourrait être effectuée de façon comparative. L'équation 3.20 présente cette matrice pour les dalles de ponts en béton armé et l'équation 3.21 présente la matrice pour les poutres en acier et en béton précontraint.

$$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,84 & 0,16 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,71 & 0,29 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,50 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad 3.20$$

$$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,91 & 0,09 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,87 & 0,13 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,71 & 0,29 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad 3.21$$

Pour ce système, il faut se rappeler les valeurs résiduelles présentées précédemment et réécrites au Tableau 3.14.

Tableau 3.14 - Valeur résiduelle d'une partie d'élément en fonction de son état (MTQ 2015)

État du matériau	A	B	C	D
Pourcentage résiduel	100%	30%	15%	0

Aux États-Unis, le système *AASHTOWareTM Bridge Management* utilise aussi des matrices de transition pour anticiper la détérioration. Sobanjo et Thompson (2011) se sont penchés sur le modèle utilisé par l'état de la Floride. La matrice de détérioration utilisée par le *Florida Department of Transportation* (FDOT) pour les dalles de pont en béton armé est présentée à l'équation 3.22.

$$[P_1] = \begin{bmatrix} 0,972 & 0,029 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,962 & 0,038 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,947 & 0,054 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,886 & 0,115 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,750 & 0,250 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{bmatrix} \quad 3.22$$

Le nombre d'états pour les éléments d'un pont varie de 4 à 6 pour ce système suivant le type d'éléments, en comptant le dernier état qui correspond à une défaillance totale de l'élément. Pour la dalle de pont en béton armé, 6 états sont possibles et la période de la matrice est d'un an. Il est cependant difficile d'établir des valeurs résiduelles comparatives à celles utilisées par le MTMDET. Or, Sobanjo et Thompson (2011) proposent deux approches de valeurs résiduelles, une approche linéaire et une approche pessimiste. Ces deux approches sont présentées au Tableau 3.15.

Tableau 3.15 - Valeur résiduelle pour un élément selon l'état du matériau selon le FDOT (Sobanjo et Thompson 2011)

État du matériau	1	2	3	4	5	6
Approche linéaire	100%	80%	60%	40%	20%	0%
Approche pessimiste	100%	70%	40%	20%	10%	0%

Pour ces trois modèles, il est à noter qu'il s'agit toujours de matrices de transition, mais il n'est pas possible de les qualifier de markoviennes puisqu'il s'agit d'une détérioration déterministe. Cela signifie que pour une condition initiale donnée, le résultat sera toujours le même après un période donnée. La partie stochastique est donc complètement retirée lors des simulations. Pour suivre la détérioration, il faut multiplier le vecteur de condition initiale $\overline{C}(0)$, qui comprend le pourcentage de l'élément dans chaque état, par la matrice de transition, comme le propose l'équation 3.23.

$$\overline{C}(t) = \overline{C}(0) \times [P_f]^{\frac{t}{f}} \quad 3.23$$

Pour appliquer cette équation, la période (fréquence) de la matrice (f) doit être un multiple de la valeur de temps voulue (t) afin que le quotient f/t donne un nombre entier.

Finalement, en ajoutant le vecteur de la valeur résiduelle selon les états, il est possible d'obtenir la valeur résiduelle de la dalle. Il s'agit donc d'un produit vectoriel entre le vecteur de répartition des états et le vecteur des valeurs résiduelles. Puisque la répartition des états selon une condition initiale

se calcule à l'aide d'un produit matriciel avec la matrice de transition, il est donc possible de résumer le calcul de la valeur résiduelle selon l'équation 3.24. Il faut noter que la valeur résiduelle est toujours donnée par rapport à la valeur à neuf, sous forme de pourcentage.

$$VR_t = \overline{C(0)} \times [P_f]^{t/f} \times \overline{VR} \quad 3.24$$

Avec ces trois modèles, il est possible de souligner les divergences et d'analyser l'impact de ces dernières. Les deux principales divergences sont la fréquence de la matrice et le nombre d'états. En ce qui a trait à la fréquence, il est bien évident qu'une fréquence plus courte permet plus de maniabilité dans l'étude. Il est en effet possible de transformer une matrice de période annuelle en pluriannuelle en la multipliant par elle-même le nombre de fois désiré. L'inverse (pluriannuelle en annuelle) est plus complexe et souvent impossible selon le nombre d'états et la distribution des probabilités. Le nombre d'états est aussi un paramètre important qui dépend uniquement du système d'inspection du gestionnaire. Il est certain qu'un nombre élevé d'états permet de mieux qualifier les dommages et d'avoir une meilleure idée de l'état de la structure. Cependant, il est aussi plus difficile d'avoir suffisamment de données d'inspection pour développer une matrice crédible.

Il est à noter qu'il existe d'autres modèles de détérioration utilisant des matrices de transition, mais il est peu utile de les étudier. En effet, les différences de modèles d'inspections rendent les comparaisons plutôt difficiles. Dans d'autres cas, la structure globale est considérée comme seul élément qui se détériore, soit à l'aide d'états de condition ou selon l'indice de fiabilité de la structure. Ces modèles sont peu pratiques, considérant la méthode d'évaluation du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports.

3.3.2 Analyse des modèles de détérioration existants

Afin de comparer les trois modèles présentés précédemment, l'évolution de valeur résiduelle dans le temps sera utilisée. Tant l'approche linéaire que pessimiste sera étudiée pour le modèle de la FDOT. Les courbes de détérioration pour une dalle de pont en béton armé selon le temps sont présentées à la Figure 3.3.

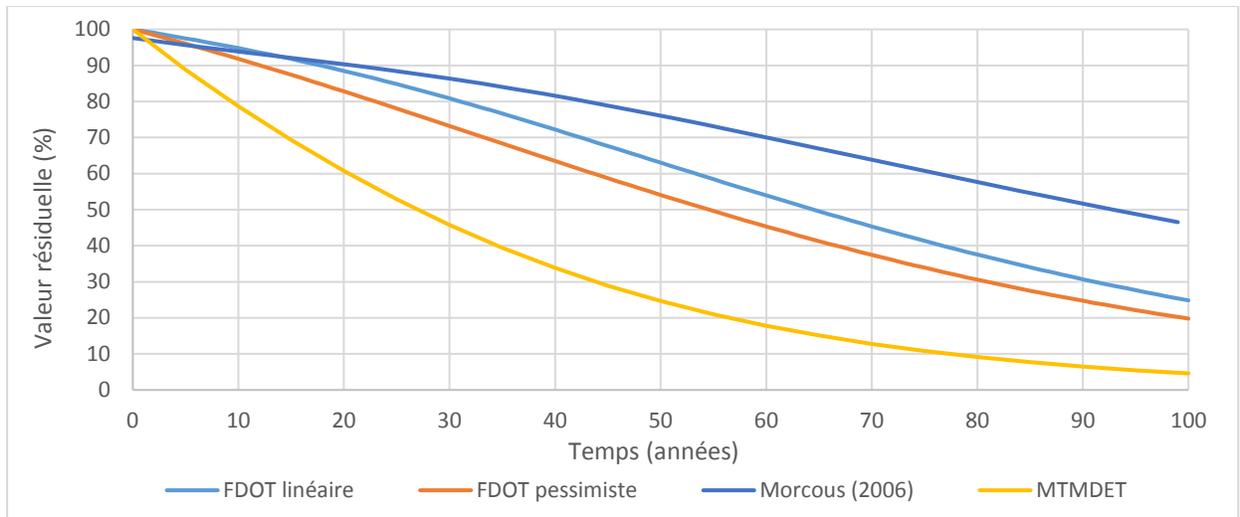


Figure 3.3 - Courbes de détérioration pour une dalle de pont en béton armé neuve selon différents modèles

Le modèle de détérioration proposée par Morcous et Akhnoukh (2006) est beaucoup moins critique. En effet, la détérioration complète moyenne aurait une durée de 150 ans ce qui semble excessif par rapport aux autres modèles. D'ailleurs, la détérioration devrait se rapprocher du modèle actuel du MTMDET considérant qu'ils sont basés sur les mêmes données d'inspection.

Le modèle du MTMDET est plus critique que les deux approches de la FDOT. Cela peut être expliqué par l'environnement plus agressif dans lequel les structures québécoises se trouvent par rapport aux conditions climatiques. De plus, il faut mentionner que la précision du modèle du MTMDET devrait être moindre que ceux de la FDOT en raison du nombre d'états inférieur et de la période plus élevée de la matrice de transition.

Malgré tout, ces courbes de dégradation permettent d'obtenir des renseignements importants sur la détérioration moyenne d'une dalle de pont en béton armé. La première propriété intéressante est le temps moyen de passage d'un état à l'autre. Il y a deux méthodes pour obtenir cette valeur. Si la matrice de transition a seulement une probabilité de maintien et une probabilité de détérioration d'un état à chaque ligne, il est possible d'utiliser l'équation 3.25.

$$T_i = \frac{f}{(1 - P_{ii})} \quad 3.25$$

Cette équation signifie que le temps moyen de transition dans l'état i représenté par la variable T_i se calcule en divisant la période de la matrice par la probabilité de sortir de cet état. Dans le cas où il y aurait des probabilités de dégradation dans plusieurs états pour une même ligne, il faut alors utiliser l'équation 3.26.

$$[T_i] = f \times ([I] - [P_f^*])^{-1} \quad 3.26$$

L'astérisque à la matrice de transition signifie qu'il faut remplacer la probabilité absorbante par 0, puisque le temps de transition dans l'état critique est infini pour ces cas. Le résultat est une matrice du temps moyen passé dans chacun des états selon l'état initial. Pour cette étude, c'est donc la première ligne de la matrice qu'il faut regarder. Ainsi, les temps de transition moyens pour les différents modèles sont au Tableau 3.16.

Tableau 3.16 - Temps de transition moyen pour chacun des états selon différents modèles

	6	5	4	3	2
Morcous et Akhnoukh (2006)	18,63 ans	70,54 ans	25,99 ans	13,30 ans	6,87 ans
	1	2	3	4	5
FDOT	35,71 ans	27,26 ans	19,54 ans	9,26 ans	4,26 ans
	A	B	C		
MTMDET	35,25 ans	17,24 ans	10,00 ans		

Le modèle du MTMDET est visiblement plus conservateur, le temps de transition moyen pour atteindre l'état D (détérioration complète) étant approximativement le même que celui de la FDOT pour atteindre le troisième état.

Comme il a été mentionné, l'utilisation de la matrice de détérioration pour prévoir la détérioration mène à plusieurs désavantages. De plus, le modèle utilisé présentement par le Ministère ne tient pas compte de la probabilité intrinsèque de la détérioration d'une structure. Pour cette raison, un nouveau modèle est proposé pour faire les simulations à long terme.

3.3.3 Proposition d'un nouveau modèle de détérioration

L'objectif du nouveau modèle de détérioration est d'obtenir une valeur résiduelle de l'élément qui varie de façon stochastique d'une simulation à l'autre. De plus, ce modèle pourra considérer

l'historique de l'élément lors de la simulation afin de modifier la vitesse de détérioration selon l'environnement et la qualité des matériaux.

Pour ce faire, la courbe de détérioration utilisée par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports sera utilisée comme courbe médiane initiale. Par exemple, pour une dalle en béton armé, la matrice de l'équation 3.20 est utilisée comme courbe médiane. Une courbe favorable et critique sera alors utilisée pour considérer les extrémums possibles. La valeur résiduelle possible à chaque temps prendra la forme d'une variable aléatoire entre les deux courbes critiques. Après chaque simulation, la courbe médiane est ajustée afin de mieux définir la détérioration en cours.

Ainsi, il faut déterminer les deux courbes critiques reliées à la variabilité de l'état d'une dalle. L'hypothèse d'une variabilité de 5% est utilisée dans le cadre de cette étude. Ainsi, le meilleur scénario suivrait la relation 3.27 qui définit une nouvelle matrice de transition alors que le pire scénario utiliserait la relation 3.28.

$$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,89 & 0,11 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,76 & 0,24 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,55 & 0,45 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad 3.27$$

$$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,79 & 0,21 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,66 & 0,34 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,45 & 0,55 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad 3.28$$

Ainsi, pour déterminer l'état d'une dalle neuve à n'importe quel moment, il suffit de déterminer la valeur résiduelle moyenne et les deux valeurs critiques à ce moment. La valeur résiduelle sera donc une variable aléatoire. Le choix de la loi de probabilité tout comme les courbes extrêmes sont ici des hypothèses. Cependant, il serait possible de les déterminer en utilisant la banque de données d'inspection disponibles du MTMDET. Pour une dalle neuve, les trois courbes auraient l'allure présentée à la Figure 3.4.

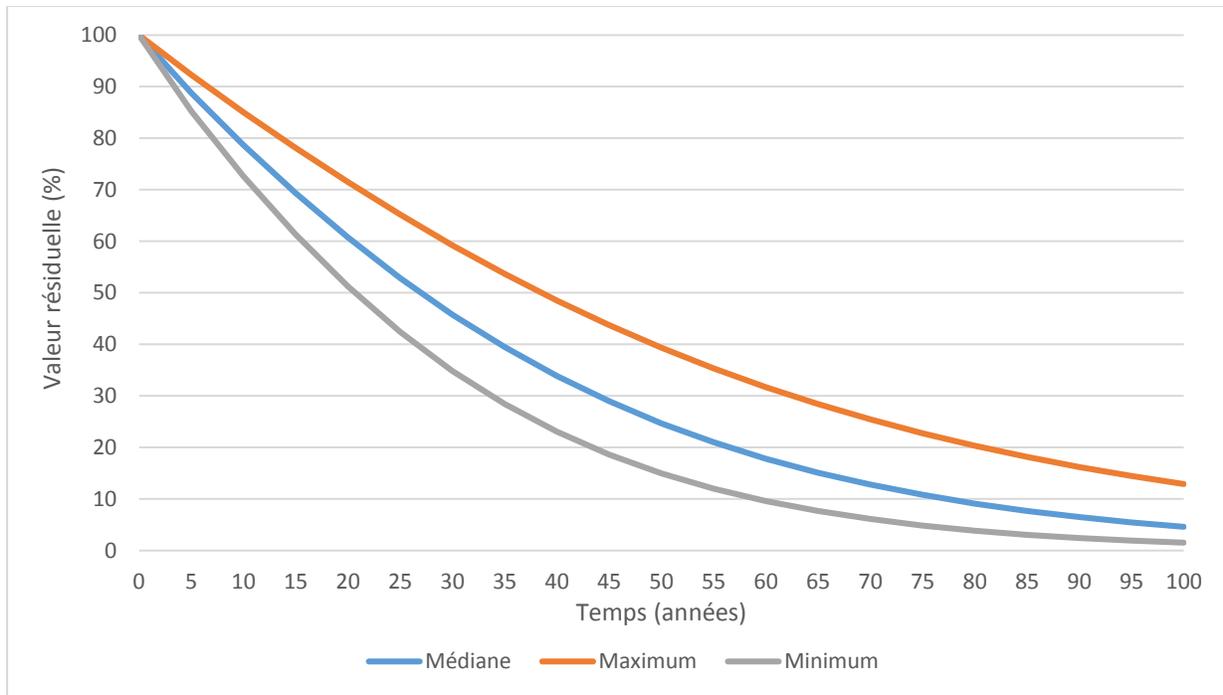


Figure 3.4 - Courbes de détérioration pour une dalle de pont initialement neuve

Trois informations sont donc disponibles pour créer la loi de distribution, le minimum, le maximum et la médiane. De plus, la majorité des valeurs doit se retrouver près de la valeur médiane. Une répartition sous forme de cloche (Gauss) est donc souhaitée. Lorsque la distribution n'est pas symétrique autour de la médiane, la loi normale ne peut être utilisée. L'alternative est la loi log-normale pour les cas asymétriques. Afin de faciliter l'application, la simulation servira à générer un pourcentage de détérioration qui sera déduit de la valeur résiduelle précédente. Ainsi, cette valeur peut théoriquement varier entre 0 et VR_t , mais la loi de probabilité favorisera des valeurs qui porteront la valeur résiduelle entre les courbes critiques.

Ainsi, pour une dalle neuve, il est possible de déterminer la loi de probabilité représentant la détérioration totale tous les 5 ans du pont. Dans ce scénario, aucune information autre que l'état initial n'est connue. Le scénario ne dépend donc pas du « chemin » parcouru par la détérioration. Le Tableau 3.17 présente les caractéristiques et les lois de probabilités pour chaque période de détérioration.

Tableau 3.17 - Caractéristiques de la distribution aléatoire de la détérioration d'une dalle en béton armé neuve en fonction du temps écoulé depuis la construction

Temps (années)	Minimum	Médiane	Maximum	Symétrie	Loi de probabilité	Paramètres	
						Mu	Sigma
5	7,7	11,2	14,7	VRAI	Normale	11,200	1,167
10	14,9	21,3	27,4	FAUX	Log-Normale	3,059	0,108
15	21,9	30,6	38,7	FAUX	Log-Normale	3,422	0,101
20	28,5	39,2	48,8	FAUX	Log-Normale	3,670	0,094
25	34,8	47,1	57,6	FAUX	Log-Normale	3,852	0,084
30	40,8	54,2	65,1	FAUX	Log-Normale	3,993	0,079
35	46,3	60,5	71,6	FAUX	Log-Normale	4,103	0,072
40	51,5	66,1	76,9	FAUX	Log-Normale	4,192	0,065
45	56,3	71,1	81,4	FAUX	Log-Normale	4,263	0,058
50	60,7	75,3	85,0	FAUX	Log-Normale	4,322	0,052
55	64,7	79,0	88,0	FAUX	Log-Normale	4,370	0,046
60	68,3	82,2	90,4	FAUX	Log-Normale	4,409	0,041
65	71,6	84,9	92,3	FAUX	Log-Normale	4,441	0,036
70	74,6	87,2	93,9	FAUX	Log-Normale	4,468	0,031
75	77,3	89,2	95,1	FAUX	Log-Normale	4,491	0,027
80	79,7	90,9	96,1	FAUX	Log-Normale	4,510	0,024
85	81,8	92,3	96,9	FAUX	Log-Normale	4,525	0,021
90	83,8	93,5	97,6	FAUX	Log-Normale	4,538	0,018
95	85,5	94,5	98,1	FAUX	Log-Normale	4,549	0,015
100	87,1	95,4	98,5	FAUX	Log-Normale	4,558	0,013

À l'aide du tableau précédent, les étapes pour construire les lois de probabilité sont les suivantes. D'abord, il faut vérifier si la distribution est symétrique, c'est-à-dire si la médiane est à équidistance du minimum et du maximum. Si c'est le cas, la détérioration est considérée suivre une loi normale de paramètre μ et σ . Le paramètre μ correspond à la médiane et à la moyenne pour une loi normale. La valeur de la courbe médiane lui est donc attribuée. Pour l'écart-type, il faut prendre une valeur de paramètre permettant de limiter les probabilités au-delà des extrêmes. L'écart-type choisi correspond donc au tiers de la distance entre la médiane et les extrêmes.

Si la distribution n'est pas symétrique, une loi log-normale est utilisée. Le paramètre μ est obtenu à l'aide de la médiane. Sachant que la médiane d'une loi log-normale se trouve à l'aide de l'équation 3.29, il est possible d'isoler le paramètre. Pour l'écart-type, la fonction de répartition est utilisée. L'écart-type est choisi de telle sorte que les probabilités résiduelles au-delà des valeurs

extrêmes soient minimales ($F(\min) < 0,001$ et $F(\max) > 0,990$). La fonction de distribution des différentes lois pour la valeur minimale, médiane et maximale est présentée au Tableau 3.18.

$$\text{médiane} = e^{\mu}$$

3.29

Tableau 3.18 - Fonction de distribution aux valeurs minimales, médianes et maximales des lois présentées au Tableau 3.17

Temps (années)	Fonction de distribution		
	F(min)	F(méd)	F(max)
5	0,001	0,5	0,999
10	0,001	0,5	0,990
15	0,000	0,5	0,990
20	0,000	0,5	0,990
25	0,000	0,5	0,992
30	0,000	0,5	0,990
35	0,000	0,5	0,990
40	0,000	0,5	0,990
45	0,000	0,5	0,990
50	0,000	0,5	0,990
55	0,000	0,5	0,990
60	0,000	0,5	0,990
65	0,000	0,5	0,990
70	0,000	0,5	0,991
75	0,000	0,5	0,992
80	0,000	0,5	0,990
85	0,000	0,5	0,990
90	0,000	0,5	0,991
95	0,000	0,5	0,993
100	0,000	0,5	0,993

Cependant, l'ajout d'informations sur la détérioration du pont lors des simulations en application théorique (ou des inspections en application pratique), change l'approche à utiliser. En supposant toujours une dalle en béton armé neuve, la simulation (ou inspection) donne la détérioration réelle à chaque période de 5 ans, il faut donc en tenir compte pour les simulations subséquentes. Ainsi, pour une dalle neuve, la première simulation demeure la même, soit une distribution normale avec μ de 11,2 et σ de 1,167. Le résultat est une valeur résiduelle entre les deux valeurs extrêmes. Cette valeur correspond donc à une nouvelle matrice de transition qui servira de valeur médiane pour la prochaine simulation bornée encore une fois par deux matrices à plus ou moins 5% de celle-ci. La

loi de distribution, une log-normale, est déterminée de la même façon que précédemment. Cette démarche est répétée jusqu'à la 100^e année. Un exemple est présenté ci-dessous.

Dans un premier temps, une dalle en béton armé neuve est considérée. La détérioration est évaluée à chaque 5 ans. Une première simulation est donc exécutée pour déterminer l'état après 5 ans. Tel que mentionné, cette première simulation suit une loi normale. Les étapes de cette première simulation sont présentées à la Figure 3.5.

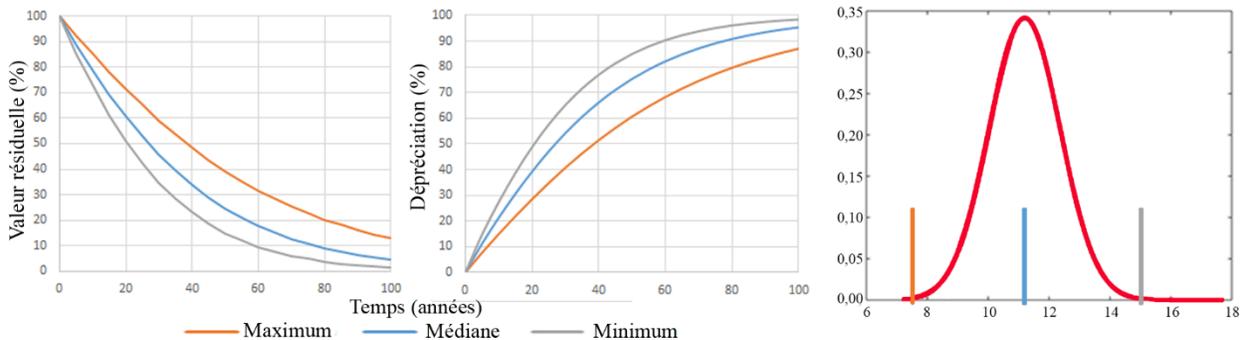


Figure 3.5 - Courbes de valeur résiduelle et de détérioration pour un dalle neuve et distribution de la détérioration à 5 ans

Ainsi, la première simulation pour cet exemple donne une détérioration de 10,5%. La valeur résiduelle de la dalle est donc de 89,5% après 5 ans. 85% de la dalle se retrouve dans l'état A et 15% dans l'état B ($89,5\% = 85\% \times 100\% + 15\% \times 30\%$). Cela signifie donc que cette dalle suit une matrice de transition située entre les deux cas extrêmes. Cette matrice est présentée à l'équation 3.30.

$$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,85 & 0,15 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,72 & 0,28 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,51 & 0,49 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad 3.30$$

À partir de ce point, cette matrice devient la matrice médiane pour la prochaine simulation pour connaître l'état à 10 ans. Les courbes extrêmes sont, encore une fois, à plus ou moins 5%. Cette fois-ci, la loi de distribution suivra une log-normale en raison de l'asymétrie autour de la médiane. Les courbes de détérioration pour ce cas sont présentées à la Figure 3.6.

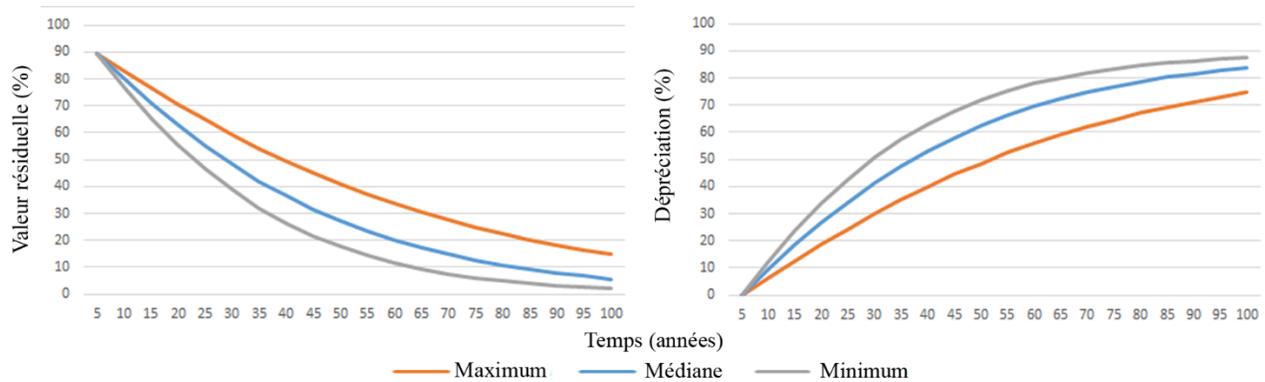


Figure 3.6 - Courbes de valeur résiduelle et de détérioration pour une dalle de 5 ans

Il faut maintenant déterminer la loi de distribution afin de déterminer la détérioration entre 5 et 10 ans. La médiane de détérioration est connue à 9,56% (courbe bleue à 10 ans), correspondant à un paramètre μ de 2,257 pour une loi log-normale. L'écart-type est calculé, encore une fois, de façon à limiter les probabilités d'obtenir une détérioration à l'extérieur des courbes extrêmes. Dans ce cas, un paramètre σ de 0,119 est choisi. La distribution de la détérioration à 10 ans est présentée à la Figure 3.7.

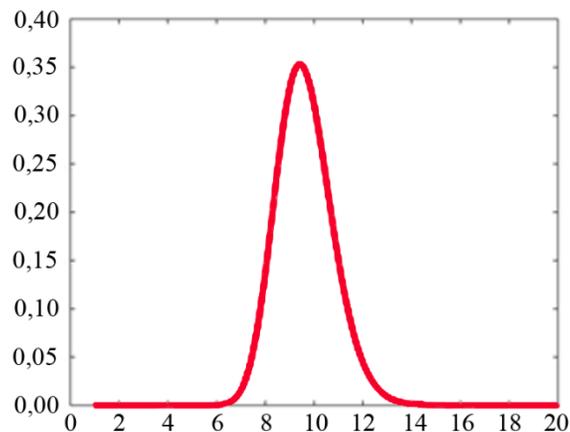


Figure 3.7 - Courbe de distribution pour la simulation pour la détérioration de 5 à 10 ans d'une dalle à valeur résiduelle de 89,5%

Une nouvelle simulation donne une détérioration de 11,3% et donc une valeur résiduelle de 78,2%. Il y a donc maintenant 69,9% dans l'état A, 25,5% dans l'état B et 4% dans l'état C ($78,2\% = 69,9\% \times 100\% + 25,5\% \times 30\% + 4\% \times 15\%$). La matrice utilisée pour se rendre à cet état est présentée à l'équation 3.31. Il s'agit de la matrice médiane pour la simulation à 15 ans et le même procédé est alors répété.

$$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,822 & 0,178 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,692 & 0,308 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,482 & 0,518 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad \mathbf{3.31}$$

Le résultat final dépend donc du chemin parcouru puisque la matrice de transition s'ajuste selon le chemin parcouru. Cette méthode permet de considérer l'effet aléatoire de la détérioration, en plus de considérer l'historique du pont pour anticiper la détérioration. Deux inconvénients des modèles markoviens sont ainsi évités.

CHAPITRE 4 : PARAMÈTRES DU MODÈLE

Pour calculer les valeurs actualisées nettes (*VAN*) de chaque structure, plusieurs paramètres sont nécessaires. Ces paramètres sont ceux présentés aux équations 4.1 à 4.3.

$$VAN = \sum_{t=0}^{\omega} \frac{(R_t - \sum_{e=1}^E C_{e,t})}{\prod_{i=0}^t (1 + r_i)} - CC = \sum_{t=0}^{\omega} \frac{AN_t}{\prod_{i=0}^t (1 + r_i)} - CC \quad 4.1$$

$$R_t = PV \times \prod_{i=0}^t (1 + \pi_{G,i}) \times TS \times DJMA_t \times 365 \times PE_t \quad 4.2$$

$$C_{e,t} = (100 - VR_{e,t}) \times NU_e \times CU_e \times \prod_{i=0}^t (1 + \pi_{M,i}) \quad 4.3$$

Il faut rappeler que le paramètre *e* représente un élément du pont à la fois. Pour cette étude, le pont est représenté par un maximum de deux éléments. Si un seul élément est considéré, il s'agit alors de la dalle en béton armé sur un pont de type 41, soit avec des poutres en béton armé. Si deux éléments sont considérés, il s'agit de la dalle en béton armé et des poutres en acier sur un pont de type 44.

4.1 Modèle de détérioration

Les trois modèles de détérioration étudiés utilisent les matrices de transition du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. Ces matrices représentent respectivement la dégradation d'un dalle en béton armé et d'une poutre en acier/béton précontraint. Elles sont rappelées aux équations 4.4 et 4.5.

$$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,84 & 0,16 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,71 & 0,29 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,50 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad 4.4$$

$$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,91 & 0,09 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,87 & 0,13 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,71 & 0,29 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad 4.5$$

Cette sous-section rappelle les trois modèles de détérioration et les paramètres avec lesquels ils seront utilisés. Ces trois modèles sont la détérioration déterministe du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, la détérioration markovienne et la détérioration stochastique proposée dans le cadre de cette étude.

4.1.1 Modèle de détérioration déterministe

La détérioration déterministe utilise la matrice de détérioration sur la valeur résiduelle de l'élément. Ainsi, pour un état initial donné, les valeurs résiduelles futures seront les mêmes, peu importe la simulation. À chaque période de dégradation, le pourcentage dans chaque état est réparti selon les pourcentages de la matrice de transition. Les courbes de détérioration pour une dalle en béton armé neuve et pour des poutres en acier neuves sont présentées à la Figure 4.1.

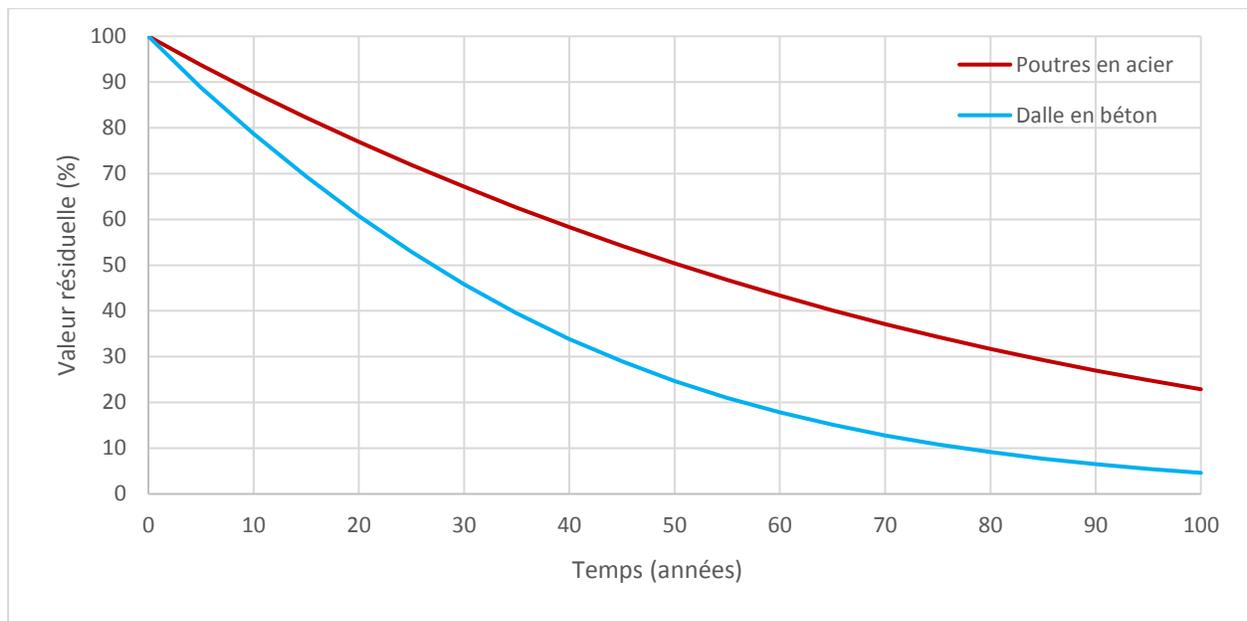


Figure 4.1 - Détérioration d'une dalle en béton armé neuve et de poutres neuves selon le modèle de dégradation déterministe

4.1.2 Modèle de détérioration markovienne

La détérioration markovienne considère que l'élément se trouve toujours entièrement dans un état en particulier, alors que les autres approches considèrent que l'élément peut se répartir en plusieurs états selon l'étendue des dommages. La matrice de détérioration agit alors comme une véritable chaîne de Markov. La probabilité de se trouver dans un état donné à une période donnée se calcule à l'aide de combinaisons des probabilités. Il s'agit alors d'un véritable processus stochastique. Par exemple, si une dalle en béton armé se trouve actuellement dans l'état A, il a 84% des chances de demeurer dans cet état à la prochaine période de 5 ans alors qu'il a 16% des chances de se détériorer dans l'état B.

4.1.3 Modèle de détérioration stochastique

La détérioration stochastique correspond au modèle de détérioration développé dans le cadre de cette étude. Les étapes de calcul sont présentées à la section 3.3.3. Pour ce modèle, la courbe déterministe est utilisée comme médiane et des courbes extrêmes sont aussi ajoutées. Ces courbes extrêmes correspondent à la détérioration de la matrice de transition de base où chaque terme de la diagonale a été modifié par plus ou moins 5%. Bien entendu, le terme à droite de la diagonale est modifié par l'inverse afin que chaque ligne somme à 100%. Les matrices pour les courbes extrêmes d'une dalle en béton armé sont présentées aux équations 4.6 (courbe Dalle en béton +5%) et 4.7 (courbe Dalle en béton -5%). Ainsi, pour une dalle neuve, les courbes sont présentées à la Figure 4.2.

$$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,89 & 0,11 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,76 & 0,24 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,55 & 0,45 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad 4.6$$

$$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,79 & 0,21 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,66 & 0,34 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,45 & 0,55 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad 4.7$$

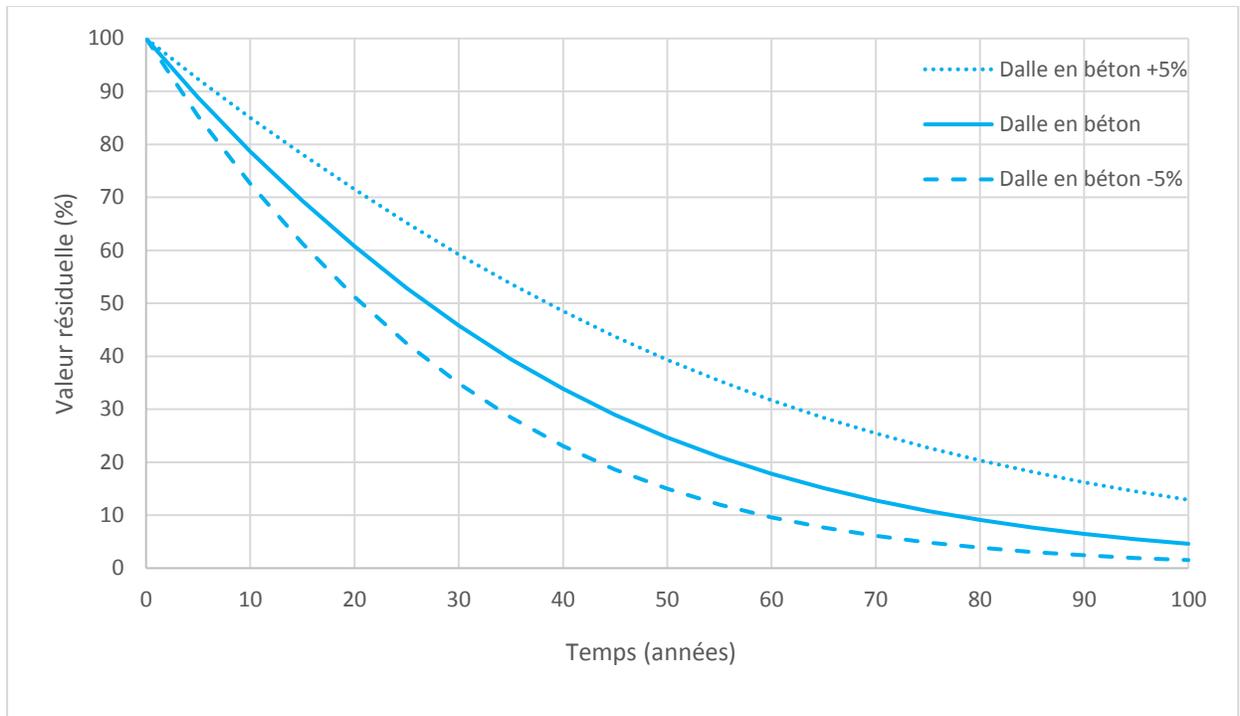


Figure 4.2 - Courbes de détérioration médiane et extrêmes pour une dalle en béton armé neuve suivant une détérioration stochastique

Pour les poutres, les matrices pour les courbes extrêmes sont présentées aux équations 4.8 (courbe Poutres +5%) et 4.9 (courbe Poutres -5%). Les courbes sont présentées à la Figure 4.3.

$$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,96 & 0,04 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,92 & 0,08 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,76 & 0,24 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad 4.8$$

$$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,86 & 0,14 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,82 & 0,18 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,66 & 0,34 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad 4.9$$

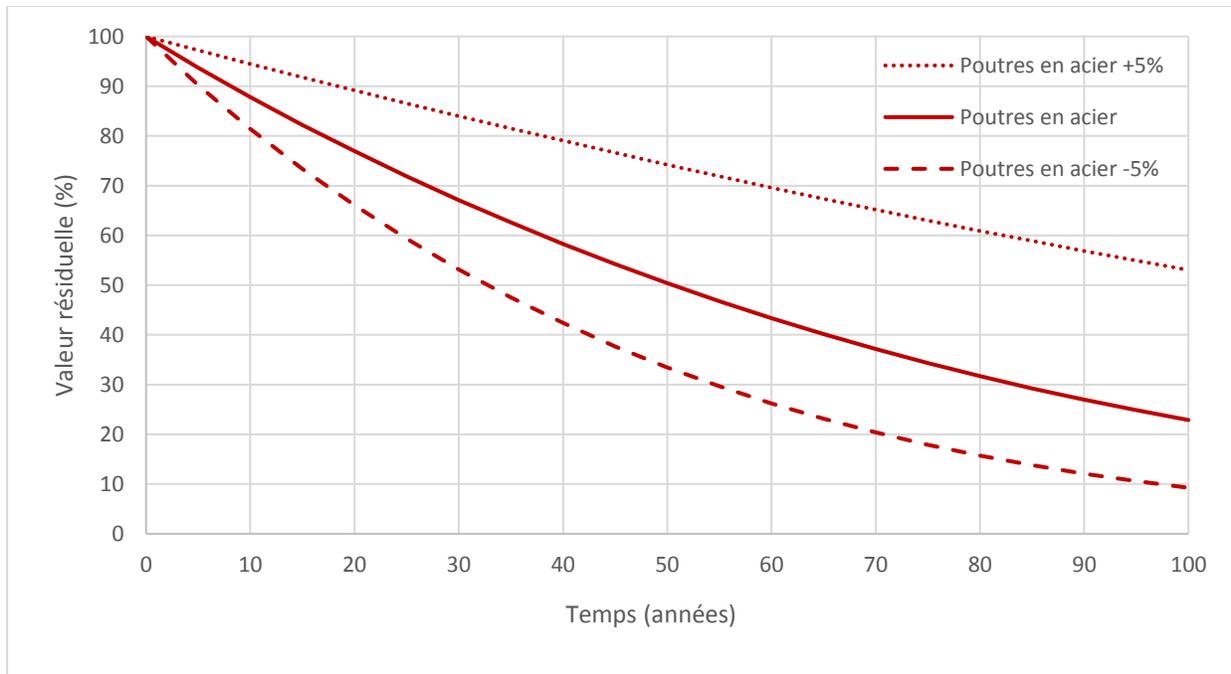


Figure 4.3 - Courbes de détérioration médiane et extrêmes pour une poutre neuve selon une détérioration stochastique

À chaque détérioration, la matrice de transition simulée qui a permis la détérioration est utilisée comme nouvelle matrice médiane et le processus est répété.

4.2 Coûts de construction (CC)

Les coûts de construction correspondent au montant brut engagé lors de la construction de l'ouvrage. Si ce montant n'est pas officiellement disponible, il est possible d'estimer les coûts de construction en fonction du type de pont et de la surface de roulement.

Tel que mentionné en introduction de ce chapitre, deux types de structure sont étudiés pour cette étude. En effet, pour l'étude d'un seul élément, soit la dalle en béton armé, un pont à poutre en béton armé sera utilisé. Ce pont est classé sous le type 41 selon la nomenclature du Ministère. Ainsi, pour ce type de pont, un coût de 4 150\$/m² pour reconstruire est utilisé. Pour l'étude de deux éléments, les poutres en acier et la dalle en béton armé, un pont avec poutres en acier sera étudié. Ce pont est classé sous le type 44 selon la nomenclature du Ministère et un coût de 4 200\$/m² pour reconstruire est utilisé. Le pont à l'étude étant de 1 000 m², les coûts de construction sont de 4 150 000\$ pour un pont de type 41 et de 4 200 000\$ pour un pont de type 44.

4.3 Prix virtuel du temps économisé (PV)

Le prix virtuel du temps économisé correspond à la valeur attribuée à une heure économisée sur la route. La valeur n'est pas nécessairement évaluée par l'utilisateur de la route puisqu'un réseau routier efficace permet une création de richesse pour plusieurs acteurs de la société.

Cette valeur a été évaluée par Transport Canada (1994/2011) selon différents objectifs de déplacement. Pour un déplacement routier pour des raisons professionnelles, une heure économisée sur la route est évaluée à 38,87\$ (24\$ en 1990). Pour un déplacement non professionnel, l'heure économisée à une valeur de 12,07\$ (7,45\$ en 1990) pour un adulte et 10,53\$ (6,50\$ en 1990) pour une personne mineure. Dans le cas où l'objectif du déplacement est inconnu, une valeur de 14,74\$ (9,10\$ en 1990) par heure sauvée est utilisée. Puisque cette recherche se base sur des simulations, la dernière valeur sera utilisée puisque l'objectif des trajets est alors inconnu.

Il faut mentionner que ces valeurs sont pour un passager en particulier. Afin de déterminer la valeur pour un véhicule en particulier, il faut considérer le nombre moyen de passagers dans un véhicule. La valeur moyenne d'occupants par véhicule au Canada est estimée à 1,62 (Natural Resources Canada 2010). Ainsi, le prix virtuel pour une heure économisée sur la route est évalué à partir de l'équation 4.10.

$$PV = \frac{1,62 \text{ passagers}}{\text{véhicule}} \times \frac{14,74\$}{h \times \text{passager}} = \frac{23,88\$}{h} / \text{véhicule} \quad 4.10$$

4.4 Temps économisé par passage (TS)

Le temps économisé par passage correspond à l'économie de temps que l'utilisation du pont procure par rapport à la deuxième alternative la plus rapide. Ainsi, moins un réseau est développé plus cette valeur est importante, le pont en question ayant une importance capitale sur le réseau.

Pour déterminer cette valeur, il suffit d'évaluer les temps de déplacements pour ces deux alternatives. Pour ce faire, il est possible d'utiliser un service de cartographie et de GPS afin de calculer les temps moyens de déplacement. Le service de cartographie *Google Maps* est utilisé pour cette étude. Il est alors possible de comparer le temps moyen de deux alternatives de trajet dont

l'une utilise le pont étudié. Le temps total du trajet varie en fonction du trafic et, par conséquent, selon l'heure de la journée. Pour considérer cet effet, il est possible de faire une moyenne, mais la différence entre les deux alternatives demeure souvent stable.

Par exemple, l'avantage du Pont Pierre-Laporte par rapport au Pont de Québec est de 3 minutes (0,05 heure) pour se déplacer de l'autoroute 20-Est jusqu'au boulevard Laurier, tel que présenté à la Figure 4.4. .

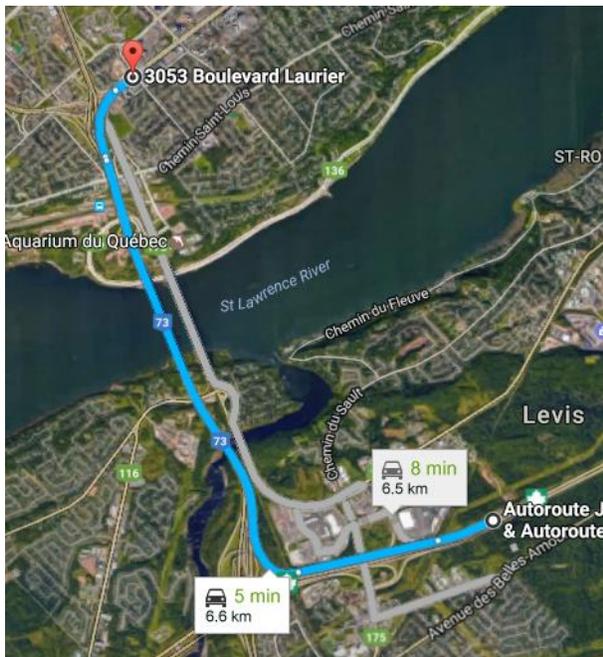


Figure 4.4 - Exemple de calcul du temps économisé grâce à l'utilisation d'un pont

4.5 Débit Journalier Moyen Annualisé (DJMA) stochastique

Le débit journalier moyen annualisé permet d'évaluer le nombre de passages se produisant sur un pont ou un circuit routier en particulier. La valeur en date d'aujourd'hui est disponible grâce à la surveillance du réseau effectué par le gestionnaire. Ainsi, il est possible d'avoir la valeur de base pour le pont étudié. Cependant, l'évolution de cette valeur est plus complexe à déterminer.

Le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports fait certaines recommandations lors de la conception d'une structure afin de considérer les besoins futurs. L'exercice de projection doit tenir compte des projets d'aménagement, du contexte socio-économique, de la démographie, des perspectives économiques, du zonage et des plans

d'urbanisme (MTQ 2014). Cependant, il est aussi demandé de faire la projection sur un horizon réaliste, soit de 10 à 25 ans. Puisque la durée de vie utile d'un pont peut aller jusqu'à 100 ans, ce type de prédiction est donc peu utile pour cette étude. L'évolution du *DJMA* sur la durée de vie d'une structure doit donc se baser sur plusieurs hypothèses.

Après une étude de l'évolution des *DJMA* sur les principaux axes routiers de la ville de Québec (MTQ 2012) et de l'évolution du nombre de permis de conduire émis par la Société d'Assurance Automobile du Québec (SAAQ 2015), une évolution annuelle suivant une loi normale a été choisie. Le calcul du *DJMA* chaque année se fait à l'aide des équations 4.11 et 4.12.

$$DJMA_t = \min[DJMA_{t-1} \times (1 + \delta_t); 2 \times DJMA_0] \quad 4.11$$

$$\delta_t \sim \text{Normale}(0,01; 0,0032) \quad 4.12$$

Le *DJMA* est limité au double de la valeur initiale afin de considérer la capacité maximale du pont. Ce maximum considère qu'un pont ne peut recevoir une infinité de véhicule sans trafic. Ainsi, un trop grand nombre de passage risque de ralentir le débit routier et directement diminuer le temps économisé par l'utilisation du pont.

4.6 Pénalité d'état (PE)

La pénalité d'état permet de pondérer les revenus en fonction de l'état de la structure. Ce facteur permet donc de considérer les coûts associés au risque d'accident ou de défaillance auquel fait face les usagers en empruntant la structure, à la fermeture de voie due aux entretiens et réfections du pont, à la réduction du débit ou de la vitesse de circulation causée par les dommages ou à une fermeture temporaire de l'ouvrage.

Ce facteur étant principalement basé sur des hypothèses, son impact sera étudié dans cette étude. Le modèle de base considère un facteur de 1,0 pour l'état A, 0,9 pour l'état B, 0,8 pour l'état C et 0 pour l'état D. Ce facteur est pondéré selon la répartition de l'élément entre les différents états. Lorsque deux éléments sont considérés, leur contribution à la pénalité d'état est équivalente. Ainsi, le calcul de la pénalité d'état pour le e^e élément est présenté à l'équation 4.13 et le calcul final de la pénalité d'état est présenté à l'équation 4.14.

$$PE_e = \%A \times 1 + \%B \times 0,9 + \%C \times 0,8 \quad 4.13$$

$$PE = \sum_{e=1}^E \frac{PE_e}{E} \quad 4.14$$

4.7 Coût unitaire (CU)

Le coût unitaire correspond au prix de réparation par unité de mesure. À l'interne, le Ministère établit un coût unitaire pour chaque élément selon son matériau. Pour la dalle en béton armé, un coût de 1 000\$/m² est utilisé pour cette étude alors que pour des poutres en acier, le coût est de 650\$/m². Il est à noter que pour cette étude la détérioration des éléments étudiés représente la détérioration du pont entier. La remise à neuf de ces éléments correspond donc à une remise à neuf du pont. Il faut donc pondérer la valeur du coût unitaire pour que la somme des coûts de réparation corresponde aux coûts de construction.

Ainsi, lorsque la dalle est le seul élément étudié d'un pont type 41, le coût unitaire de réparation est fixé à 4 150\$/m² pour pondérer à une réparation du pont en entier. Lorsque la dalle en béton et les poutres en acier sont considérés pour un pont de type 44, il faut pondérer en fonction des coûts totaux initiaux. Le calcul du coût unitaire pour la dalle en béton armé est présenté à l'équation 4.15, alors que ce calcul pour les poutres en acier est présenté à l'équation 4.16. Il est à noter que le calcul du nombre d'unités pour les poutres (2 609 m²) est présenté à la section suivante.

$$\left[\frac{4\,200\,000\$ \times \frac{1\,000\,m^2 \times 1\,000\,\frac{\$}{m^2}}{2\,609\,m^2 \times 650\,\frac{\$}{m^2} + 1\,000\,m^2 \times 1\,000\,\frac{\$}{m^2}}}{1\,000\,m^2} \right] = 1\,557,95\,\frac{\$}{m^2} \quad 4.15$$

$$\left[\frac{4\,200\,000\$ \times \frac{2\,609\,m^2 \times 650\,\frac{\$}{m^2}}{2\,609\,m^2 \times 650\,\frac{\$}{m^2} + 1\,000\,m^2 \times 1\,000\,\frac{\$}{m^2}}}{2\,609\,m^2} \right] = 1\,012,67\,\frac{\$}{m^2} \quad 4.16$$

4.8 Nombre d'unités (NU)

Le nombre d'unités correspond à la dimension ou au nombre d'éléments pour un élément étudié en particulier. Les unités utilisées sont celles présentées à l'annexe A.5. Pour cette étude, une dalle de 1 000 m² est utilisée. Pour les poutres, l'unité de mesure du Ministère est le m². Or, il est plus fréquent de mesurer une quantité d'acier en mètre linéaire si la section est connue ou en m³ afin de déterminer la masse d'acier nécessaire pour la conception. Pour déterminer une valeur plausible d'unités pour les poutres, une estimation de calcul de coûts a été utilisée. Le cheminement est présenté aux équations 4.17 à 4.20 en se basant sur plusieurs hypothèses. La largeur du pont est fixée à 11,1 mètres, l'aire de la section de poutre à 0,120 m², 4 poutres sont utilisées sur la largeur, la masse volumique et le prix massique de l'acier sont respectivement 7 850 kg/m³ et 5\$/kg.

$$\text{longueur} = \frac{1000 \text{ m}^2}{11,1 \text{ m}} \cong 90 \text{ m} \quad 4.17$$

$$\text{volume d'acier par poutre} = 90 \text{ m} \times 0,120 \text{ m}^2 = 10,8 \text{ m}^3 \quad 4.18$$

$$\text{coût d'acier} = 10,8 \text{ m}^3 \times 4 \text{ poutres} \times 7\,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 5 \frac{\$}{\text{kg}} = 1\,695\,600\$ \quad 4.19$$

$$\text{NU pour les poutres} = \frac{1\,695\,600\$}{650 \frac{\$}{\text{m}^2}} \cong 2\,609 \text{ m}^2 \quad 4.20$$

Ainsi, pour cette étude, un pont avec 2 609 m² de poutres en acier est considéré.

4.9 Valeur résiduelle (VR)

La valeur résiduelle représente l'état global d'un élément ou d'une structure en pourcentage de l'état neuf. Cette valeur se calcule à l'aide du Tableau 3.10. Ainsi, la proportion d'un élément dans l'état A possède une valeur résiduelle de 100%, celle dans l'état B de 30%, dans l'état C de 15% et la proportion dans l'état D a une valeur résiduelle nulle. La somme pondérée de chaque proportion donne la valeur résiduelle globale. Ce calcul est présenté à l'équation 4.21

$$VR = \%A + \%B \times 0,30 + \%C \times 0,15 \quad 4.21$$

Cette valeur est pratique pour déterminer le coût de réparation d'un élément, comme le montre l'équation des coûts (4.3).

4.10 Taux d'inflation générale (π_G) stochastique

Le taux d'inflation générale permet d'évaluer la variation des prix à la consommation dans le temps. En effet, un dollar d'aujourd'hui ne peut acheter la même quantité de bien qu'il y a 20 ans. La majorité des biens ont augmenté de valeur, ce qui s'appelle l'inflation (Mankiw et Scarth 2001). La méthode la plus utilisée au Canada pour évaluer ce phénomène est d'utiliser l'indice des prix à la consommation (IPC). Le prix de milliers de biens de consommation et de services est évalué à différents moments et l'inflation reflète l'évolution de ce panier de biens et services dans le temps.

Ainsi, pour cette étude, il faut considérer une évolution du prix virtuel au fil du temps. Le taux d'inflation générale doit donc être anticipé pour la durée de vie de l'ouvrage. L'inflation est souvent représentée dans la littérature financière comme un processus Ornstein-Uhlenbeck (processus de retour vers la moyenne) (Chang et coll. 2013). Il s'agit d'un processus de retour à la moyenne modélisé suivant l'équation 4.22.

$$d\pi = \varphi(\psi - \pi) dt + \varepsilon_t dt \quad 4.22$$

Dans cette équation, π représente le taux d'inflation, φ correspond à la vitesse de retour à la moyenne, ψ est la moyenne à long terme du processus et ε_t représente la partie stochastique du processus. Lorsque les sauts de temps (Δt) entre les valeurs à déterminer sont relativement petits, il est possible de réécrire l'équation 4.22 sous la forme discrète (Smith 2010), tel que présenté à l'équation 4.23.

$$\pi_t = \pi_{t-1} + \varphi(\psi - \pi_{t-1}) \Delta t + \varepsilon_t \quad 4.23$$

Pour cette étude, le choix des paramètres se base sur l'article de Power et coll. (2015) et sur les mises à jour appliquées dans Fortin et coll. (2017). Ainsi, les paramètres sont déterminés à l'aide de l'estimation du maximum de vraisemblance, tel que présenté par Barz (1999). Pour ce faire, les données trimestrielles de l'indice des prix à la consommation (IPC) pour le Canada pour la période 1989 à 2012 sont utilisées. Le modèle de base utilisé pour cette étude est présenté aux équations 4.24 et 4.25.

$$\pi_{G,q} = \pi_{G,q-1} + 0,1 \times (0,017 - \pi_{G,q-1}) + \varepsilon_{G,q} \quad 4.24$$

$$\varepsilon_{G,q} = Z_{G,q} = \sigma_G \times dW_{G,q} = \frac{\sqrt[2]{0,015}}{100} \times dW_{G,q} \quad 4.25$$

Ici, $dW_{G,q} \sim N(0; 1)$, ce qui représente un processus *Wiener* à fréquence annuelle. La valeur de moyenne à long terme est donc de $\psi = 0,017$, soit 1,7% et la vitesse de retour à la moyenne est de $\varphi = 0,1$. Les valeurs sont simulées sur une base trimestrielle et la valeur q représente donc le trimestre depuis la construction du pont. Pour connaître le taux d'inflation annuel, il faut combiner les quatre taux d'inflation trimestriels d'une année, à l'aide de l'équation 4.26.

$$\pi_{G,t} = \prod_{q=4t+1}^{4(t+1)} \left(1 + \frac{\pi_{G,q}}{4}\right) - 1 \quad 4.26$$

De plus, puisque les valeurs pour l'année 0 (quatre premiers trimestres) ne nécessitent pas d'indexation, $\pi_{G,t=0} = 0$ et la valeur trimestrielle initiale (cinquième trimestre) est fixée à 0,017 ou 1,7% ($\pi_{G,q=4} = 0,017$).

4.11 Taux d'inflation stochastique des matériaux (π_M)

Le domaine de la construction est aussi touché par l'inflation, mais la volatilité dans ce secteur est plus élevée que dans l'économie générale. Cela s'explique par la disponibilité des matériaux et le nombre de mises en chantier dans le monde qui impactent rapidement l'offre et la demande de ce domaine. Ainsi, les coûts pour la réparation du pont évoluent selon un taux d'inflation différent de celui de l'économie général.

Ce taux d'inflation suit aussi un processus Ornstein-Uhlenbeck. Les paramètres se basent encore une fois sur l'article de Power et coll. (2015) et sur les mises à jour appliquées dans Fortin et coll. (2017). L'estimation des paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance se fait à l'aide des données trimestrielles de Statistique Canada sur les coûts de construction non résidentielle de 1989 à 2012. Le modèle d'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre suit donc les équations 4.27, 4.28 et 4.29.

$$\pi_{M,q} = \pi_{M,q-1} + 0,1 \times (0,032 - \pi_{M,q-1}) + \varepsilon_{M,q} \quad 4.27$$

$$\varepsilon_{M,q} = R[2,1] \times Z_{G,q} + R[2,2] \times Z_{M,q} \quad 4.28$$

$$Z_{M,q} = \frac{\sqrt[2]{0,08}}{100} \times dW_{M,q}; \quad R[2,1] = 0,9920; \quad R[2,2] = 0,1266 \quad 4.29$$

Ici, $dW_{M,q} \sim N(0; 1)$, ce qui représente un processus *Wiener* à fréquence annuelle. La valeur de moyenne à long terme est donc de $\psi = 0,032$, soit 3,2% et la vitesse de retour à la moyenne est de $\varphi = 0,1$. Les valeurs sont simulées sur une base trimestrielle et la valeur q représente donc le trimestre depuis la construction du pont. Pour connaître le taux d'inflation annuel, il faut donc combiner les quatre taux d'inflation trimestriels d'une année, à l'aide de l'équation 4.30.

$$\pi_{M,t} = \prod_{q=4t+1}^{4(t+1)} \left(1 + \frac{\pi_{M,q}}{4}\right) - 1 \quad 4.30$$

De plus, puisque les valeurs pour l'année 0 (quatre premiers trimestres) ne nécessitent pas d'indexation, $\pi_{M,t=0} = 0$ et la valeur trimestrielle initiale (cinquième trimestre) est fixée à 0,032 ou 3,2% ($\pi_{M,q=4} = 0,032$).

Les termes de la matrice $[R]$ considèrent la corrélation entre les différentes valeurs économiques. La matrice de corrélation est présentée à l'équation 4.31.

$$[\rho] = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{12} & 1 & \rho_{23} \\ \rho_{13} & \rho_{23} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0,9920 & -0,1413 \\ 0,9920 & 1 & -0,0674 \\ -0,1413 & -0,0674 & 1 \end{bmatrix} \quad 4.31$$

Ici, ρ_{12} représente la corrélation entre l'inflation générale et l'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre, ρ_{13} correspond à la corrélation entre l'inflation générale et le taux d'intérêt sans risque et ρ_{23} est la corrélation entre le taux d'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre et le taux d'intérêt sans risque. Pour obtenir les termes de corrélation pour chacune des trois parties stochastiques des équations économiques, il faut utiliser une décomposition de Cholesky, permettant d'obtenir la matrice présentée à l'équation 4.32.

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,9920 & 0,1266 & 0 \\ -0,1413 & 0,5753 & 0,8057 \end{bmatrix} \quad 4.32$$

La partie stochastique (ε_i) pour les trois équations économiques se calcule à l'aide de l'équation 4.33.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_G \\ \varepsilon_M \\ \varepsilon_r \end{bmatrix} = [R] \times \begin{bmatrix} Z_G \\ Z_M \\ Z_r \end{bmatrix} \quad 4.33$$

4.12 Taux d'actualisation (r) stochastique

Le taux d'actualisation permet de comparer différents taux financiers à des périodes différentes. Ce taux doit refléter deux facteurs humains en finances, la valeur temps de l'argent et l'aversion au risque.

La valeur temps de l'argent considère la préférence pour la jouissance immédiate d'une somme monétaire. En effet, il est plus avantageux de recevoir 100\$ aujourd'hui que dans un an, puisque ce choix permet, entre autres, de placer le montant au taux sans risque pendant un an et d'ainsi retrouver le montant initial plus un certain gain d'intérêt après un an. Ce montant supplémentaire correspond normalement à la valeur temps de l'argent. C'est pour cette raison que le taux sans risque est utilisé pour quantifier ce paramètre.

L'aversion pour le risque fait appel au risque de perdre l'investissement initial en raison de la possibilité de défaut de l'emprunteur. Par exemple, il est plus risqué de prêter de l'argent à un particulier qu'à un gouvernement, puisque ce dernier a un pouvoir de taxation pour remplir ses engagements financiers. Pour quantifier le risque d'un investissement, il faut ajouter une prime de risque au taux sans risque. Cette prime est proportionnelle au risque de l'investissement.

Pour actualiser les flux financiers sur la durée de vie d'un pont, il faut donc considérer ces deux aspects.

4.12.1 Taux d'actualisation sans risque (rf)

Le taux d'actualisation sans risque se définit comme le taux d'intérêt attribué à un placement financier à l'abri du risque. Pour cette étude, le modèle stochastique utilisé pour anticiper le taux d'actualisation sans risque est celui de Chan et coll. (1992). Ce modèle est décrit dans les équations 4.34, 4.35 et 4.36.

$$rf_q = rf_{q-1} + (\alpha + \beta \times rf_{q-1}) + \varepsilon_{r,q} \quad 4.34$$

$$\varepsilon_{r,q} = R[3,1] \times Z_{G,q} + R[3,2] \times Z_{M,q} + R[3,3] \times Z_{r,q} \quad 4.35$$

$$Z_{r,q} = \sigma_r \times (rf_q)^\gamma \times dW_{r,q} \quad 4.36$$

Dans ce modèle, les paramètres α et β sont des paramètres de retour à la moyenne, tandis que σ et γ représentent la volatilité du modèle. Il est d'ailleurs possible de voir certaines similitudes avec les modèles de retour à la moyenne utilisés pour l'inflation. Les paramètres se basent encore une fois sur l'article de Power et coll. (2015) et sur les mises à jour appliquées dans Fortin et coll. (2017). Les paramètres sont ainsi déterminés à l'aide de la méthode des moments généralisés (Chan et coll. 1992).

L'estimation se fait donc à partir des obligations 10 ans du gouvernement du Canada. Ces données sont disponibles sur une base trimestrielle et la période 1989 à 2012 est étudiée. Le taux sans risque peut ainsi être déterminé à l'aide des équations 4.37 et 4.38.

$$rf_q = rf_{q-1} + \left(\frac{0,135}{100} - \frac{3,95}{100} rf_{q-1} \right) + R[3,1] \times Z_{G,q} + R[3,2] \times Z_{M,q} + R[3,3] \times Z_{r,q} \quad 4.37$$

$$Z_{r,q} = 0,003585 \times (rf_{q-1})^{0,1946} \times dW_{r,q} \quad 4.38$$

Les données obtenues étant trimestrielles, il faut alors les convertir en données annuelles à l'aide de l'équation 4.39.

$$rf_t = \left[\prod_{q=4t+1}^{4(t+1)} \left(1 + \frac{rf_q}{4} \right) - 1 \right] \quad 4.39$$

Puisque les valeurs pour l'année 0 (quatre premiers trimestres) ne nécessitent pas d'actualisation, $rf_{t=0} = 0$ et la valeur trimestrielle initiale (cinquième trimestre) est fixée à 0,035 ou 3,5% ($rf_{q=4} = 0,035$).

4.12.2 Prime de risque

La prime de risque s'ajoute directement au taux sans risque et considère le risque de l'investissement. Pour déterminer cette prime, il faut utiliser l'équation 4.40.

$$\text{Prime de risque}_t = \beta \times (rm_t - rf_t) \quad 4.40$$

Ici, rm_t représente le rendement attendu du marché et β le niveau de risque de l'actif étudié. Ainsi, la prime de risque correspond à un pourcentage de la différence entre le rendement du marché et le taux sans risque. Cette différence est connue sous le nom de prime de risque du marché. Pour cette étude, la valeur initiale pour la prime de risque du marché est fixée à 5% (Fernandez et coll. 2014) et le niveau de risque pour une infrastructure est de 0,4 (Yescombe 2014). La prime de risque initiale serait donc de 2%. Pour simplifier l'étude, cette prime est considérée constante tout au long du projet.

Il est à noter que les coûts (défaut du gouvernement) ne font pas nécessairement face aux mêmes risques que les revenus (rentabilité de l'infrastructure) et il pourrait donc être possible de prendre le taux sans risque pour actualiser les coûts et de prendre le taux ajusté au risque pour les revenus. Par contre, le risque est considéré global au projet pour cette étude. Le taux d'actualisation est donc déterminé à l'aide de l'équation 4.41.

$$r_t = rf_t + \beta \times (rm_t - rf_t) = \left[\prod_{q=4t+1}^{4(t+1)} \left(1 + \frac{rf_q}{4} \right) - 1 \right] + 0,02 \quad 4.41$$

CHAPITRE 5 : MÉTHODOLOGIE

La méthodologie pour cette étude est basée sur la simulation de variables aléatoires qui servira d'outil décisionnel. Pour ce faire, des bases de codes MATLAB® sont écrites pour chaque paramètre. Ces bases de codes sont ainsi facilement remplacées si une variable doit être évaluée différemment à des fins de comparaison.

La simulation à l'étude est répétée 20 000 fois afin d'avoir une certaine confiance dans les résultats, tout en respectant la capacité des ordinateurs de performances moyennes à l'heure actuelle.

Cette section a pour but d'expliquer brièvement le code pour chacun des paramètres et le fonctionnement du programme MATLAB®. Le code est disponible à l'ANNEXE C. Un schéma des interactions entre les processus est présenté à la Figure 5.1. Les flèches montrent l'interdépendance des différents blocs de code et les numéros indiquent l'ordre dans lequel les blocs doivent être lancés.

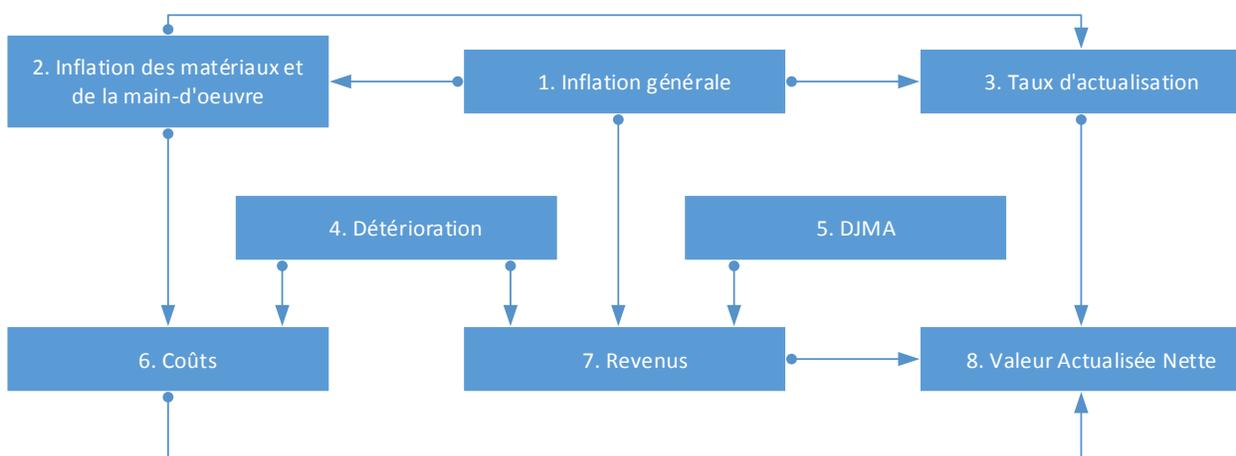


Figure 5.1 - Interactions entre les processus

5.1 Valeurs financières stochastiques

Les trois paramètres financiers ont une simulation similaire. Il est important d'effectuer la simulation en ordre, soit l'inflation générale, l'inflation des matériaux et de la main-d'oeuvre, puis

le taux d'intérêt sans risque. L'ordre est essentiel en raison de la corrélation qui existe entre les différentes variables. Le processus des valeurs financières est présenté à la Figure 5.2.

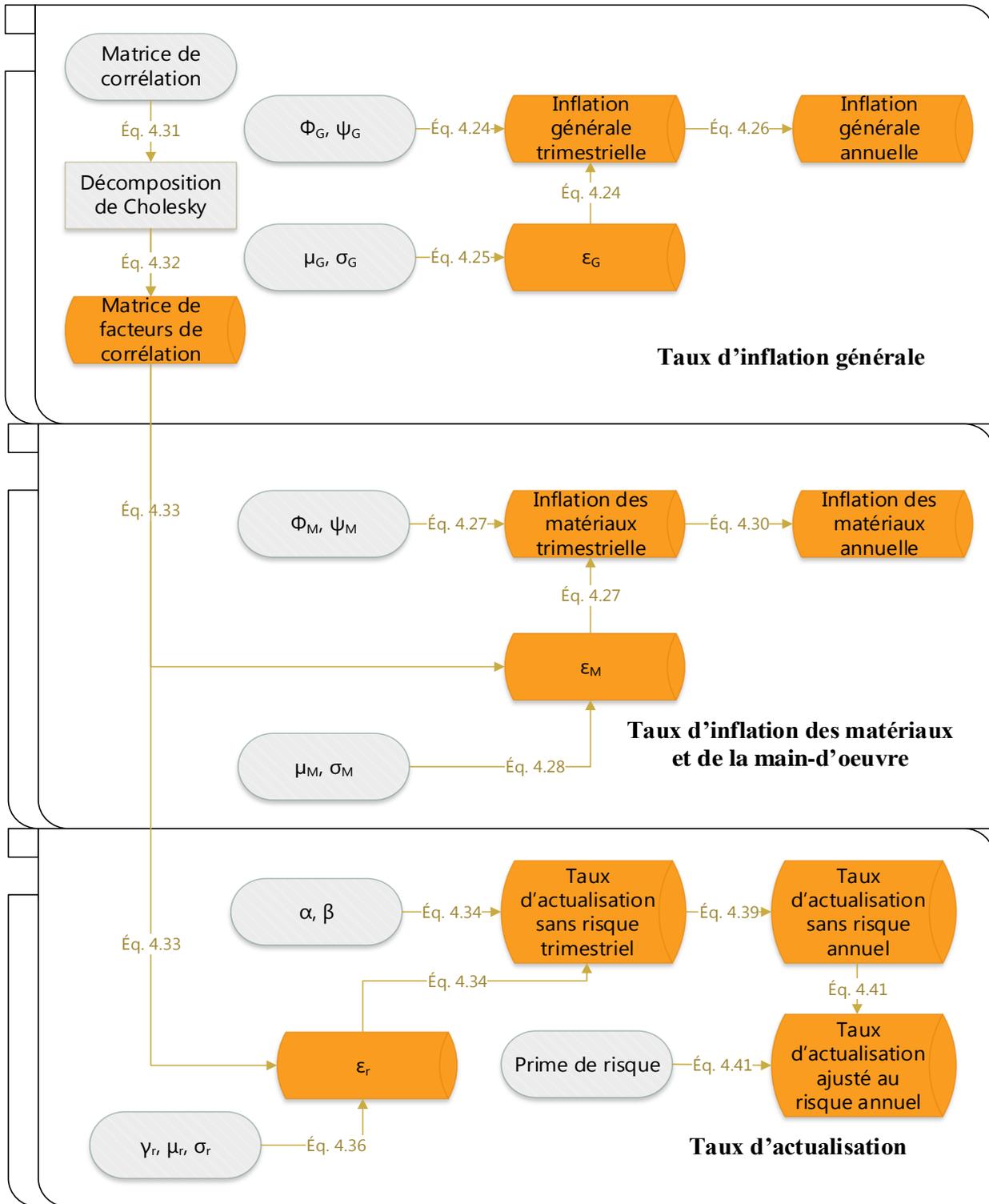


Figure 5.2 - Schéma des processus pour la simulation des valeurs financières

Pour cette section, tous les schémas de processus se basent sur la légende présentée à la Figure 5.3. Ainsi, chaque schéma présente l'interaction des paramètres d'une équation ou de l'ensemble d'équations qui permettent de générer chaque paramètre du modèle. Les équations expliquant le processus sont aussi inscrites sur chaque lien du processus.

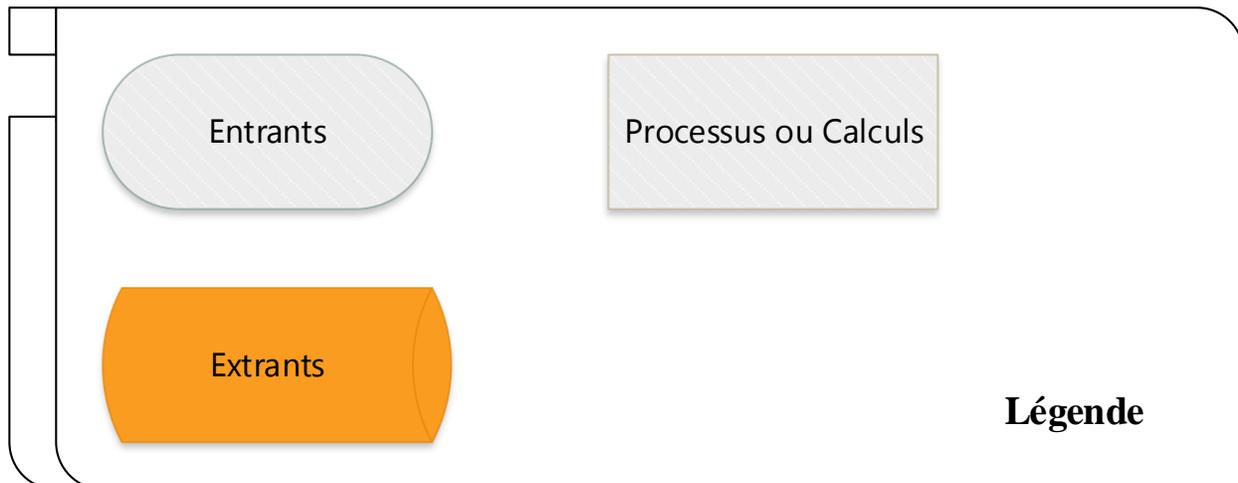


Figure 5.3 - Légende pour les schémas de processus

5.2 Débit journalier moyen annualisé stochastique

Le débit journalier moyen annualisé est une variable indépendante et peut donc être simulé à tout moment avant le calcul des revenus. Le code génère un taux d'augmentation pour chaque année de la durée de vie du pont. Ce taux est donc ajouté à la valeur de base initiale. L'exercice est répété pour chacune des simulations nécessaires. Les valeurs initiales consistent donc en le nombre de simulations, la durée de vie maximale du pont, le *DJMA* initial, les paramètres de la loi normale choisie et la valeur maximale de *DJMA*. À la sortie de ce bloc, le *DJMA* pour chaque année et pour chaque simulation est obtenu, sous forme de matrice. Cette relation est présentée à la Figure 5.4.

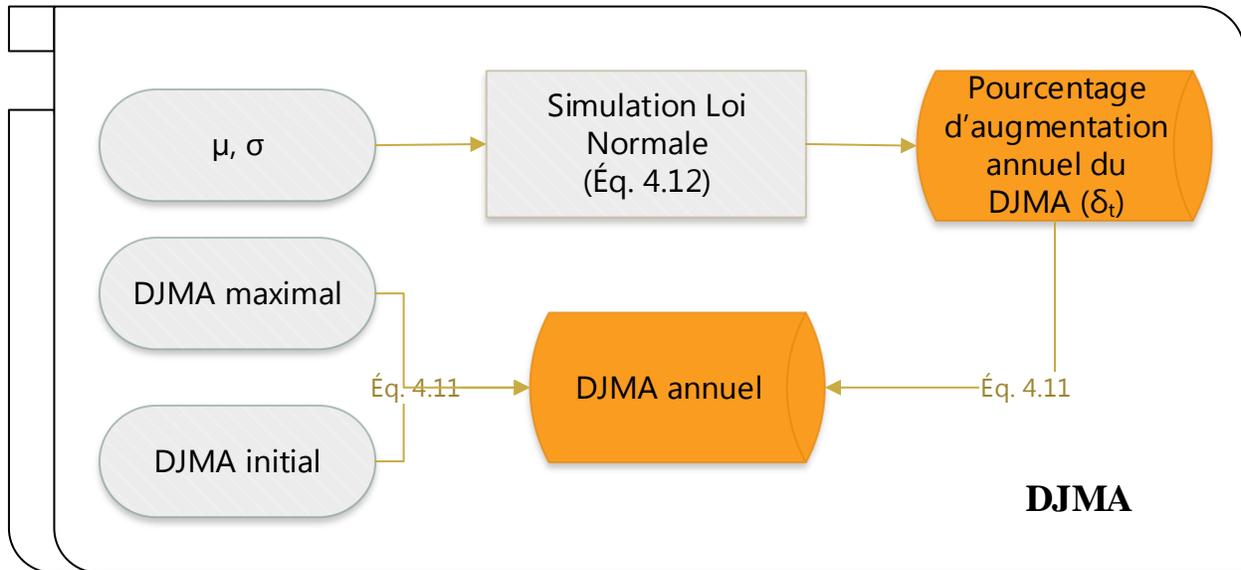


Figure 5.4 - Processus pour le calcul du DJMA

5.3 Détérioration des éléments et réparation

Plusieurs blocs de code sont disponibles pour ce paramètre en raison des nombreuses possibilités proposées dans cette étude.

Le premier bloc de code représente le modèle déterministe du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. Le code considère un seul élément qui se détériore toujours de la même façon pour une situation initiale donnée. L'élément est distribué selon différents états, représentant les différents défauts sur sa surface. Pour ce type de détérioration, pour un état initial donné, un élément se détériore toujours de la même façon. Le code doit donc simplement appliquer la détérioration en multipliant le vecteur de répartition entre les états par la matrice de transition pour obtenir la répartition future. Le processus de ce modèle est présenté à la Figure 5.5.

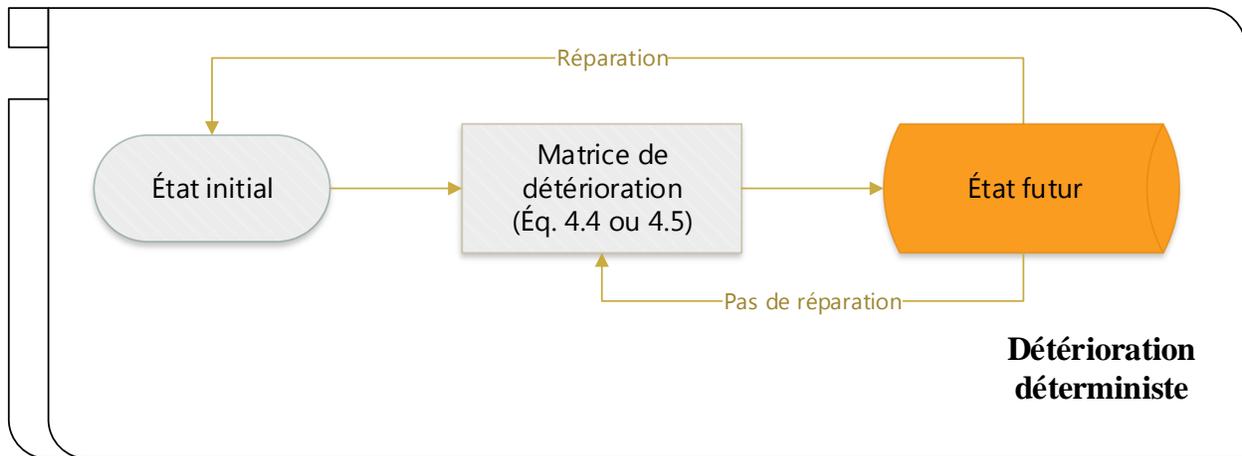


Figure 5.5 - Processus pour la détérioration selon le modèle déterministe

Le deuxième bloc utilise les mêmes matrices de détérioration que pour le modèle déterministe, mais cette fois-ci, les matrices sont utilisées comme chaînes de Markov stochastiques. Cette fois-ci, l'élément se trouve totalement dans un seul état à la fois et la transition d'état est donnée par la matrice de transition. Pour simuler la détérioration de l'élément d'une simulation, un nombre aléatoire entre 0 et 1 est généré à par ordinateur à chaque 5 ans (période de détérioration). Il y a changement d'état lorsque le nombre aléatoire généré est supérieur à la probabilité de maintien dans l'état de la matrice de détérioration. Si le nombre généré est inférieur à la probabilité de maintien dans l'état, il n'y a pas de détérioration et l'élément demeure dans l'état actuel pour la prochaine période. Pour déterminer le moment optimal de réparation, il faut évaluer la valeur actualisée nette de plusieurs scénarios de réparation (19 dans ce cas-ci, soit une à chaque 5 ans). Pour chaque scénario de réparation, la détérioration avant la réparation est la même. Par contre, suite à la réparation, de nouveaux nombres aléatoires sont générés permettant une détérioration aléatoire. Le processus de ce modèle est présenté à la Figure 5.6.

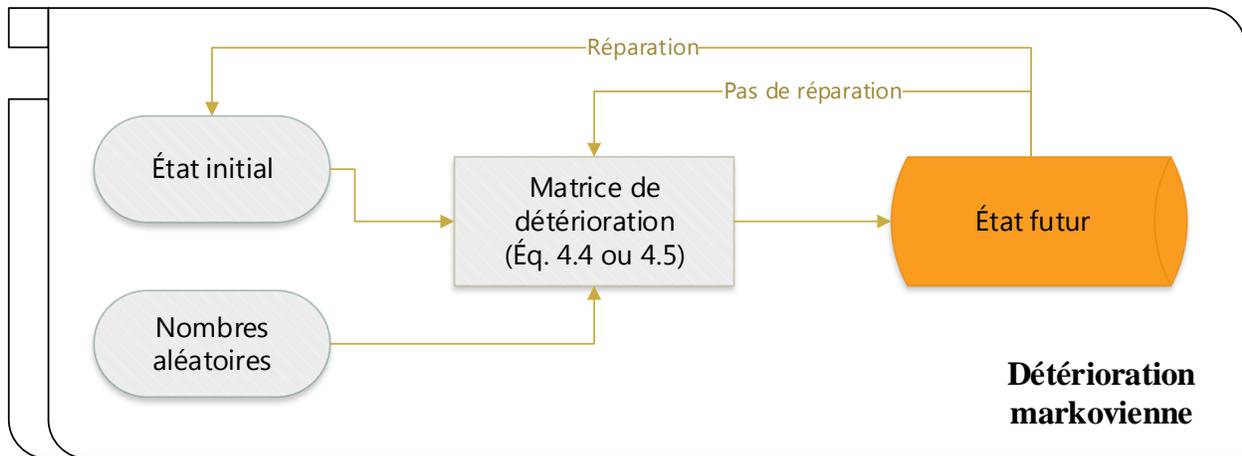


Figure 5.6 - Processus pour la détérioration selon le modèle markovien

Le troisième bloc utilise le modèle de détérioration proposé dans ce mémoire. La détérioration suit une matrice de transition qui est générée aléatoirement en fonction de la rapidité de détérioration de l'élément. Ce modèle est présenté à la section 3.3.3. Dans le code, pour appliquer ce modèle, il faut déterminer les deux valeurs extrêmes de la simulation, puis établir la loi de probabilité qui régit entre ces valeurs. Une simulation de cette loi détermine la dépréciation de l'élément. La matrice de transition ayant permis d'atteindre ce nouvel état est par la suite déterminée par processus itératif. La dégradation suivante suit le même processus, mais la matrice de transition médiane devient celle déterminée par le processus itératif. Le processus de ce modèle est présenté à la Figure 5.7.

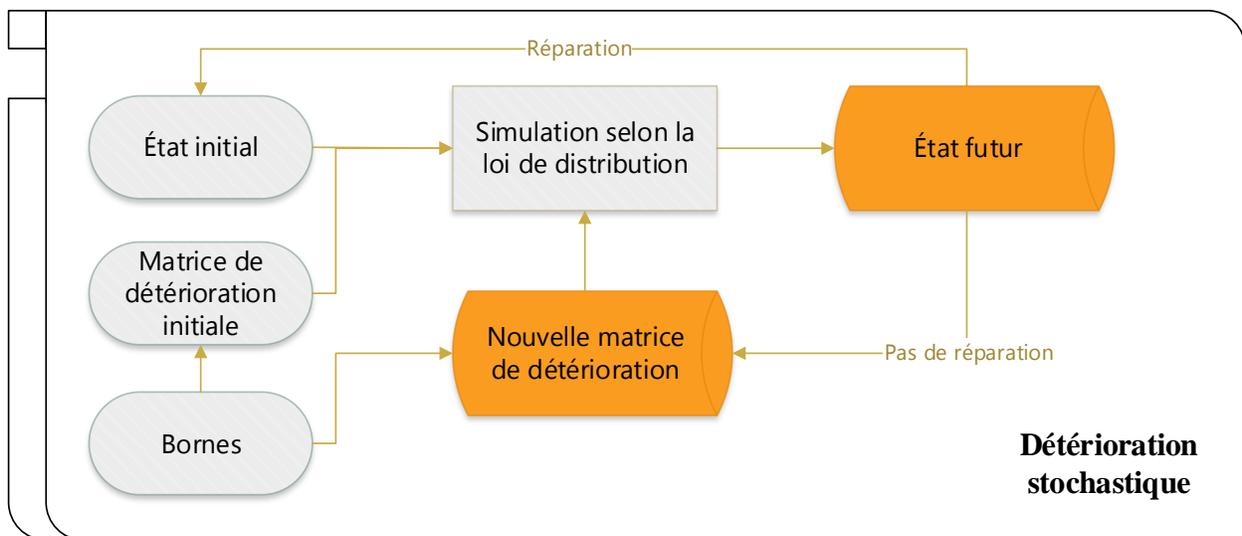


Figure 5.7 – Processus pour la détérioration selon le modèle stochastique

Les trois derniers blocs utilisent les mêmes modèles que précédemment, mais cette fois-ci, deux éléments se détériorent simultanément et indépendamment.

Les interactions globales du bloc de code du modèle de détérioration sont présentées à la Figure 5.8. Dans les blocs à deux éléments, il suffit de doubler ce processus et de combiner les résultats.

Concernant la réparation des éléments, il est essentiel d'établir certaines hypothèses afin de comprendre le code et de simplifier la réalité. Premièrement, les réparations ne peuvent être effectuées qu'à certains moments durant la durée de vie de l'ouvrage. Ces moments seront les mêmes que les moments où la détérioration est constatée, soit aux 5 années. Deuxièmement, une réparation prend une période de détérioration pour s'effectuer (5 ans). Ainsi, pour une réparation à 5 ans, le coût est débité à cette période, alors que l'état post-réparation est atteint 5 années plus tard. Ce délai permet de considérer les entraves à la circulation. Finalement, pour les scénarios à plusieurs éléments, il n'y a pas d'avantage économique à effectuer toutes les réparations au même moment.

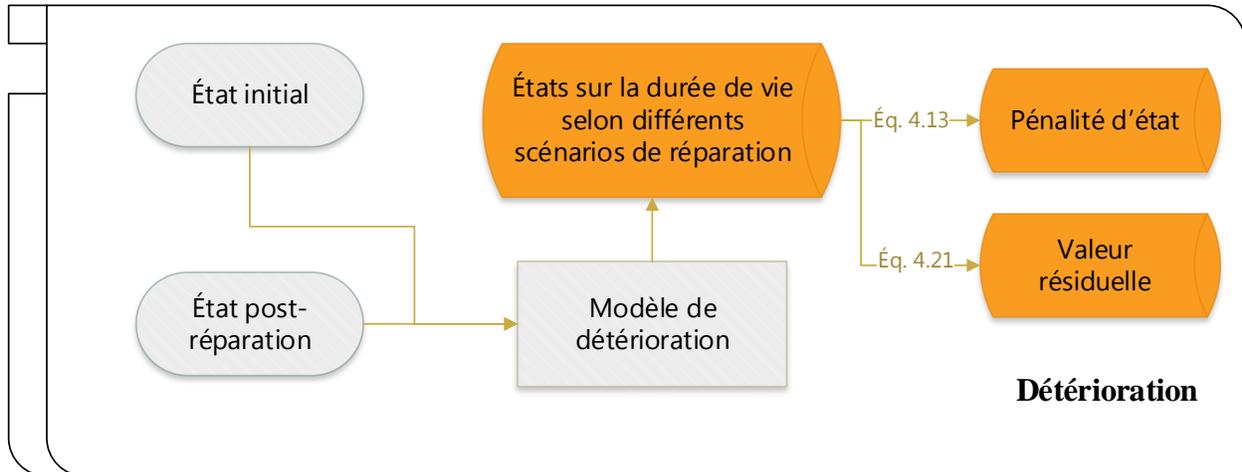


Figure 5.8 - Processus pour la détérioration globale des éléments

5.4 Calcul des coûts

Le calcul des coûts se fait à l'aide des paramètres générés précédemment. Il est donc important d'utiliser ce code après avoir généré les taux d'inflation et d'intérêt, ainsi que la dégradation. Le code applique simplement l'équation 4.3. Il est à noter que les coûts sont actualisés et indexés à la sortie de ce code. Le processus est présenté à la Figure 5.9.

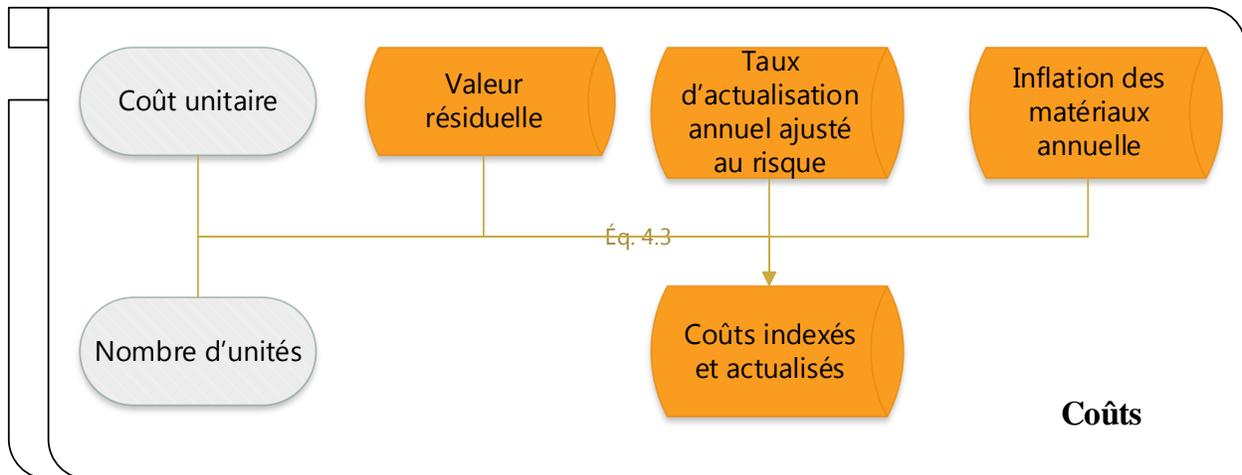


Figure 5.9 - Processus pour le calcul des coûts

5.5 Calcul des revenus

Le calcul des revenus se fait à l'aide des paramètres générés précédemment. Il est donc important d'utiliser ce code après avoir généré les taux d'inflation et d'intérêt, ainsi que la dégradation. Le code applique simplement l'équation 4.2. Il est à noter que les revenus sont actualisés et indexés à la sortie de ce code. Le processus est présenté à la Figure 5.10.

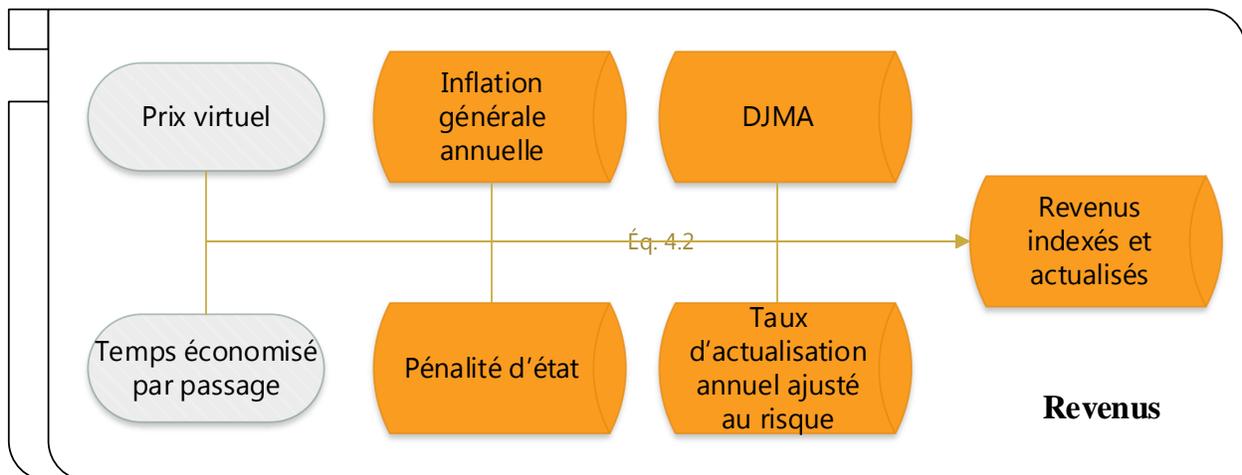


Figure 5.10 - Processus pour le calcul des revenus

5.6 Valeur actualisée nette et analyse

Le code d'actualisation fournit la valeur actualisée nette en utilisant la différence entre les revenus et les coûts pour chaque année qui est ensuite actualisée. Ce code permet aussi d'effectuer les analyses préliminaires. Ce code permet de sortir l'information nécessaire pour l'analyse, comme

le scénario optimal pour réparer ou l'état lors de la réparation optimale. Ce code est très malléable afin d'aller chercher les renseignements désirés pour l'analyse.

CHAPITRE 6 : RÉSULTATS ET ANALYSE

Cette étude se concentre principalement sur l'évaluation des modèles de détérioration. Les six différents scénarios pour la détérioration présentés au chapitre précédent sont comparés, c'est-à-dire les trois modèles de détérioration évalués pour un seul élément et pour deux éléments. Pour mieux comprendre l'impact du modèle de détérioration par rapport aux autres variables, chacun des six scénarios est utilisé en deux temps. Dans un premier temps, les paramètres financiers et de débit sont déterministes. Pour choisir les paramètres financiers et de débit déterministes, il suffit d'utiliser la moyenne des paramètres stochastiques. Ces valeurs sont présentées plus bas. De cette façon, la variation du moment optimal pour réparer dépend simplement de la détérioration. Dans un deuxième temps, les variables aléatoires pour les paramètres financiers et de débit sont introduites (tel que présenté au CHAPITRE 4) permettant de mieux analyser l'impact de ces paramètres sur la simulation. Il est important de mentionner que pour l'étude, lorsque deux modèles de détérioration sont comparés, l'évolution dans le temps des autres paramètres financiers et de débit est la même (même bloc de 20 000 simulations).

6.1 Étude pour une dalle en béton armé

Pour cette étude, lorsque le pont est représenté par un seul élément, la dalle en béton armé est utilisée. La comparaison entre les modèles de détérioration à l'aide de paramètres financiers et de débits stochastiques se fait à l'aide du même bloc de paramètres financiers et débit simulé. Un résumé des paramètres généraux est présenté au Tableau 6.1 et les paramètres financiers et de débit sont présentés au Tableau 6.2.

Tableau 6.1 – Valeur des paramètres généraux pour la détérioration d'un seul élément

Paramètre	Valeur
Matrice de détérioration	$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,84 & 0,16 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,71 & 0,29 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,50 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix}$
Coût de construction (CC)	4 150 000\$ (type 41)
Prix virtuel (PV)	23,88\$/h par voiture
Temps économisé (TE)	0,09 heure
Pénalité d'état (PE)	[1,0 0,9 0,8 0,0]
Coût unitaire (CU)	4 150\$/m ²
Nombre d'unités (NU)	1 000 m ²

Tableau 6.2 - Valeur des paramètres financiers et de débit selon l'approche

Augmentation du Débit Journalier Moyen Annualisé
Déterministe : 1%
Stochastique : \sim Normale(0,01; 0,0032)
Taux d'inflation générale (π_G)
Déterministe : 1,71%
Stochastique :
$\pi_{G,q} = \pi_{G,q-1} + 0,1 \times (0,017 - \pi_{G,q-1}) + \varepsilon_{G,q}$
$\varepsilon_{G,q} = Z_{G,q} = \sigma_G \times dW_{G,q} = \frac{\sqrt[2]{0,015}}{100} \times dW_{G,q}$
$\pi_{G,t} = \prod_{q=4t+1}^{4(t+1)} \left(1 + \frac{\pi_{G,q}}{4}\right) - 1$
Taux d'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre (π_M)
Déterministe : 3,24%
Stochastique :
$\pi_{M,q} = \pi_{M,q-1} + 0,1 \times (0,032 - \pi_{M,q-1}) + \varepsilon_{M,q}$
$\varepsilon_{M,q} = R[2,1] \times Z_{G,q} + R[2,2] \times Z_{M,q}$
$Z_{M,q} = \frac{\sqrt[2]{0,08}}{100} \times dW_{M,q}; \quad R[2,1] = 0,9920; \quad R[2,2] = 0,1266$
$\pi_{M,t} = \prod_{q=4t+1}^{4(t+1)} \left(1 + \frac{\pi_{M,q}}{4}\right) - 1$
Taux d'actualisation (r)
Déterministe : 5,55%
Stochastique :
$rf_q = rf_{q-1} + \left(\frac{0,135}{100} - \frac{3,95}{100} rf_{q-1}\right) + R[3,1] \times Z_{G,q} + R[3,2] \times Z_{M,q} + R[3,3] \times Z_{r,q}$
$Z_{r,q} = \frac{0,3585}{100} \times (rf_{q-1})^{0,1946} \times dW_{r,q}; \quad R[3,1] = -0,1413; \quad R[3,2] = 0,5753; \quad R[3,3] = 0,8057$
$r_t = rf_t + \beta \times (rm_t - rf_t) = \left[\prod_{q=4t+1}^{4(t+1)} \left(1 + \frac{rf_q}{4}\right) - 1 \right] + 0,02$

6.1.1 Détérioration déterministe de la dalle

La détérioration déterministe de la dalle en béton armé signifie que l'ensemble du pont est représenté par cette dalle et que celle-ci se détériore au rythme de la matrice de détérioration fourni par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. La détérioration est donc toujours la même pour un même état initial donné.

6.1.1.1 Paramètres financiers et de débit routier déterministes

Lorsque l'ensemble des paramètres est déterministe, les résultats sont toujours les mêmes, peu importe la simulation. Ainsi, à l'aide de la matrice de détérioration du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, la date optimale pour réparer une dalle en béton armé est 25 ans (soit 25 ans après sa mise en service), tel que démontré à la Figure 6.1. À ce moment, la valeur résiduelle est de 52,89% de la valeur à neuf.

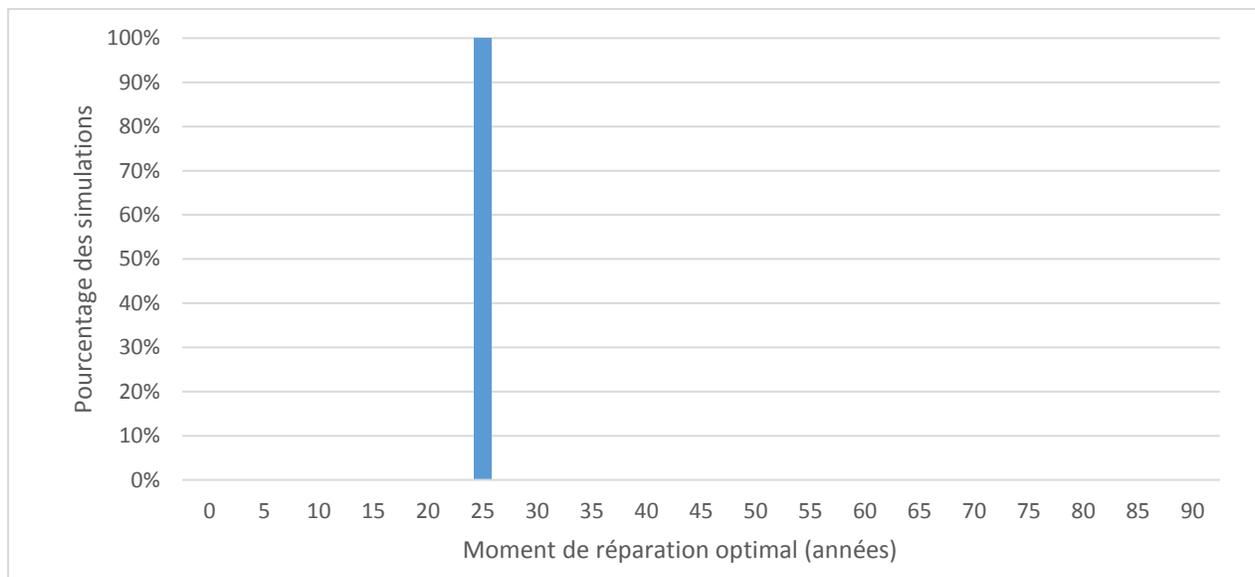


Figure 6.1 - Répartition des simulations selon la date optimale de réparation pour la détérioration déterministe et les paramètres financiers et de débit déterministes

L'étude des valeurs actualisées nettes permet de comprendre l'impact d'optimiser les interventions sur le système. Ainsi, les valeurs nettes pour chacun des scénarios et la perte par rapport au scénario optimal tant en valeur monétaire qu'en pourcentage de l'investissement initial (4 150 000\$) sont présentées au Tableau 6.3.

Tableau 6.3 - Valeur actualisée nette pour chaque scénario et perte par rapport au scénario optimal pour la détérioration déterministe et les paramètres financiers et de débit déterministes

Moment de réparation (années)	Valeur actualisée nette	Perte par rapport au scénario optimal	
		en \$	en % de l'investissement initial
0 (aucune)	203 090 871 \$	37 666 869 \$	908%
5	223 187 624 \$	17 570 116 \$	423%
10	230 474 684 \$	10 283 056 \$	248%
15	235 841 798 \$	4 915 942 \$	118%
20	239 223 926 \$	1 533 815 \$	37%
25	240 757 740 \$	-	-%
30	240 709 466 \$	48 274 \$	1%
35	239 395 089 \$	1 362 651 \$	33%
40	237 125 310 \$	3 632 430 \$	88%
45	234 176 197 \$	6 581 544 \$	159%
50	230 778 425 \$	9 979 315 \$	240%
55	227 117 640 \$	13 640 100 \$	329%
60	223 339 902 \$	17 417 838 \$	420%
65	219 557 068 \$	21 200 672 \$	511%
70	215 951 009 \$	24 806 731 \$	598%
75	212 672 033 \$	28 085 707 \$	677%
80	209 733 873 \$	31 023 867 \$	748%
85	207 145 505 \$	33 612 235 \$	810%
90	204 905 379 \$	35 852 361 \$	864%

La différence entre une réparation à 25 ans et 30 ans a peu d'influence pour ce scénario d'évaluation avec une différence sous les 50 000\$ (1% de l'investissement initial). Par contre, une réparation plus hâtive ou plus tardive a un coût significatif allant de 33% de l'investissement initial pour une réparation à 35 ans à plus de 900% l'investissement initial en l'absence de réparation sur la durée de vie. La décision a donc une importance capitale sur la gestion du budget et la création de richesse.

6.1.1.2 Paramètres financiers et de débit routier stochastiques

L'ajout de variabilité sur les valeurs financières et de débit routier fait varier les flux financiers annuels. Le moment optimal pour réparer pour les 20 000 simulations est présenté à la Figure 6.2.

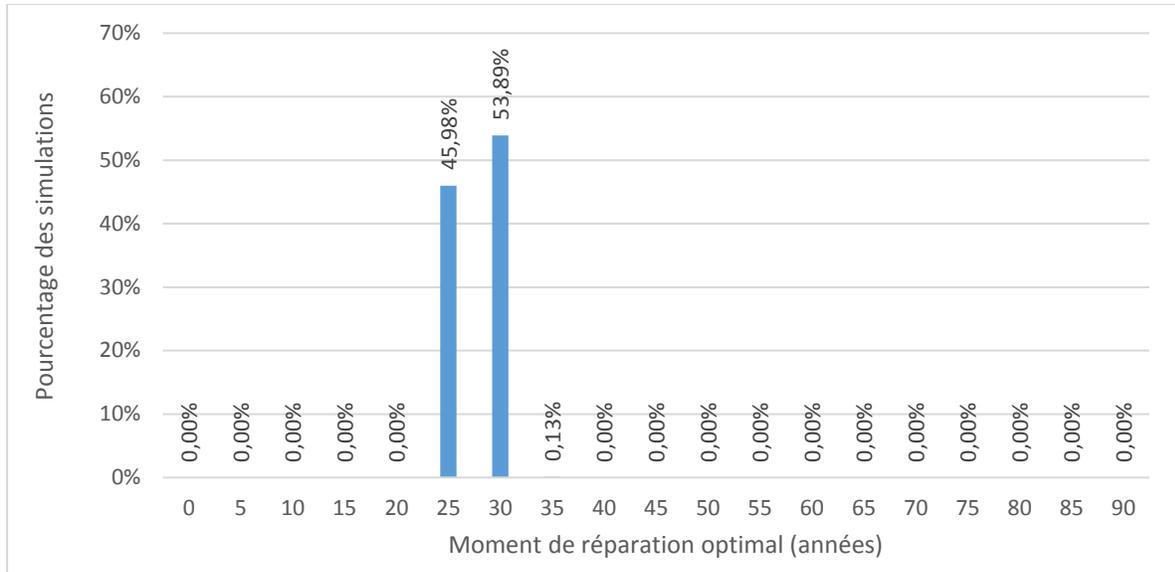


Figure 6.2 - Répartition des simulations selon la date optimale de réparation pour la détérioration déterministe et les paramètres financiers et de débit stochastiques

Cette fois-ci, le scénario optimal varie entre 25 ans et 30 ans. Certaines simulations suggèrent même une réparation à 35 ans. Cette variation est purement associée à la variabilité des valeurs financières et de débit, confirmant l'importance d'analyser ce facteur lors de la prise de décision. En effet, pour ce modèle, la détérioration n'a aucune variabilité tel que démontré à la section précédente. Il est intéressant de déterminer quel est l'impact de chacune des variables sur la valeur actualisée nette. Une forte inflation générale et un *DJMA* élevé fait augmenter les revenus. À l'inverse, une forte inflation des matériaux et de la main-d'œuvre augmente les coûts de réparation. Un taux d'intérêt élevé dévalue les valeurs plus tardives (tant les coûts que les revenus).

Il est impossible d'isoler les variables dans l'équation initiale, il faut alors se rebattre sur certaines données obtenues des simulations. La donnée la plus explicite est la valeur cumulative moyenne pour chaque variable aléatoire. Ces valeurs sont présentées au Tableau 6.4.

Tableau 6.4 - Valeur cumulative des différentes paramètres aléatoires pour une détérioration déterministe avec des paramètres financiers et de débit stochastiques

	$\prod_{t=0}^{99} (1 + \pi_{G,t})$	$\prod_{t=0}^{99} (1 + \pi_{M,t})$	$\prod_{t=0}^{99} (1 + r_t)$	$\sum_{t=1}^{99} DJMA_t$
Scénario 25 ans	537,48%	2 374,97%	22 261,00%	1 606 321
Scénario 30 ans	537,07%	2 329,50%	17 715,64%	1 605 636
Scénario 35 ans	534,01%	2 249,62%	12 260,21%	1 607 795

La volatilité sur le cumulatif des valeurs de taux d'inflation, tant générale que des matériaux et de la main-d'œuvre, et du débit est plutôt faible entre les différents scénarios optimaux. À l'inverse, la volatilité de la valeur cumulative du taux d'intérêt ajusté au risque est forte. Cela signifie donc qu'un taux d'intérêt élevé favorise une réparation hâtive à 25 ans et un taux d'intérêt très faible va favoriser une réparation plus tardive. Cela s'explique par le fait qu'une réparation tardive crée davantage de revenus à long terme. Cependant, un fort taux d'intérêt vient réduire fortement l'impact des valeurs en fin de vie du pont. La différence entre les revenus et les coûts bruts (avant l'application des 4 paramètres stochastiques) sont présentés au Tableau 6.5.

Tableau 6.5 - Revenus bruts pour les trois scénarios optimaux avec une détérioration déterministe et des paramètres financiers et de débit stochastiques

	Réparation à 25 ans	Réparation à 30 ans	Réparation à 35 ans
0 à 4 ans	7 844 580 \$	7 844 580 \$	7 844 580 \$
5 à 9 ans	7 719 067 \$	7 719 067 \$	7 719 067 \$
10 à 14 ans	7 577 237 \$	7 577 237 \$	7 577 237 \$
15 à 19 ans	7 286 661 \$	7 286 661 \$	7 286 661 \$
20 à 24 ans	6 848 058 \$	6 848 058 \$	6 848 058 \$
25 à 29 ans	4 350 115 \$	6 305 124 \$	6 305 124 \$
30 à 34 ans	7 844 580 \$	3 457 211 \$	5 706 960 \$
35 à 39 ans	7 719 067 \$	7 844 580 \$	2 581 710 \$
40 à 44 ans	7 577 237 \$	7 719 067 \$	7 844 580 \$
45 à 49 ans	7 286 661 \$	7 577 237 \$	7 719 067 \$
50 à 54 ans	6 848 058 \$	7 286 661 \$	7 577 237 \$
55 à 59 ans	6 305 124 \$	6 848 058 \$	7 286 661 \$
60 à 64 ans	5 706 960 \$	6 305 124 \$	6 848 058 \$
65 à 69 ans	5 094 512 \$	5 706 960 \$	6 305 124 \$
70 à 74 ans	4 497 412 \$	5 094 512 \$	5 706 960 \$
75 à 79 ans	3 934 897 \$	4 497 412 \$	5 094 512 \$
80 à 84 ans	3 417 971 \$	3 934 897 \$	4 497 412 \$
85 à 89 ans	2 951 652 \$	3 417 971 \$	3 934 897 \$
90 à 94 ans	2 536 866 \$	2 951 652 \$	3 417 971 \$
95 à 99 ans	2 171 920 \$	2 536 866 \$	2 951 652 \$
TOTAL	115 518 636 \$	118 758 936 \$	121 053 529 \$

Il est possible de constater que le scénario 35 ans crée plus de valeurs, mais ces valeurs sont en fin de vie et sont donc amenuisées lors de l'application du taux d'intérêt. En effet, en étudiant ces valeurs, il est possible de voir que les revenus bruts sont les mêmes jusqu'à la réparation. La réparation à 25 ans est moins dispendieuse et plus hâtive que dans les autres scénarios. Les revenus sont donc moins affectés que les autres scénarios lorsque le taux d'intérêt est appliqué. Suite à la réparation, l'équation des revenus bruts reprend les mêmes paramètres qu'à la construction du pont.

En raison du décalage entre les réparations, les revenus sont donc plus faibles en fin de vie pour le scénario 25 ans. Le taux d'intérêt est donc le principal aspect qui fait varier le choix pour ce modèle de détérioration. Un taux élevé favorise une réparation à 25 ans, un taux moyen ou plus faible favorise une réparation à 30 ans et, dans quelques cas extrêmes de très faible intérêt, une réparation à 35 ans est à favoriser. Il est possible de confirmer cette théorie avec les valeurs actualisées nettes moyennes lorsque ces scénarios sont optimaux. Les valeurs actualisées nettes moyennes pour les scénarios de réparation optimaux augmentent plus le moment de réparation optimal est tardif. Cette hausse s'explique par la baisse du taux d'intérêt. Les valeurs actualisées nettes moyennes sont présentées au Tableau 6.6

Tableau 6.6 - Valeurs actualisées nettes moyennes pour chaque scénario optimal pour une détérioration déterministe et des paramètres financiers et de débit stochastiques

	Scénario 25 ans	Scénario 30 ans	Scénario 35 ans
Valeur actualisée nette moyenne	240 055 956 \$	249 221 075 \$	267 058 325 \$

Il est cependant peu probable que la détérioration de deux ponts identiques soit la même. Plusieurs facteurs viennent influencer la détérioration d'une structure et c'est pour cette raison qu'un modèle de détérioration stochastique semble plus intéressant.

6.1.2 Détérioration markovienne de la dalle

La détérioration markovienne de la dalle en béton armé signifie que l'ensemble du pont est représenté par la dalle en béton armé et l'état de celle-ci est le même sur l'ensemble de sa surface. La détérioration stochastique se fait donc selon une chaîne de Markov. L'état du pont ne peut donc être représenté que par quatre valeurs résiduelles possibles (100%, 30%, 15% ou 0%). Pour ce type de détérioration, le nombre de chemins de détérioration est multiple, mais fini. Pour l'étude, il existe 1 160 chemins de détérioration que la dalle neuve peut emprunter sur sa durée de vie. Le nombre de chemins de détérioration correspond aux combinaisons possibles qui permet à une dalle neuve de se rendre à un état donné à une période donnée. Pour déterminer ce nombre, il suffit de suivre la logique présentée au Tableau 6.7.

Tableau 6.7 - Nombre de scénarios possibles pour se rendre à un état pour chaque période de 5 ans avec la détérioration markovienne pour un élément

	5	10	15	20	25	...	t	...	90	95
A	1	1	1	1	1	...	A_{t-1}	...	1	1
B	1	2	3	4	5	...	$B_{t-1} + A_{t-1}$...	18	19
C	0	1	3	6	10	...	$C_{t-1} + B_{t-1}$...	153	171
D	0	0	1	4	10	...	$D_{t-1} + C_{t-1}$...	816	969
Total	2	4	8	15	26		$2 \times Total_{t-1} - D_{t-1}$		988	1 160

6.1.2.1 Paramètres financiers et de débit routier déterministes

Lorsque les paramètres financiers et de débit sont déterministes, seule la variabilité de la détérioration affecte la décision de réparer. Pour une détérioration markovienne, la variabilité est très élevée en raison de la possibilité (faible, mais possible) de maintien infini dans un état donné. La répartition du moment optimal est présentée à la Figure 6.3. La colonne 0 représente les ponts n'ayant reçu aucune réparation.

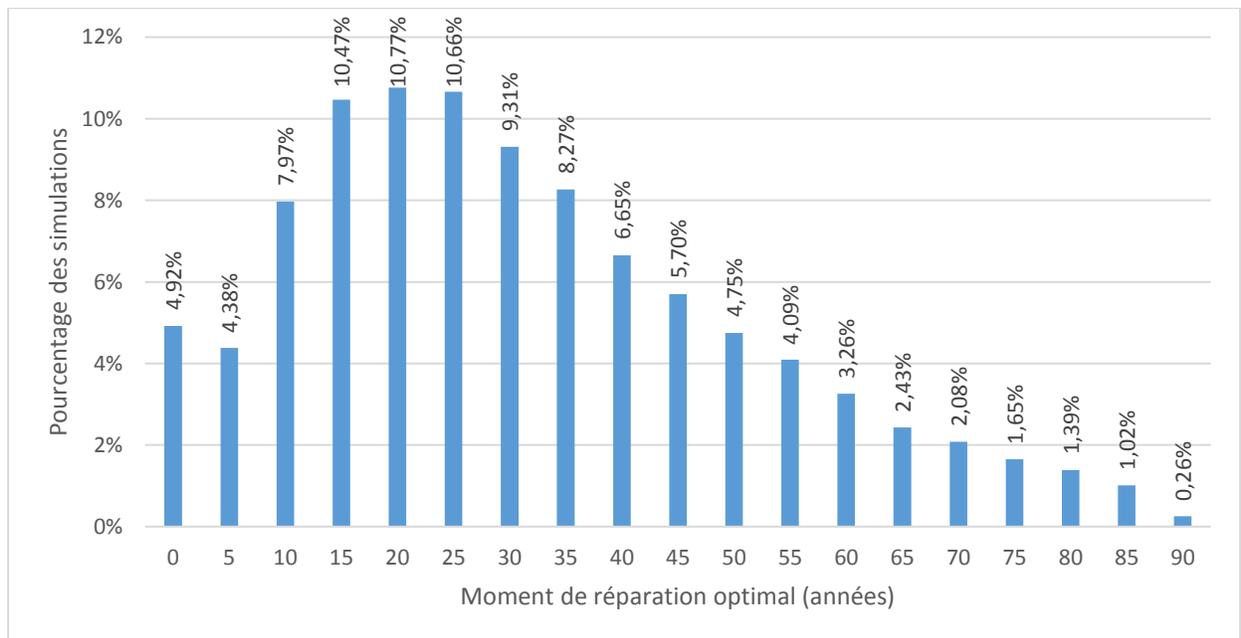


Figure 6.3 - Répartition des simulations selon la date optimale de réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

La répartition est très étalée pour ce scénario de détérioration. Il est donc impossible de choisir une date optimale de réparation. Il faut donc pousser l'étude pour trouver des repères qui aideraient la prise de décision. Dans ce cas-ci, seuls les chemins de détérioration sont modifiés d'une simulation à l'autre, il faut donc déterminer quel chemin correspond à quelle réparation. Il est facile de

commencer l'analyse par les simulations où aucune réparation n'est nécessaire. En effet, ces cas s'expliquent principalement par la possibilité de maintien de la dalle dans l'état A pour la durée de vie du pont. Trois scénarios ne nécessitent jamais de réparation représentant 964 des 984 simulations sans réparation pour cette étude (4,92% à la Figure 6.3). Ces trois scénarios sont présentés à la Figure 6.4.

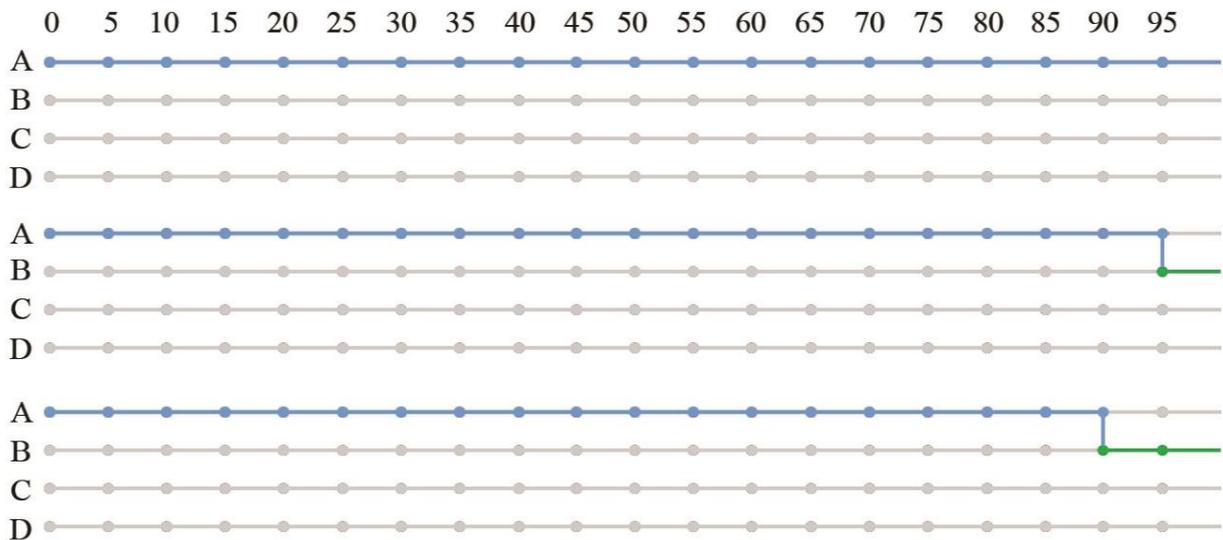


Figure 6.4 - Scénarios de détérioration ne nécessitant jamais de réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

Ce nombre correspond bien à la tendance que la matrice doit donner tel que démontré aux équations 6.1 et 6.2.

$$\begin{aligned}
 P[X_{19} = B | X_{17} = A] &= P_{AA}^{17} \times (P_{AA} + P_{AB} \times P_{BB}) \\
 &= 0,84^{17} \times (0,84 + 0,16 \times 0,71) = 4,92\%
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

$$\begin{aligned}
 20\,000 \text{ simulations} \times 4,92\% &= 984 \text{ simulations (sur papier)} \\
 &\approx 964 \text{ simulations (avec simulation aléatoire)}
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

L'absence de réparation signifie qu'une réparation en fin de vie d'un pont en très bon état crée moins de richesse que le coût de la réparation. Un dernier scénario peut aussi ne demander aucune réparation. Il s'agit d'un maintien en A pour 85 ans puis en B pour le reste de la durée de vie. Ce chemin de dégradation est présenté à la Figure 6.5.

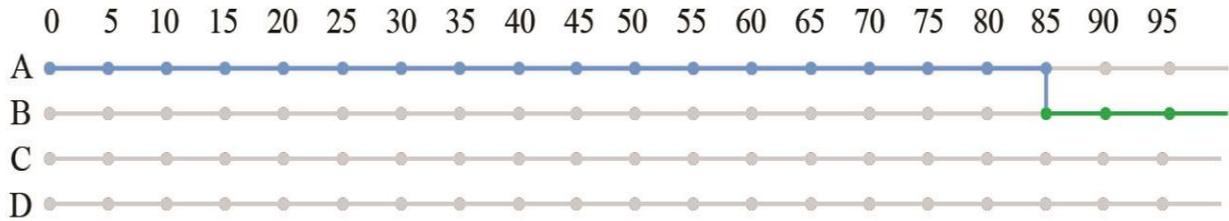


Figure 6.5 - Scénario de dégradation pouvant ne nécessiter aucune réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

Ce scénario de dégradation ne nécessite aucune réparation 20 fois sur 94 occasions pour les simulations de l'étude. Les 74 autres cas nécessitent une réparation à 85 ans. Ce choix s'explique par les différentes possibilités de dégradation suite à la réparation. En effet, puisque la détérioration est aléatoire suite à la réparation, la méthodologie vient affecter le choix de réparation optimal. Dans ce cas-ci, par exemple, une réparation à 85 ans est seulement souhaitable si aucune détérioration ne se produit par la suite (cas b). Si une détérioration avait à se produire après la réparation (cas c), il serait préférable de ne pas entreprendre de réparation (cas a). Ce phénomène est démontré à la Figure 6.6 à l'aide des valeurs actualisées nettes selon la détérioration suite à la réparation

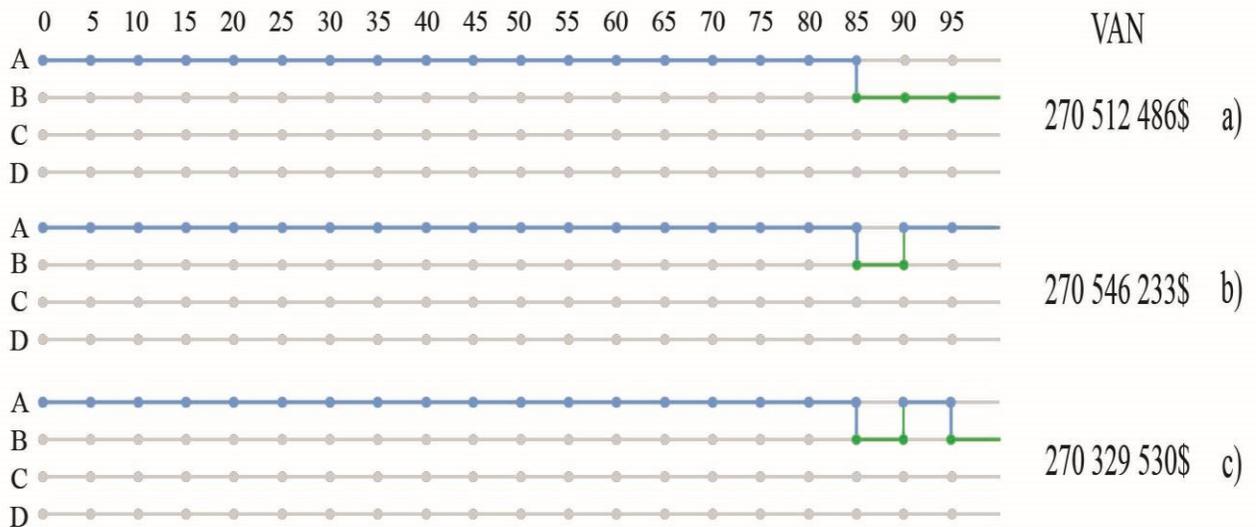


Figure 6.6 - Valeur actualisée nette pour une dalle se dégradant à 85 ans a) sans réparation b) avec réparation à 85 ans et sans détérioration par la suite c) avec réparation à 85 ans et avec détérioration à 95 ans pour une détérioration markovienne avec paramètres financiers et de débit déterministes

Il est aussi possible de constater que pour une décision tardive comme celle-ci, la valeur actualisée nette ne varie presque pas entre les choix possibles. Cela s'explique par l'actualisation des valeurs en fin de vie. Ces valeurs sont énormément dépréciées par le taux d'intérêt. Ainsi, une telle décision a peu d'impact sur le portefeuille du gestionnaire.

Pour les autres cas, davantage d'informations sont nécessaires pour établir une corrélation entre la dégradation et la réparation. Le premier renseignement pertinent pour y arriver est l'état dans lequel le pont (dalle) se trouve lors de la réparation. Cette répartition est présentée à la Figure 6.7.

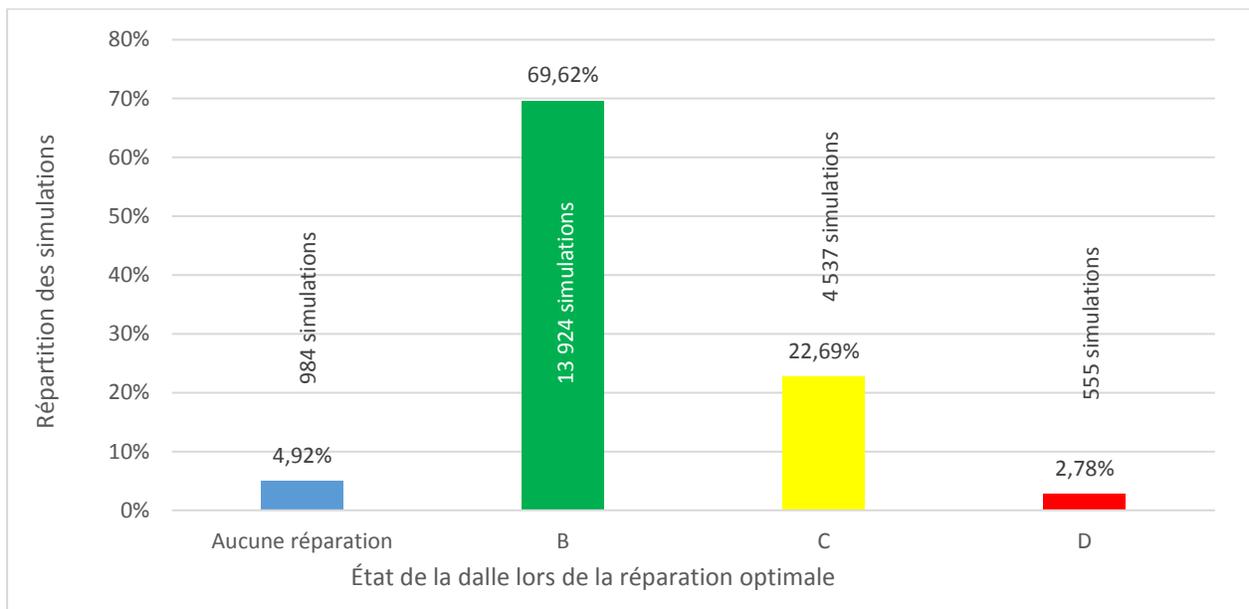


Figure 6.7 - Répartition des états de la dalle (pont) lors de la réparation optimale pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

Bien que la majorité des réparations soient effectuées alors que la dalle se trouve toujours à l'état B, il est intéressant de pousser l'étude et de tenter d'expliquer ce qui peut expliquer un choix différent et de faire des liens avec le graphique du moment optimal de réparation. La combinaison des deux informations est d'ailleurs présentée à la Figure 6.8. Pour faciliter la lecture de la figure, les valeurs sont répertoriées au Tableau 6.8.

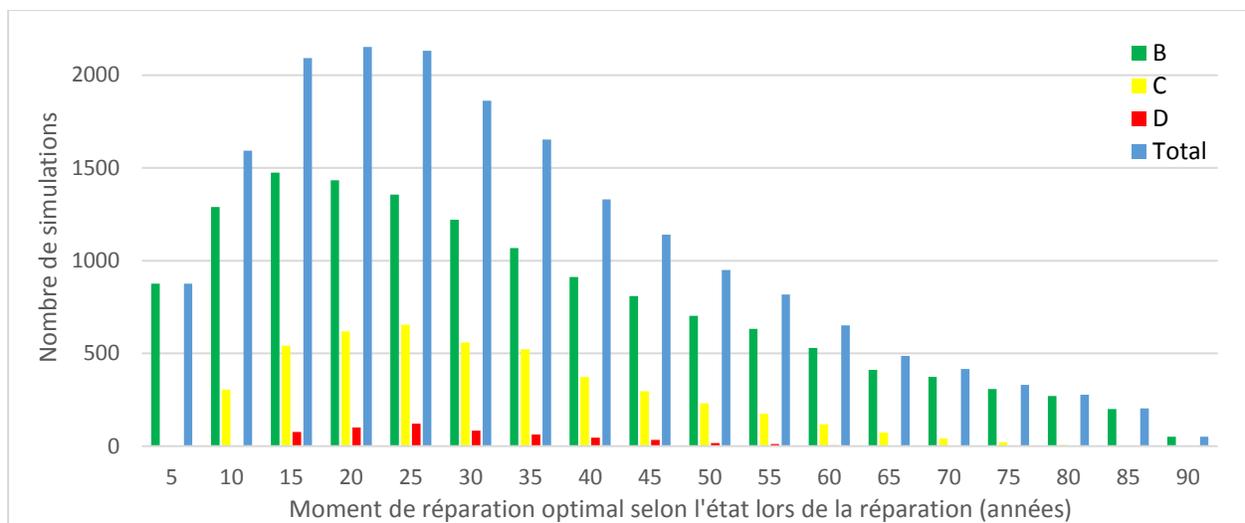


Figure 6.8 - Répartition des moments optimaux de réparation selon l'état lors de la réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

Tableau 6.8 - Répartition des moments optimaux de réparation selon l'état lors de la réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

		État lors de la réparation			Total
		B	C	D	
Moment optimal de réparation (années)	5	876	0	0	876
	10	1289	305	0	1594
	15	1475	541	77	2093
	20	1434	618	101	2153
	25	1356	654	122	2132
	30	1221	558	83	1862
	35	1068	522	63	1653
	40	912	373	45	1330
	45	810	297	33	1140
	50	703	231	16	950
	55	633	174	11	818
	60	530	118	4	652
	65	412	74	0	486
	70	374	42	0	416
	75	309	21	0	330
80	270	7	0	277	
85	201	2	0	203	
90	51	0	0	51	

Puisque l'objectif est toujours de maximiser la valeur actualisée nette, il faut se demander ce qui permet d'augmenter cette valeur tout en acceptant une plus grande détérioration avant la réparation. Une réparation hâtive est toujours souhaitable pour maximiser les revenus. Les revenus hâtifs ont un plus grand impact en raison de l'actualisation des valeurs et sont ainsi favorisés. Par contre, tel que mentionné précédemment, la méthodologie a aussi un impact sur la décision. En effet, puisque la méthodologie permet une dégradation complètement aléatoire suite à toute réparation, il est possible qu'un scénario de réparation hâtif engendre également une nouvelle dégradation hâtive suite à cette réparation. Ces scénarios ne maximisent généralement pas la valeur nette et il faut alors attendre un peu plus longtemps avant la réparation. Un autre phénomène explique aussi le délai avant la réparation. Puisqu'une seule réparation est possible sur la durée de vie du pont, la réparation peut être retardée afin d'atténuer l'atteinte de l'état D trop rapidement suite à la réparation, ce qui empêcherait la création de revenus. L'atteinte de l'état D (dégradation complète de la dalle) ayant lieu en moyenne après 55 ans, il est possible que des dalles avec dégradations initiales très sévères et rapides soient maintenues dans de mauvais états pendant quelques années afin d'optimiser la période post-réparation. Dans ce cas, le nombre d'années dans l'état D (durant la période post-réparation) se trouve ainsi minimisé.

Ces explications sont observables en analysant le délai entre l'atteinte de l'état de réparation (dégradation menant à l'état B ici) et le moment où la réparation est effectuée. Les réparations dans l'état B, soit 70% des simulations, sont effectuées entre 0 et 50 ans après l'atteinte de cet état. Le temps d'attente avant la réparation est présenté à la Figure 6.9.

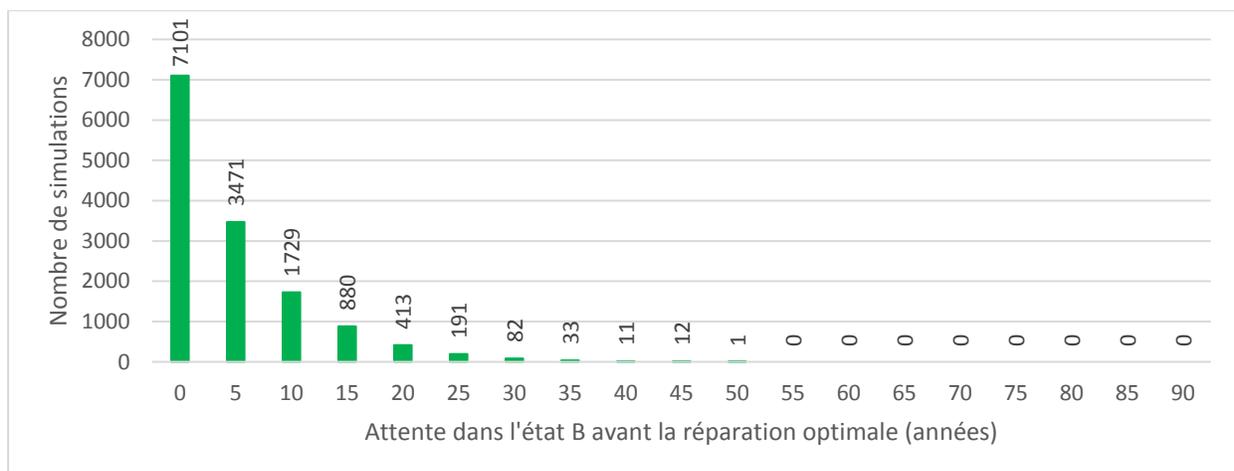


Figure 6.9 - Temps d'attente dans l'état B avant la réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

Il est possible de constater que la majorité des réparations se font dans les 15 premières années après la première détérioration, confirmant l'avantage d'une réparation hâtive. La variabilité dans le temps d'attente présenté à la Figure 6.9 peut s'expliquer par les dégradations suite à la réparation. Les cas plus tardifs s'expliquent par la minimisation de la période de temps total (avant et après la réparation) dans l'état D, tel qu'expliqué précédemment. En effet, les simulations où le temps entre la détérioration à l'état B et la réparation à l'état B est supérieure à 25 ans sont des scénarios où la réparation optimale est effectuée avant 55 ans (88% des cas). Ainsi, l'attente prolongée permet d'éviter l'atteinte de l'état D prolongée suite à la réparation.

Lorsque la réparation s'effectue dans l'état C, une réparation rapide après l'atteinte de cet état est aussi privilégiée. Le temps d'attente dans cet état avant la réparation est présenté à la Figure 6.10.

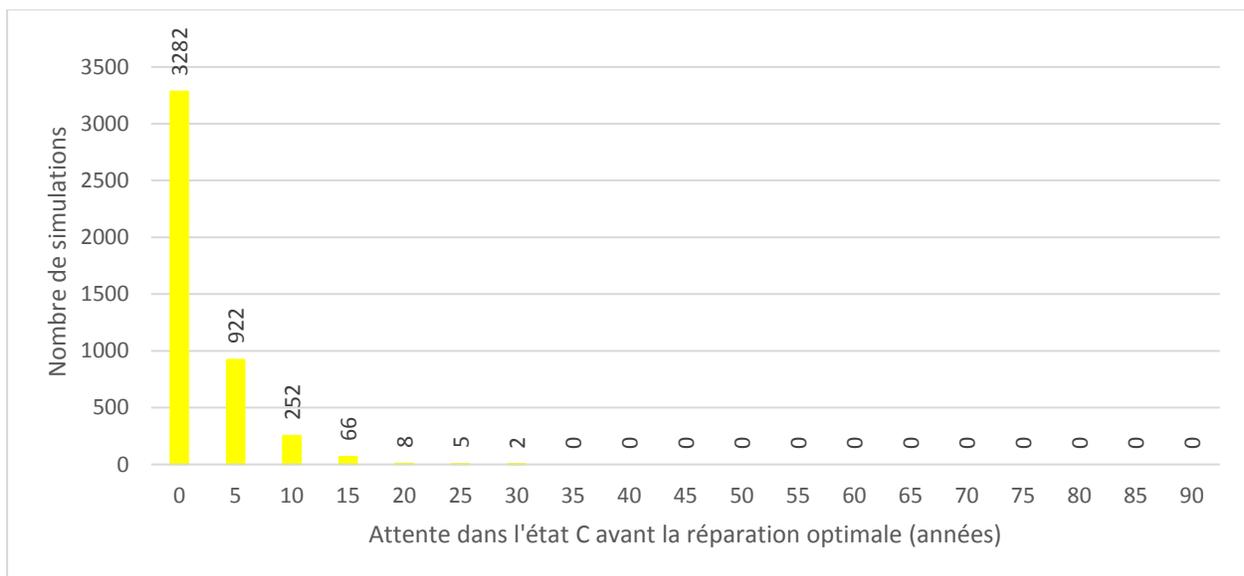


Figure 6.10 - Temps d'attente dans l'état C avant la réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

Encore une fois, le temps d'attente est très court avant la réparation. Pour la majorité des cas, il y a moins de 5 ans d'attente. Ces temps d'attente s'expliquent principalement par une dégradation rapide du pont. En effet, pour les délais de plus de 10 ans, les réparations sont optimales entre 25 et 60 ans de la vie de la dalle. L'explication pour minimiser le temps en D est alors privilégiée pour cette décision. Les réparations dans l'état C avec une date optimale hâtive (moins de 25 ans sur la Figure 6.29) sont principalement des cas où le passage entre B et C est très rapide. Ainsi, l'attente pour réparer s'explique par la détérioration post-réparation. En effet, bien qu'une réparation hâtive

suite à une détérioration en B soit normalement souhaitable, il faut tout de même s'assurer la pérennité de la structure suite à cette réparation. Il faut parfois retarder la réparation pour éviter une nouvelle détérioration rapide. Le cas a) de la Figure 6.11 démontre une réparation hâtive défavorable. Il faut alors favoriser le scénario du cas b) de la Figure 6.11 où la réparation est légèrement retardée.

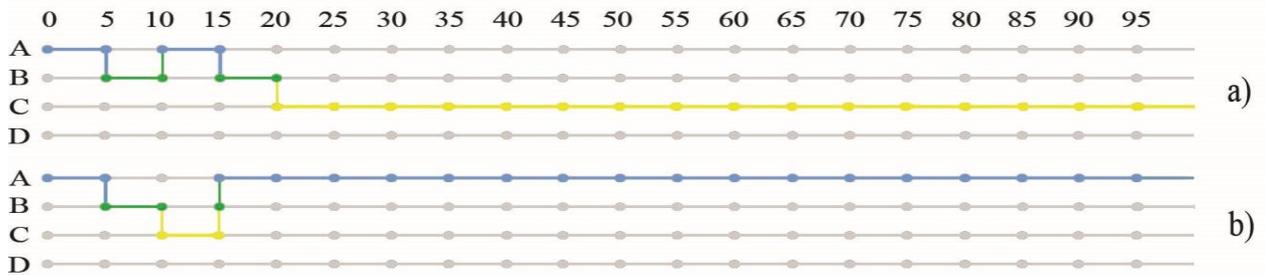


Figure 6.11 - Réparation hâtive suivie a) d'une détérioration rapide b) d'un maintien en bon état

Finalement, les réparations dans l'état D sont peu nombreuses et effectuées très rapidement tel que démontré à la Figure 6.12. Ce résultat est plutôt rare et serait à proscrire en réalité puisque l'atteinte de l'état D présente un risque pour la sécurité des usagers. Pour l'étude, cet état représente simplement que le pont ne produit plus de richesse. Puisque l'étude se penche sur une durée de vie entière avec une seule réparation possible, il est donc normal de voir cet état atteint.

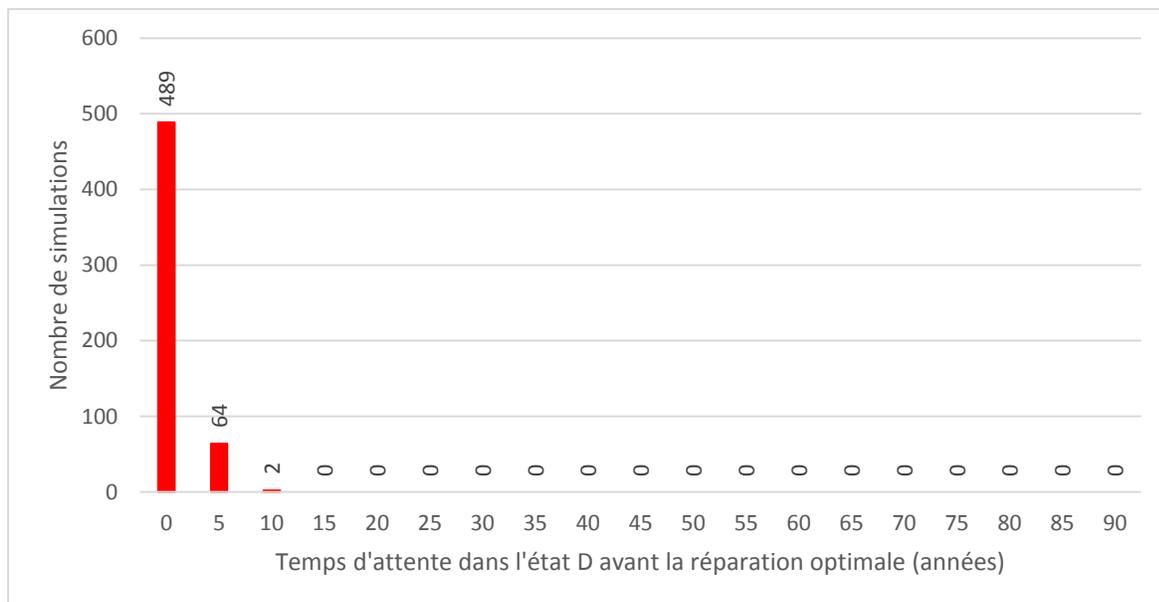


Figure 6.12 - Temps d'attente dans l'état D avant la réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

La réparation est très hâtive une fois l'état D atteint puisqu'aucun revenu n'est comptabilisé lorsque cet état est atteint. Une réparation peut être optimale à l'état D afin de minimiser le temps total passé dans cet état (avant et après la réparation), tel qu'expliqué précédemment. Il est aussi possible de constater que les simulations où la réparation optimale se produit dans l'état D sont des simulations où la détérioration est très rapide et sévère. En effet, la majorité des cas ont une réparation optimale avant 40 ans de vie de la structure. L'état D est donc atteint en très bas âge de la dalle et bien en dessous de la moyenne théorique de 55 ans.

Afin de vérifier les hypothèses présentées pour expliquer certaines réparations tardives lors de dégradations sévères, un bloc de 1 000 simulations a été réalisé. Pour ce bloc, il était possible de réparer la dalle à deux reprises sur sa durée de vie. Le moment optimal de la première et la seconde réparation est présenté à la Figure 6.13. Dans les deux cas, la colonne où le moment optimal est de 0 représente les situations pour lesquelles la première ou deuxième réparation n'est pas nécessaire.

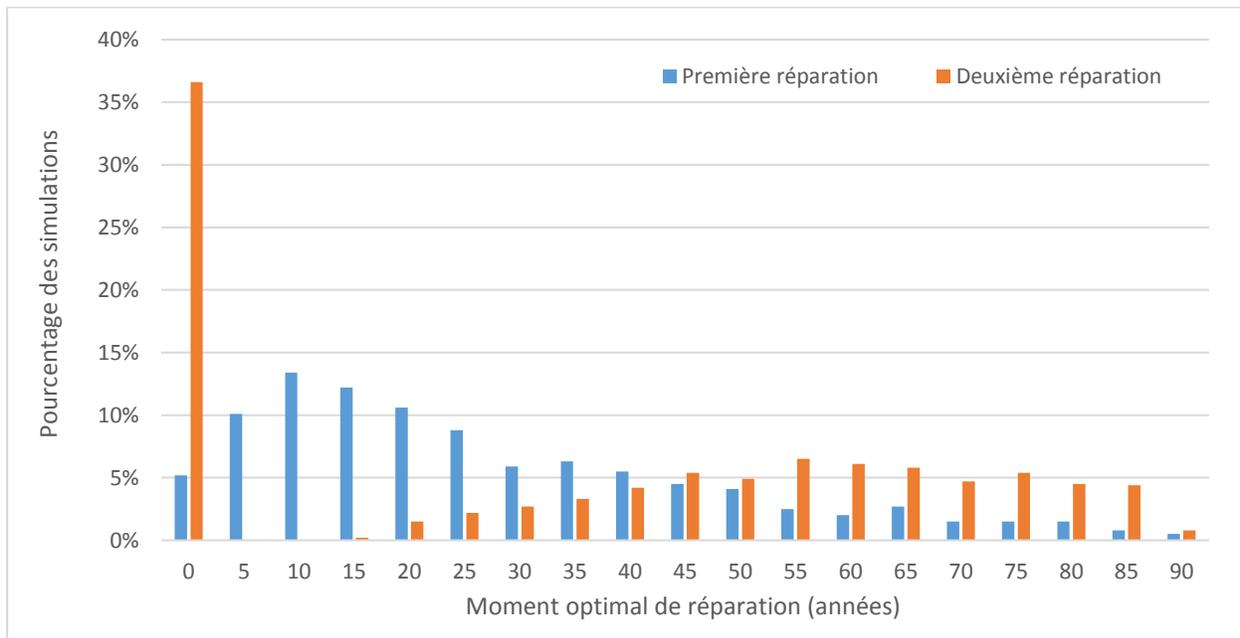


Figure 6.13 - Scénario optimal de réparation lorsque deux réparations sont possibles sur la durée de vie d'une dalle de béton armé de pont pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

Cette figure permet de voir que la seconde réparation est nécessaire pour plus de 60% des simulations. Cette approche permet d'effectuer une première réparation plus rapidement pour ensuite effectuer une nouvelle remise à neuf de la dalle sur le reste de la durée de vie.

Il faut aussi examiner dans quel état ces réparations sont effectuées. Il a été mentionné précédemment que les réparations dans l'état D lorsqu'une seule réparation est possible sont le résultat de la minimisation du temps passé dans l'état D (avant et après la réparation). L'état lors des réparations est présenté à la Figure 6.14.

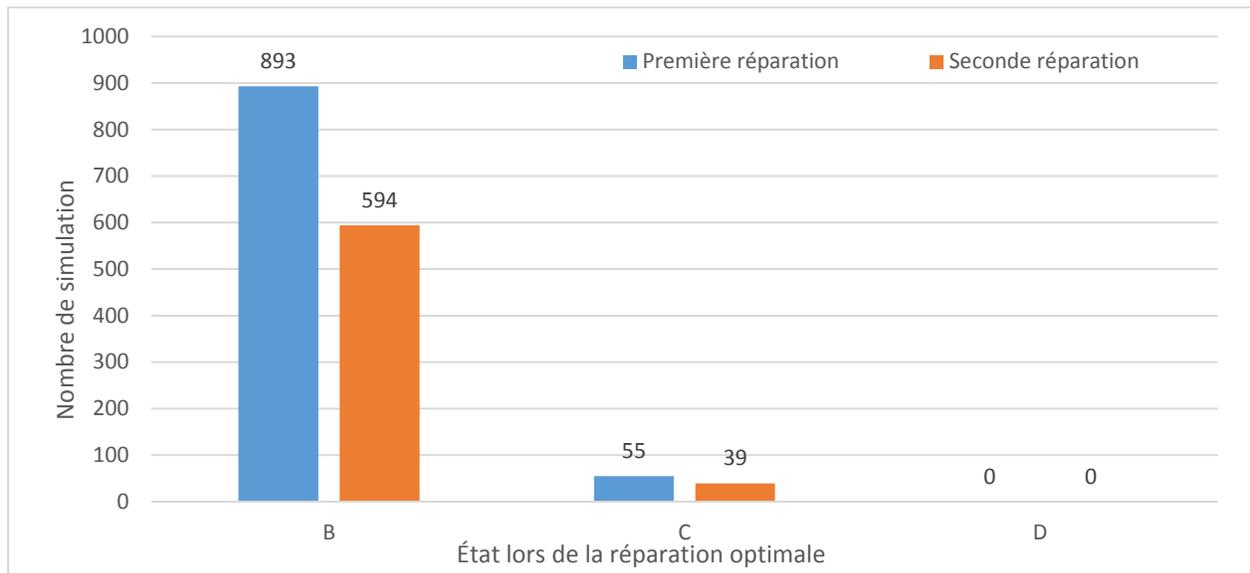


Figure 6.14 - État lors de la réparation optimale lorsque deux réparations sont possibles pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

Cette figure confirme les hypothèses d'impacts de la méthodologie sur les résultats. En effet, lorsque deux réparations sont possibles, aucune dalle n'atteint l'état D avant la réparation. Les quelques réparations dans l'état C s'expliquent encore une fois par les raisons données lorsqu'une seule réparation est possible, c'est-à-dire que la réparation est reportée pour éviter une détérioration post-réparation trop rapide et, ainsi, maximiser les revenus. Ces cas sont cependant beaucoup moins fréquents lorsque deux réparations sont possibles. À la lumière de ces explications, il faut donc réparer la dalle le plus tôt possible pour maximiser le rendement. Selon ce modèle, une réparation dans l'état B est à privilégier et le temps d'attente avant la réparation dépend de la durée de vie voulue pour le pont et l'anticipation de la dégradation suite à la réparation.

6.1.2.2 Paramètres financiers et de débit routier stochastiques

Avec l'utilisation de valeurs financières et de débit stochastique, le modèle de détérioration markovien n'est plus le seul à influencer l'année optimale de réparation. Il est à noter que les mêmes détériorations que celles considérées dans la section 6.1.2.1 et les mêmes variables

financières et de débit que celles considérées dans la section 6.1.1.2 sont utilisées pour cette simulation. Pour ce cas, la répartition du moment optimal de réparation pour 20 000 simulations est présentée à la Figure 6.15.

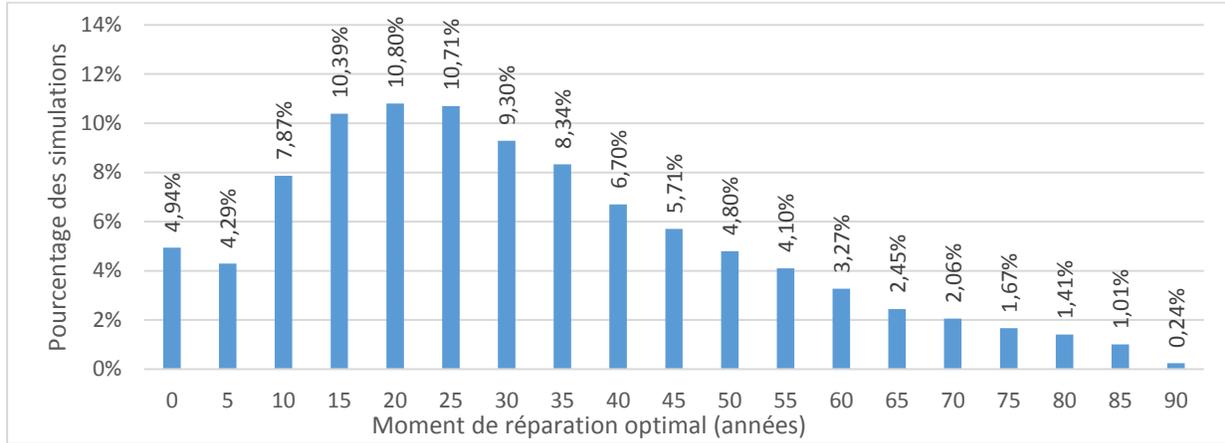


Figure 6.15 - Répartition des simulations en fonction du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit stochastiques

La répartition est plutôt semblable au cas précédent (Figure 6.3), lorsque les paramètres étaient déterministes. Encore une fois, le choix optimal est très varié et est principalement lié à la volatilité de la détérioration markovienne. Cette fois-ci, les paramètres financiers et de débit routier ont aussi un léger effet sur la variabilité du moment optimal de réparation.

Avant de poursuivre l'analyse, il est aussi intéressant de savoir l'état lors de la réparation optimale afin de mieux comprendre ce qui explique le choix de réparer. Ce renseignement est fourni par la Figure 6.16.

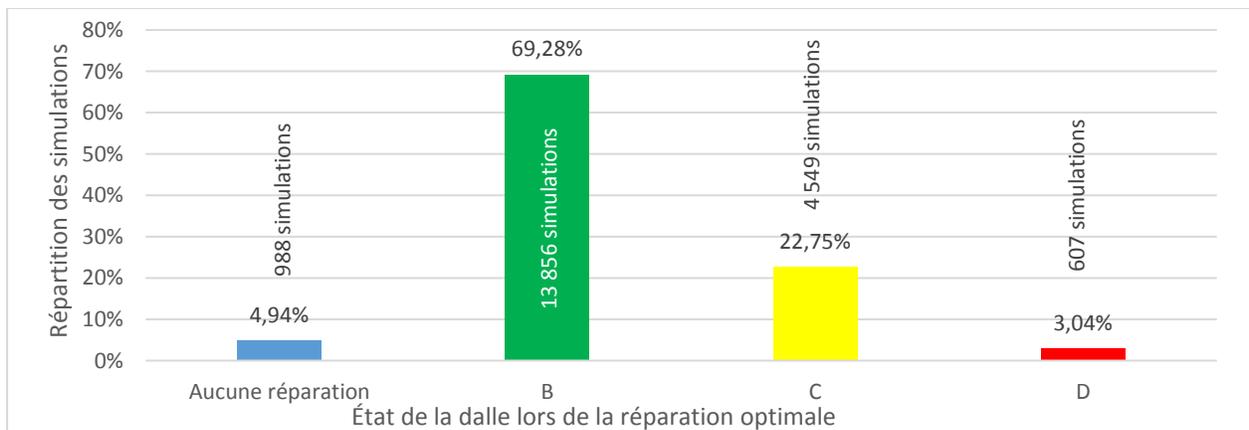


Figure 6.16 - Répartition des états de la dalle en béton armé lors de la réparation optimale pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit stochastiques

Afin de faire une analyse complète sur l'impact des paramètres stochastiques, il est nécessaire de comparer avec le cas markovien où les paramètres sont déterministes. En effet, la détérioration étant la même dans les deux cas, il est possible de mieux cerner l'impact d'ajout de paramètres financiers et de débit stochastiques.

Dans un premier temps, en comparant les années optimales de réparation, il est possible de constater que l'impact des paramètres stochastiques sur ce modèle est minime. La différence de temps pour la réparation optimale pour le modèle avec les paramètres stochastiques par rapport au modèle avec paramètres déterministes est présentée à la Figure 6.17.

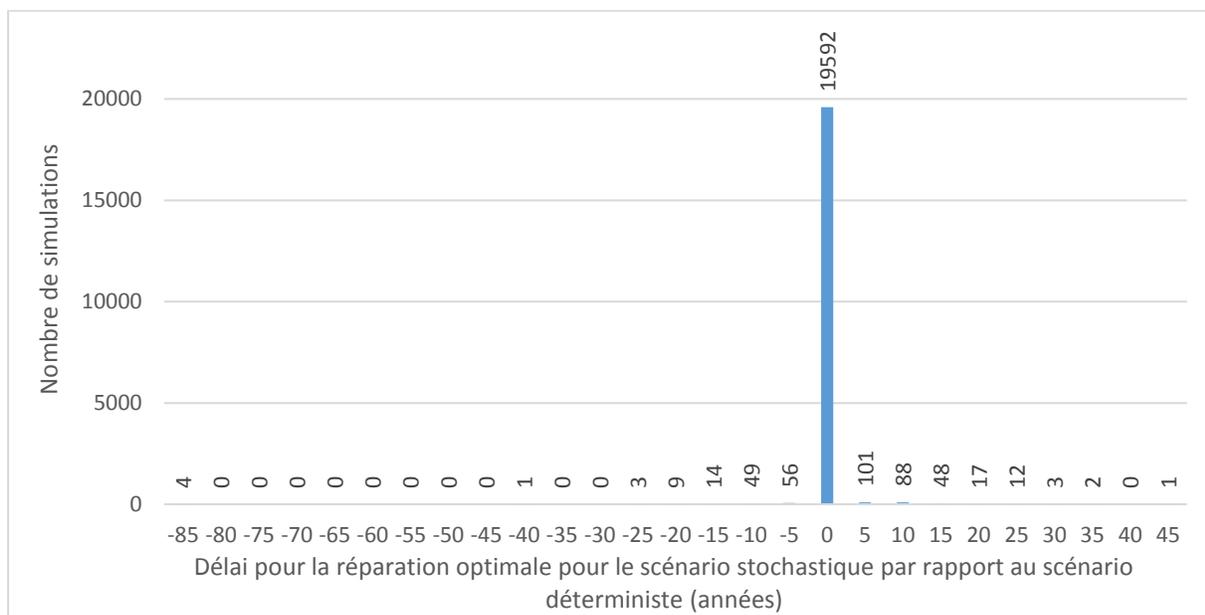


Figure 6.17 - Répartition du délai pour la réparation optimale pour le scénario avec paramètres financiers et de débit stochastiques par rapport au scénario à paramètres financiers et de débit déterministes pour une détérioration markovienne

Pour la grande majorité des simulations (98%), l'utilisation de paramètres financiers et de débit stochastiques n'a aucun impact sur la décision du moment optimal pour réparer. Les simulations où le temps est modifié ont peu de différences entre leurs valeurs actualisées nettes pour les différents moments de réparation. Les paramètres stochastiques peuvent alors venir influencer la décision. Comme pour la détérioration déterministe, c'est le taux d'intérêt qui a le plus gros impact sur la décision, ce dernier étant plus volatile dans le modèle. Ainsi, un taux d'intérêt élevé favorise une réparation hâtive puisque les valeurs en fin de vie du pont ont peu d'impact sur la valeur

actualisée nette. À l'inverse, un taux d'intérêt bas favorise les réparations tardives puisqu'il y a alors une plus grande valorisation des revenus en fin de vie.

L'état lors de la réparation est encore moins affecté par la modification des paramètres financiers et de débit. En effet, seulement 229 des 20 000 simulations (1,1%) sont réparées dans un état différent lorsque les paramètres passent de déterministes à stochastiques. Le nombre de simulations pour chaque état lors de la réparation selon le type de paramètre utilisé est présenté au Tableau 6.9.

Tableau 6.9 – Nombre de simulations pour chaque état lors de la réparation optimale selon le type de paramètres utilisé pour une détérioration markovienne

		Nombre de simulations pour chaque état de réparation avec paramètres stochastiques				
		Aucune réparation	B	C	D	
Nombre de simulations pour chaque état de réparation avec paramètres déterministes	Aucune réparation	984	0	0	0	984
	B	4	13804	79	37	13 924
	C	0	38	4456	43	4 537
	D	0	14	14	527	555
		988	13 856	4 549	607	

Parmi les données à considérer dans ce tableau, il faut noter les quatre simulations qui étaient réparées à l'état B avec paramètres déterministes qui ne nécessitent maintenant plus aucune réparation. Ces quatre simulations ont la détérioration présentée à la Figure 6.5 précédemment, c'est-à-dire que lorsqu'aucune réparation n'est effectuée, cette dalle se maintient dans l'état A jusqu'à 85 ans pour demeurer dans l'état B de 85 à 100 ans. Il s'agit donc des quatre simulations qui pouvaient sembler aberrantes avec une variation de -85 ans sur la Figure 6.20. Or, il s'agit simplement de cas où les paramètres financiers font varier suffisamment les valeurs actualisées nettes entre le scénario de réparation à 85 ans et le scénario d'aucune réparation. Il faut rappeler que la différence de valeurs actualisées nettes entre les différents scénarios de réparation pour une telle dégradation est faible. Cet aspect avait été présenté à la Figure 6.6 précédemment.

Les mêmes observations sur le temps de réparation et l'état lors de la réparation peuvent être faites lorsque deux réparations sont possibles sur la durée de vie. La première réparation sera plus hâtive

et il n'y aura plus de réparation dans l'état D puisque la minimisation du temps passé dans cet état sur la durée de vie est moins nécessaire. Avec un échantillon de 1 000 simulations, les moments optimaux de réparation lorsque deux réparations sont possibles sur la durée de vie sont présentés à la Figure 6.18.

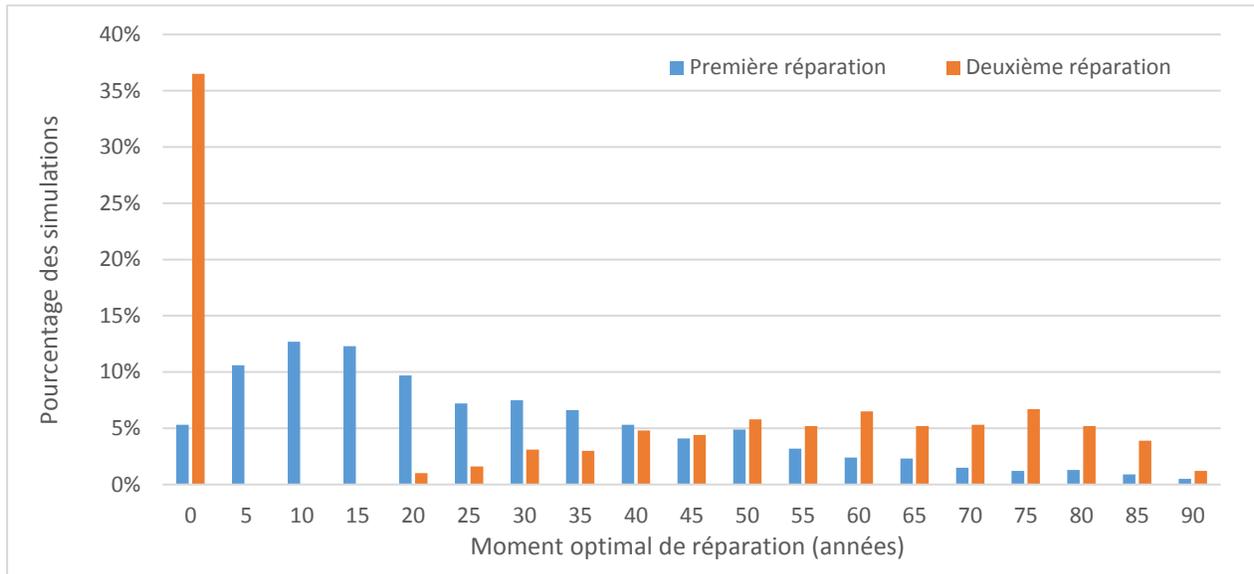


Figure 6.18 - Répartition du moment optimal de réparation lorsque deux réparations sont possibles sur la durée de vie pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit stochastiques

L'état lors des réparations optimales est présenté à la Figure 6.19.

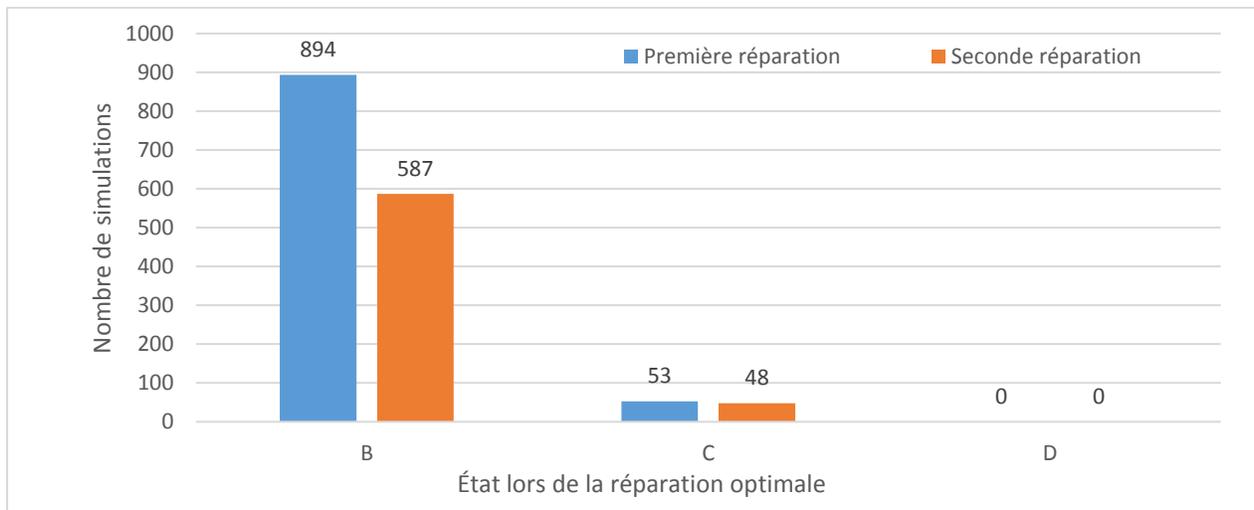


Figure 6.19 - État lors de la réparation optimale lorsque deux réparations sont possibles pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit stochastiques

Malgré l'ajout de paramètres financiers et de débit stochastiques, la philosophie de réparation demeure la même que lorsque ces mêmes paramètres sont considérés déterministes. Il faut réparer la dalle le plus tôt possible pour optimiser le rendement. La décision peut être avancée ou retardée jusqu'à 10 ans dans le cas où l'économie (le taux d'intérêt) serait dans des cas extrêmes.

6.1.3 Détérioration stochastique de la dalle

La détérioration stochastique de la dalle en béton armé signifie que l'ensemble du pont est représenté par la dalle en béton armé et l'état de celle-ci est réparti entre quatre états possibles (A, B, C et D). La détérioration est stochastique puisqu'elle suit une matrice de détérioration qui évolue de façon aléatoire.

6.1.3.1 Paramètres financiers et de débit routier déterministes

Encore une fois pour ce modèle de détérioration, lorsque les valeurs financières et de débit sont déterministes, seule la variabilité de la détérioration affecte la décision de réparer. Avec ce modèle de détérioration, une infinité de chemins de détérioration est possible. Seul le critère subjectif de vitesse de dégradation peut aider à prendre une décision optimisée. La répartition du moment optimal pour réparer pour les 20 000 simulations est présentée à la Figure 6.20.

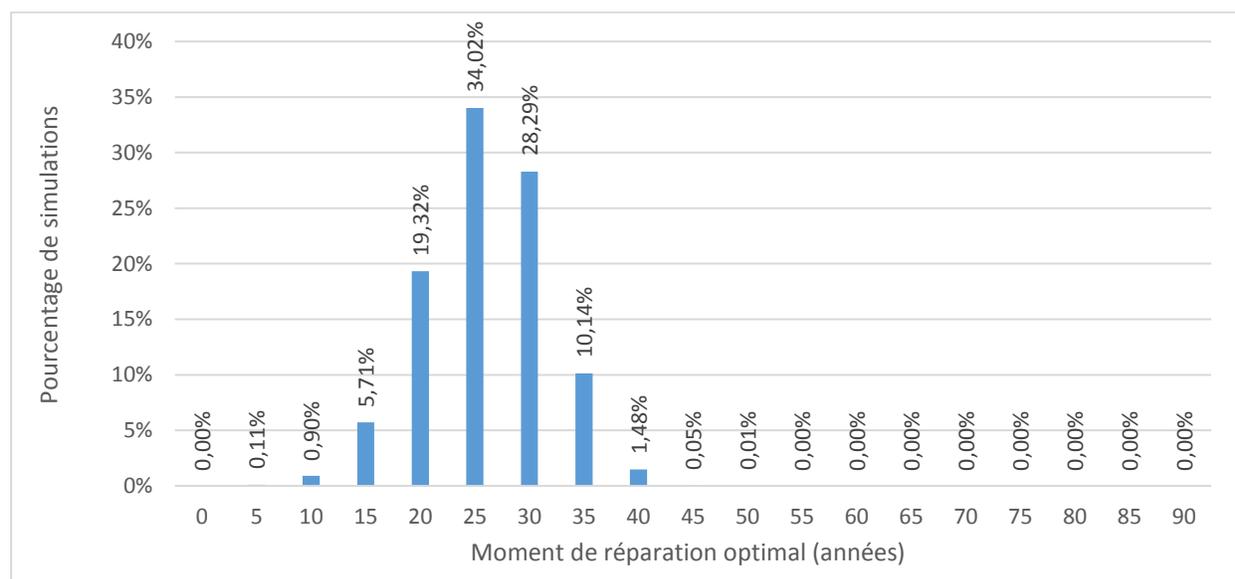


Figure 6.20 - Répartition des simulations selon la date optimale de réparation pour une détérioration stochastique et des paramètres financiers et de débit déterministes

Grâce à l'incertitude ajoutée sur la dégradation, il est possible de remarquer une dispersion des moments optimaux de réparation par rapport à l'approche déterministe. Pour la majorité des

simulations, une réparation entre 20 et 35 ans est suggérée. Pour comprendre ces résultats, il faut étudier l'évolution de la détérioration pour chaque scénario optimal afin de comprendre quels cas nécessitent des réparations plus hâtives ou tardives.

Pour bien visualiser l'évolution de la détérioration, l'étude se fera en deux temps. Premièrement, les simulations où le moment de réparation optimal est de 35 ans ou plus sont étudiées. Pour l'étude, les simulations sont regroupées par moment optimal de réparation. La détérioration moyenne sur la durée de vie du pont d'un groupe de simulations permet de construire chaque courbe de la Figure 6.21. Les courbes sont aussi comparées à la détérioration du modèle de détérioration déterministe présenté à la section 6.1.1.

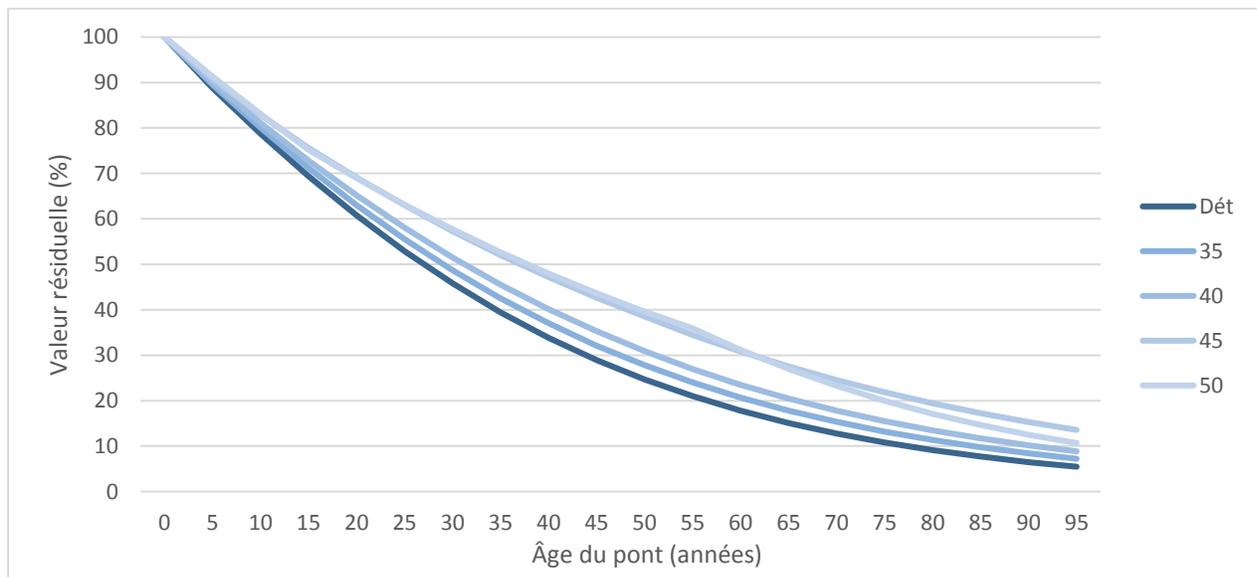


Figure 6.21 - Évolution de la valeur résiduelle moyenne pour les simulations réparées après 30 ans pour une détérioration stochastique avec des paramètres financiers et de débit déterministes

Il est donc possible de constater que si la dégradation est plus lente que celle du cas déterministe, la date optimale de réparation est plus tardive. Il est effectivement logique de retarder la réparation si le pont demeure en bon état sur une plus longue période. Il y a corrélation directe : plus la dégradation est lente, plus la réparation est tardive.

La seule exception est la réparation à 50 ans (Figure 6.21). La détérioration est initialement plus lente que les simulations où la réparation est effectuée à 45 ans, mais la détérioration s'accélère en fin de vie. Il faut cependant faire attention avant de tirer des conclusions sur ce lot de simulations

puisque une seule simulation correspond à une réparation optimale à 50 ans. Il s'agit donc d'un cas très rare et il est difficile d'en tirer une tendance véritable.

Deuxièmement, le même processus est répété pour les résultats de simulation indiquant que la réparation optimale a lieu avant 35 ans. Les simulations sont regroupées par moment optimal de réparation. La détérioration moyenne sur la durée de vie du pont d'un groupe de simulations permet de construire chaque courbe de la Figure 6.22. Les courbes sont aussi comparées à la détérioration du modèle de détérioration déterministe présenté à la section 6.1.1. Puisque les données sont très condensées, les valeurs résiduelles aux 5 ans pour chacune des courbes sont présentées au Tableau 6.10.

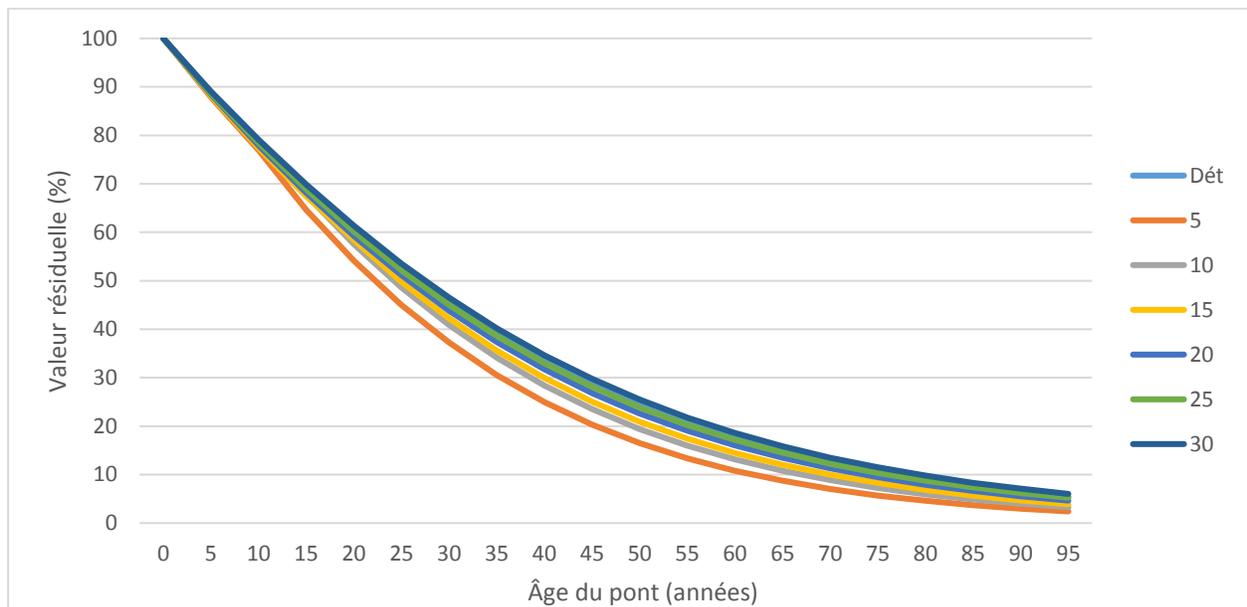


Figure 6.22 - Évolution de la valeur résiduelle moyenne pour les simulations réparées avant 35 ans pour une détérioration stochastique avec des paramètres financiers et de débit déterministes

Tableau 6.10 - Détérioration moyenne pour les simulations réparées avant 35 ans pour une détérioration stochastique avec des paramètres financiers et de débit déterministes

		Valeur résiduelle selon le moment de réparation optimal (%)						
		Dét	5	10	15	20	25	30
Âge du pont (années)	0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	5	88,80	87,88	88,25	88,15	88,42	88,68	89,01
	10	78,70	76,87	77,56	77,39	77,90	78,41	79,08
	15	69,37	64,63	67,70	67,46	68,19	68,91	69,86
	20	60,76	54,12	57,50	58,39	59,26	60,14	61,34
	25	52,89	45,02	48,62	49,78	51,17	52,17	53,54
	30	45,79	37,21	40,86	42,23	43,81	45,01	46,50
	35	39,45	30,57	34,13	35,64	37,34	38,61	40,22
	40	33,85	24,98	28,38	29,94	31,70	33,00	34,64
	45	28,95	20,34	23,51	25,06	26,82	28,11	29,74
	50	24,68	16,51	19,41	20,92	22,64	23,89	25,47
	55	20,99	13,37	15,99	17,42	19,06	20,26	21,78
	60	17,82	10,82	13,15	14,48	16,02	17,15	18,59
	65	15,10	8,74	10,80	12,02	13,45	14,50	15,85
	70	12,78	7,06	8,86	9,97	11,28	12,25	13,50
	75	10,80	5,70	7,27	8,27	9,46	10,35	11,50
	80	9,12	4,60	5,96	6,85	7,92	8,73	9,79
85	7,69	3,71	4,88	5,67	6,64	7,37	8,33	
90	6,49	3,00	4,00	4,70	5,56	6,21	7,08	
95	5,47	2,42	3,28	3,89	4,65	5,24	6,03	

Cette figure est plus difficile à examiner, car les courbes sont très rapprochées. Pour cette raison, il faut se baser sur le tableau de données sous le graphique. Le premier élément à noter de cette figure est que les détériorations les plus rapides (ou les valeurs résiduelles plus faibles) correspondent à des réparations hâtives. Ainsi, une détérioration similaire au modèle déterministe suggère une réparation à 25 ou 30 ans, le même résultat que pour le modèle déterministe. Une certaine variabilité des résultats peut, encore une fois, s'expliquer par la variabilité dans la détérioration post-réparation et sur l'optimisation de la valeur résiduelle sur la durée de vie. Ainsi, une réparation pourra être retardée pour assurer une haute valeur résiduelle sur la durée de vie de la structure.

À la lumière des résultats de la Figure 6.20, une détérioration moyenne nécessite une réparation entre 20 et 35 ans. Une différence marquée de la vitesse de détérioration vient affecter le choix, ce qui prouve que la variabilité de la détérioration doit être prise en compte lors de la planification des interventions sur les ponts afin d'avoir une meilleure gestion financière du budget attribué aux ouvrages.

6.1.3.2 Paramètres financiers et de débit routier stochastiques

Avec l'utilisation de valeurs financières et de débit stochastique, le modèle de détérioration stochastique n'est plus le seul à influencer l'année optimale de réparation. Il est à noter que les mêmes détériorations que celles de la section 6.1.3.1 et les mêmes variables financières et de débit que celles de la section 6.1.1.2 et 6.1.2.2 sont utilisées pour cette simulation. L'analyse pour les 20 000 simulations suggère que le moment optimal pour réparer est réparti tel que présenté à la Figure 6.23.

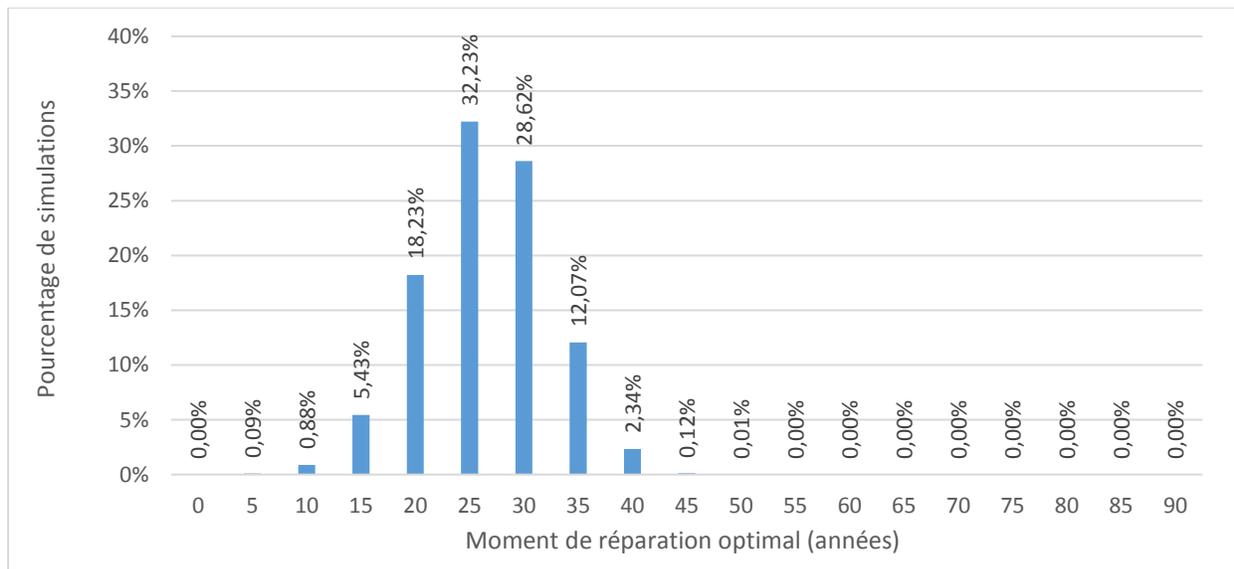


Figure 6.23 - Répartition des simulations selon la date optimale de réparation pour une détérioration stochastique et des paramètres financiers et de débit stochastiques

L'incertitude ajoutée par les paramètres financiers et de débit semble avoir peu d'effet sur le choix optimal de réparation. En comparant les dates optimales de réparation simulation par simulation, il est possible de savoir la variation causée par l'ajout de paramètres stochastiques. Le délai de réparation créé par l'ajout de paramètres stochastiques par rapport au cas où les paramètres sont déterministes est présenté à la Figure 6.24. Les valeurs positives indiquent que l'ajout de paramètres stochastiques retarde la réparation, alors que les valeurs négatives indiquent que l'ajout de paramètres stochastiques accélère la réparation.

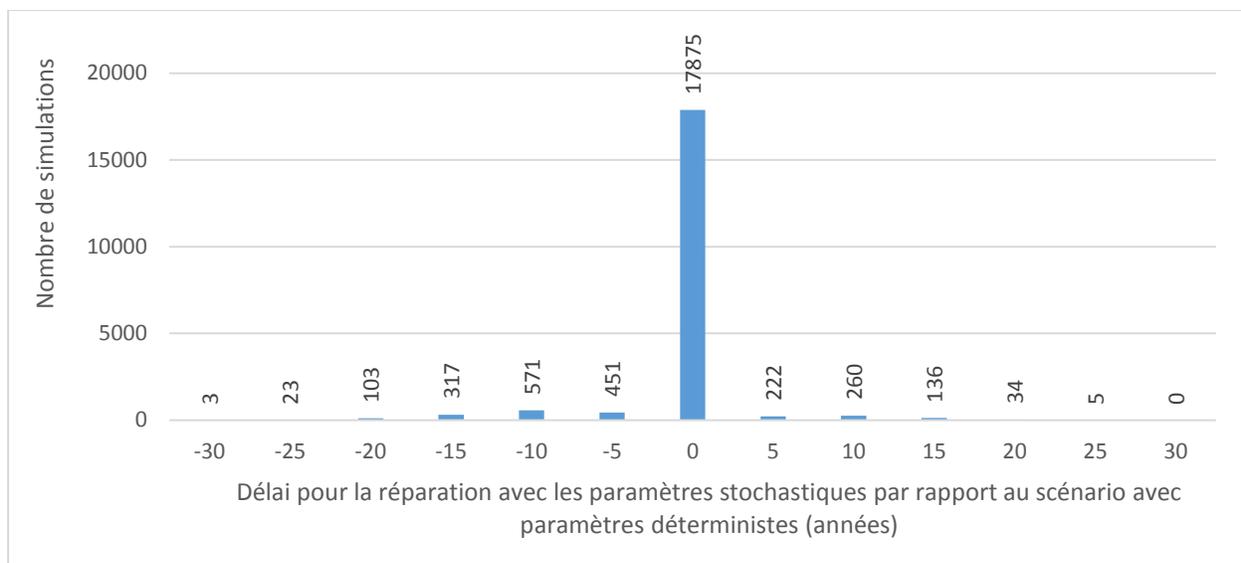


Figure 6.24 – Délai pour la réparation optimale pour le scénario avec paramètres financiers et de débit stochastiques par rapport aux paramètres financiers et de débit déterministes pour une détérioration stochastique

Pour la majorité des cas (89%), il n’y a aucun impact sur le moment optimal de réparation que les variables financières et de débit soient déterministes ou stochastiques. Encore une fois ici, le taux d’intérêt est le facteur qui peut influencer le plus la décision. L’étalement du délai est aussi expliqué par la variabilité de la détérioration post-réparation qui peut avoir un impact important sur la date de réparation. Ainsi, une dégradation extrême suite à la réparation au moment « normalement » optimal peut retarder ladite réparation afin d’obtenir une dégradation plus favorable.

Ainsi, en plus de la variabilité de la dégradation, le taux d’intérêt doit aussi être considéré lors de la prise de décision d’investissement sur les structures. Une réparation entre 20 et 35 ans est à favoriser, mais cette décision peut varier en fonction des deux paramètres mentionnés précédemment.

6.1.4 Résumé des résultats pour l’étude de la détérioration de la dalle en béton armé

La section 6.1 visait à comparer trois modèles de détérioration sur un élément, la dalle en béton armé, afin de déterminer le moment optimal de réparation. Les trois modèles de détérioration sont le modèle déterministe, le modèle markovien et le modèle stochastique. Le modèle déterministe suit la même détérioration sur une période donnée pour une état initial donné. Le modèle markovien

fait changer l'état total d'une structure selon un tirage aléatoire à chaque période. Ainsi, l'ensemble de l'élément est représenté par un seul état à la fois. Le modèle stochastique est un modèle développé dans le cadre de cette étude où la détérioration évolue à mesure que les informations de détérioration sur la structure dans le temps sont connues.

Les résultats démontrent que pour le modèle déterministe, le moment optimal pour réparer une dalle en béton armé est de 25 ans. Ce résultat représente bien la tendance réelle où la durée de vie moyenne d'une dalle en béton armé tourne aux alentours de 25 ou 30 ans. Par contre, ce modèle de détérioration ne permet pas d'inclure aucun facteur aléatoire dans la détérioration, ce qui rend une analyse à grande échelle plus difficile.

Les résultats du modèle de détérioration markovien sont très répartis et propose une réparation optimale entre 10 et 40 ans. Par contre, il est possible que la réparation optimale soit très éloignée de cet intervalle. Cela s'explique par les conditions aléatoires du modèle puisque la probabilité de maintien en bon état d'une structure est tout de même significative (4%) après 100 ans, ce qui est peu réaliste.

Les résultats du modèle stochastique sont entre le modèle déterministe et markovien. Le moment optimal de réparation d'une dalle en béton armé serait entre 20 et 35 ans avec quelques possibilités de retarder ou devancer la réparation selon l'évolution de la détérioration.

Les résultats pour la détérioration stochastique (markovienne ou stochastique) de la dalle en béton armé montrent aussi une tendance qui serait intéressante d'approfondir pour une prochaine étude. Le résultat peut être influencer par deux aspects qui sont intrinsèque au modèle, soit la détérioration post-réparation et l'optimisation du temps dans l'état D. En effet, la réparation pourrait être retardé ou devancé de 5 à 10 ans si la détérioration post-réparation n'est pas favorable au moment normalement considéré comme optimal. Aussi, si la dalle fait face à deux détérioration rapide (avant et après la réparation), le temps de réparation peut être retardé afin de limiter la période de temps où la dalle se retrouve dans l'état D. Ce deuxième aspect imposé par la limitation du modèle à une seule réparation sur la durée de vie totale de la structure. Il pourrait être intéressant d'augmenter le nombre de réparations possibles pour diminuer l'impact de cet aspect.

Finalement, l'évolution des paramètres financiers et de débits ont aussi un impact sur le choix du moment optimal de réparation de la dalle de béton. Cet aspect peut avoir un impact jusqu'à 10 ans sur le moment optimal de réparation. Cette section a démontré que c'est principalement l'évolution du taux d'intérêt qui affecte le moment optimal de réparation.

6.2 Étude sur une dalle en béton armé et des poutres en acier

L'étude pour deux éléments doit suivre l'évolution de deux dégradations en même temps. Pour cette section, le modèle n'introduira aucun avantage à réparer les deux éléments au même moment. L'impact de ce paramètre sera étudié au chapitre suivant. Encore une fois ici, les valeurs financières et le débit journalier annuel moyen sont les mêmes pour les trois modèles de détérioration (déterministe, markovien et stochastique). Il s'agit du même ensemble de valeurs qu'utilisé précédemment. Un résumé des paramètres est présenté au Tableau 6.11 et les paramètres financiers et de débit au Tableau 6.12.

Tableau 6.11 – Valeur des paramètres pour la détérioration de deux éléments simultanément

Paramètre	Valeur	
	Dalle en béton armé	Poutres en acier
Matrice de détérioration ($[P_5]$)	$\begin{bmatrix} 0,84 & 0,16 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,71 & 0,29 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,50 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,91 & 0,09 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,87 & 0,13 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,71 & 0,29 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix}$
Coût unitaire (CU)	1 557,95\$/m ²	1 012,67\$/m ²
Nombre d'unités (NU)	1 000 m ²	2 609 m ²
Coût de construction (CC)	4 200 000\$ (type 44)	
Prix virtuel (PV)	$\frac{23,88\$}{h}$ par voiture	
Temps économisé (TS)	0,09 heure	
Pénalité d'état (PE)	[1,0 0,9 0,8 0,0]	

Tableau 6.12 - Valeur des paramètres financiers et de débit selon l'approche déterministe ou stochastique

Augmentation du Débit Journalier Moyen Annualisé
Déterministe : 1%
Stochastique : $\sim \text{Normale}(0,01; 0,0032)$
Taux d'inflation générale (π_G)
Déterministe : 1,71%
Stochastique :
$\pi_{G,q} = \pi_{G,q-1} + 0,1 \times (0,017 - \pi_{G,q-1}) + \varepsilon_{G,q}$
$\varepsilon_{G,q} = Z_{G,q} = \sigma_G \times dW_{G,q} = \frac{\sqrt[2]{0,015}}{100} \times dW_{G,q}$
$\pi_{G,t} = \prod_{q=4t+1}^{4(t+1)} \left(1 + \frac{\pi_{G,q}}{4}\right) - 1$
Taux d'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre (π_M)
Déterministe : 3,24%
Stochastique :
$\pi_{M,q} = \pi_{M,q-1} + 0,1 \times (0,032 - \pi_{M,q-1}) + \varepsilon_{M,q}$
$\varepsilon_{M,q} = R[2,1] \times Z_{G,q} + R[2,2] \times Z_{M,q}$
$Z_{M,q} = \frac{\sqrt[2]{0,08}}{100} \times dW_{M,q}; \quad R[2,1] = 0,9920; \quad R[2,2] = 0,1266$
$\pi_{M,t} = \prod_{q=4t+1}^{4(t+1)} \left(1 + \frac{\pi_{M,q}}{4}\right) - 1$
Taux d'actualisation (r)
Déterministe : 5,55%
Stochastique :
$rf_q = rf_{q-1} + \left(\frac{0,135}{100} - \frac{3,95}{100} rf_{q-1}\right) + R[3,1] \times Z_{G,q} + R[3,2] \times Z_{M,q} + R[3,3] \times Z_{r,q}$
$Z_{r,q} = \frac{0,3585}{100} \times (rf_{q-1})^{0,1946} \times dW_{r,q}; \quad R[3,1] = -0,1413; \quad R[3,2] = 0,5753; \quad R[3,3] = 0,8057$
$r_t = rf_t + \beta \times (rm_t - rf_t) = \left[\prod_{q=4t+1}^{4(t+1)} \left(1 + \frac{rf_q}{4}\right) - 1 \right] + 0,02$

6.2.1 Détérioration déterministe de la dalle en béton et des poutres en acier

La détérioration déterministe de la dalle en béton armé et des poutres en acier signifie que l'état du pont est représenté proportionnellement entre ces deux éléments et que ceux-ci se détériorent au rythme des matrices de transition présentées au Tableau 6.11. La détérioration est donc toujours la même pour un même état initial donné.

6.2.1.1 Paramètres financiers et de débit routier déterministes

Pour ce cas, tous les paramètres de débit et toutes les valeurs financières sont déterministes. Le moment optimal de réparation pour la dalle en béton armé et pour les poutres en acier pour 20 000 simulations est présenté à la Figure 6.25.

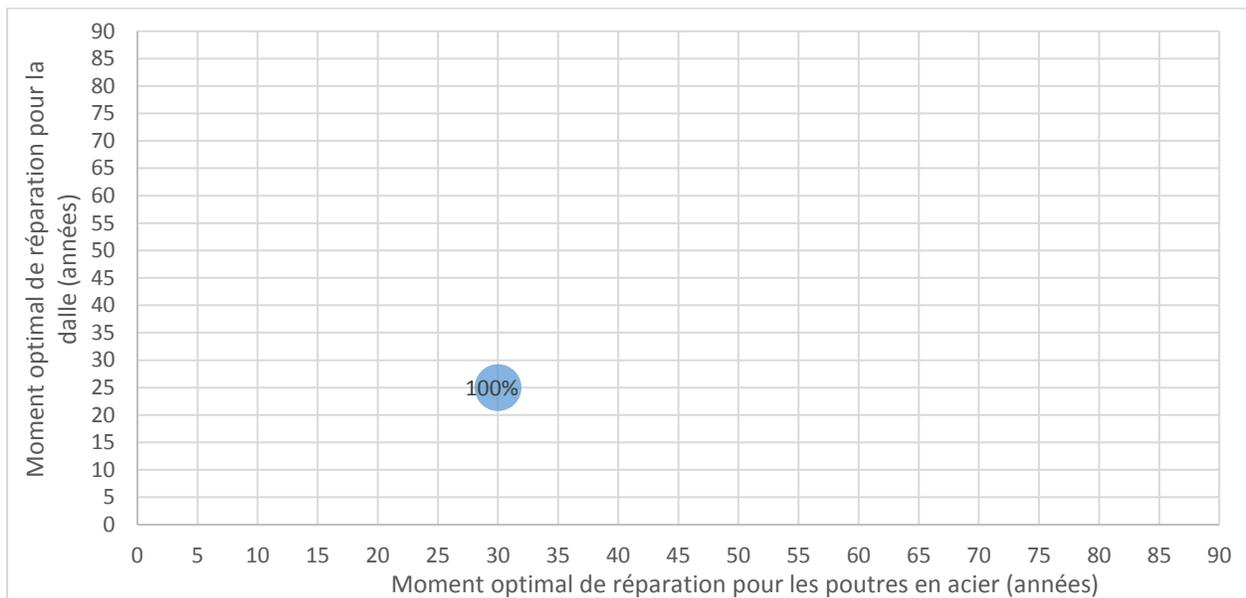


Figure 6.25 - Répartition des moments optimaux de réparation pour la dalle et les poutres en acier pour une détérioration déterministe et des paramètres financiers et de débit déterministes

Tout comme l'analyse à un seul élément, le résultat est le même pour toutes les simulations. En effet, pour ce cas d'étude, la dalle doit être réparée à 25 ans et les poutres en acier à 30 ans. Il est à noter qu'aucun avantage n'est attribué à une réparation simultanée ce qui explique le délai de réparation pour les poutres en acier. De plus, tous les paramètres étant déterministes, le résultat revient à déterminer individuellement le moment optimal de réparation de la dalle, puis le moment optimal de réparation des poutres en acier. Pour une telle réparation, la valeur résiduelle de la dalle est de 52,89% à 25 ans et la valeur résiduelle des poutres en acier est de 67,12% à 30 ans.

En analysant les valeurs actualisées nettes, il est possible de voir qu'une mauvaise décision est moins dramatique que lorsque l'état de la dalle représentait l'état du pont en entier. En effet, la détérioration beaucoup plus lente des poutres en acier qui représentent une bonne partie de la structure limite la pénalité d'état qui diminue les revenus. La marge de manœuvre est ainsi augmentée pour le gestionnaire. Il faut donc comprendre que plus une détérioration est rapide, plus la marge de manœuvre du gestionnaire est limitée. Retarder la réparation de la dalle à 30 ans a un impact minime sur le résultat et il pourrait être considéré de faire coïncider la réparation des deux éléments. Les valeurs actualisées des différents moments de réparation sont présentées au Tableau 6.13, alors que la perte de valeur actualisée nette pour chaque moment de réparation par rapport à la réparation optimale est présentée au Tableau 6.14.

6.2.1.2 Paramètres financiers et de débit routier stochastiques

Lorsque les paramètres financiers et de débit routier sont stochastiques, ces derniers peuvent avoir un impact sur le choix du moment de réparer. Les moments optimaux de réparation pour chaque élément sont présentés à la Figure 6.26.

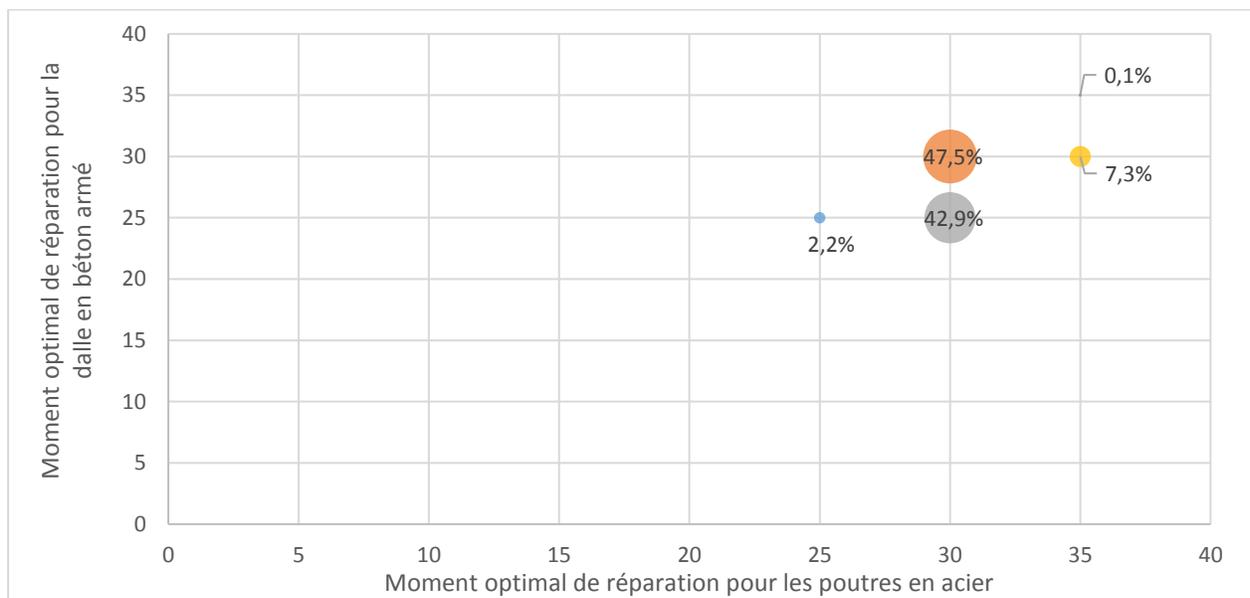


Figure 6.26 - Répartition des moments optimaux de réparation pour la dalle et les poutres en acier pour une détérioration déterministe et des paramètres financiers et de débit stochastiques

Tableau 6.13 - Valeurs actualisées nettes (en M\$) pour différents moments de réparation pour des paramètres déterministes et une détérioration déterministe de la dalle et des poutres

		Moment de réparation des poutres en acier																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment de réparation de la dalle en béton armé	0	222,5	227,0	228,5	229,6	230,4	230,8	231,0	230,8	230,5	229,9	229,2	228,5	227,6	226,7	225,8	224,9	224,2	223,4	222,8
	5	232,4	236,9	238,4	239,6	240,3	240,8	240,9	240,8	240,4	239,9	239,2	238,4	237,5	236,6	235,7	234,9	234,1	233,4	232,8
	10	236,0	240,5	242,0	243,1	243,9	244,3	244,5	244,3	244,0	243,4	242,8	242,0	241,1	240,2	239,3	238,5	237,7	237,0	236,3
	15	238,6	243,1	244,6	245,8	246,5	247,0	247,1	247,0	246,6	246,1	245,4	244,6	243,7	242,8	241,9	241,1	240,3	239,6	239,0
	20	240,3	244,8	246,3	247,4	248,2	248,6	248,8	248,6	248,3	247,7	247,0	246,3	245,4	244,5	243,6	242,7	242,0	241,2	240,6
	25	241,0	245,5	247,0	248,2	248,9	249,4	249,5	249,4	249,0	248,5	247,8	247,0	246,1	245,2	244,3	243,5	242,7	242,0	241,4
	30	241,0	245,5	247,0	248,1	248,9	249,3	249,5	249,3	249,0	248,4	247,8	247,0	246,1	245,2	244,3	243,5	242,7	242,0	241,3
	35	240,3	244,8	246,3	247,5	248,2	248,7	248,8	248,7	248,3	247,8	247,1	246,3	245,4	244,5	243,6	242,8	242,0	241,3	240,7
	40	239,2	243,7	245,2	246,3	247,1	247,6	247,7	247,6	247,2	246,7	246,0	245,2	244,3	243,4	242,5	241,7	240,9	240,2	239,5
	45	237,7	242,2	243,7	244,9	245,6	246,1	246,2	246,1	245,7	245,2	244,5	243,7	242,9	241,9	241,1	240,2	239,4	238,7	238,1
	50	236,1	240,6	242,1	243,2	244,0	244,4	244,5	244,4	244,1	243,5	242,8	242,0	241,2	240,3	239,4	238,5	237,7	237,0	236,4
	55	234,2	238,7	240,2	241,4	242,2	242,6	242,7	242,6	242,2	241,7	241,0	240,2	239,4	238,4	237,6	236,7	235,9	235,2	234,6
	60	232,4	236,9	238,4	239,5	240,3	240,7	240,9	240,7	240,4	239,8	239,1	238,3	237,5	236,6	235,7	234,8	234,1	233,3	232,7
	65	230,5	235,0	236,5	237,6	238,4	238,8	239,0	238,9	238,5	238,0	237,3	236,5	235,6	234,7	233,8	233,0	232,2	231,5	230,8
	70	228,7	233,2	234,7	235,8	236,6	237,1	237,2	237,1	236,7	236,2	235,5	234,7	233,8	232,9	232,0	231,2	230,4	229,7	229,0
	75	227,1	231,6	233,1	234,2	235,0	235,4	235,6	235,4	235,1	234,5	233,9	233,1	232,2	231,3	230,4	229,6	228,8	228,1	227,4
	80	225,6	230,1	231,6	232,8	233,5	234,0	234,1	234,0	233,6	233,1	232,4	231,6	230,7	229,8	228,9	228,1	227,3	226,6	226,0
	85	224,4	228,8	230,4	231,5	232,3	232,7	232,8	232,7	232,4	231,8	231,1	230,3	229,5	228,6	227,7	226,8	226,0	225,3	224,7
	90	223,3	227,7	229,3	230,4	231,2	231,6	231,7	231,6	231,2	230,7	230,0	229,2	228,4	227,5	226,6	225,7	224,9	224,2	223,6

Tableau 6.14 - Perte de valeur actualisée nette (en k\$) par rapport au moment de réparation optimal pour des paramètres déterministes et une détérioration déterministe de la dalle et des poutres

		Moment de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	27 029	22 535	21 027	19 896	19 122	18 682	18 546	18 677	19 033	19 575	20 261	21 053	21 917	22 823	23 721	24 565	25 346	26 058	26 699
	5	17 086	12 593	11 085	9 954	9 180	8 740	8 604	8 734	9 091	9 633	10 319	11 111	11 975	12 880	13 778	14 623	15 404	16 116	16 757
	10	13 517	9 024	7 516	6 385	5 611	5 171	5 035	5 165	5 522	6 064	6 750	7 542	8 406	9 311	10 209	11 054	11 835	12 547	13 188
	15	10 886	6 393	4 885	3 753	2 979	2 540	2 403	2 534	2 891	3 432	4 118	4 910	5 774	6 680	7 578	8 423	9 204	9 915	10 556
	20	9 229	4 736	3 228	2 096	1 322	883	746	877	1 234	1 775	2 461	3 253	4 117	5 023	5 921	6 766	7 547	8 258	8 899
	25	8 482	3 989	2 481	1 349	576	136	-	130	487	1 028	1 714	2 506	3 370	4 276	5 174	6 019	6 800	7 511	8 152
	30	8 515	4 022	2 514	1 382	608	169	32	163	520	1 061	1 747	2 539	3 403	4 309	5 207	6 052	6 833	7 544	8 185
	35	9 172	4 679	3 171	2 039	1 266	826	690	820	1 177	1 718	2 404	3 196	4 060	4 966	5 864	6 709	7 490	8 201	8 842
	40	10 300	5 807	4 299	3 168	2 394	1 954	1 818	1 948	2 305	2 847	3 533	4 325	5 189	6 094	6 992	7 837	8 618	9 330	9 971
	45	11 764	7 271	5 763	4 631	3 858	3 418	3 281	3 412	3 769	4 310	4 996	5 788	6 652	7 558	8 456	9 301	10 082	10 793	11 434
	50	13 449	8 955	7 447	6 316	5 542	5 103	4 966	5 097	5 453	5 995	6 681	7 473	8 337	9 243	10 141	10 985	11 767	12 478	13 119
	55	15 263	10 770	9 262	8 130	7 357	6 917	6 781	6 911	7 268	7 809	8 495	9 287	10 151	11 057	11 955	12 800	13 581	14 293	14 933
	60	17 135	12 642	11 134	10 002	9 228	8 789	8 652	8 783	9 140	9 681	10 367	11 159	12 023	12 929	13 827	14 672	15 453	16 164	16 805
	65	19 009	14 516	13 008	11 876	11 103	10 663	10 527	10 657	11 014	11 555	12 241	13 033	13 897	14 803	15 701	16 546	17 327	18 038	18 679
	70	20 795	16 302	14 794	13 662	12 889	12 449	12 312	12 443	12 800	13 341	14 027	14 819	15 683	16 589	17 487	18 332	19 113	19 824	20 465
	75	22 418	17 925	16 417	15 285	14 511	14 072	13 935	14 066	14 423	14 964	15 650	16 442	17 306	18 212	19 110	19 955	20 736	21 447	22 088
	80	23 871	19 378	17 870	16 739	15 965	15 525	15 389	15 519	15 876	16 417	17 103	17 895	18 759	19 665	20 563	21 408	22 189	22 901	23 541
	85	25 150	20 657	19 149	18 018	17 244	16 804	16 668	16 798	17 155	17 697	18 383	19 175	20 039	20 945	21 842	22 687	23 468	24 180	24 821
	90	26 257	21 763	20 255	19 124	18 350	17 910	17 774	17 905	18 261	18 803	19 489	20 281	21 145	22 051	22 949	23 793	24 574	25 286	25 927

Pour près de 43% des simulations, le choix optimal demeure inchangé que les paramètres financiers et de débit soient déterministes ou stochastiques, soit une réparation à 25 ans pour la dalle en béton armé et de 30 ans pour les poutres en acier. Une réparation à 30 ans tant pour la dalle que les poutres étaient le deuxième scénario optimal dans le cas déterministe avec un déficit de moins de 30 000\$. Il est maintenant le meilleur choix pour 47,5% des simulations. Trois autres choix sont aussi à considérer, soit une réparation à 25 ans pour les deux éléments dans 2,2% des simulations, une réparation à 30 ans pour la dalle et 35 ans pour les poutres en acier dans 7,3% des simulations et une réparation à 35 ans pour les deux éléments dans 0,1% des simulations (Figure 6.26). Il faut maintenant déterminer quelle variation des variables stochastiques influe la décision. Pour ce faire, les valeurs cumulatives moyennes des variables financières et la somme des débits sur la durée de vie sont étudiées pour chaque scénario optimal. Ces valeurs sont présentées au Tableau 6.15.

Tableau 6.15 - Valeur cumulative des différents paramètres stochastiques pour une détérioration déterministe de deux éléments avec des paramètres financiers et de débit stochastiques

Année de réparation (années)		$\prod_{t=0}^{99} (1 + \pi_{G,t})$	$\prod_{t=0}^{99} (1 + \pi_{M,t})$	$\prod_{t=0}^{99} (1 + r_t)$	$\sum_{t=1}^{99} DJMA_t$
Dalle	Poutres				
25	25	536,34%	2 377,21%	23 328,14%	1 606 075
25	30	537,14%	2 361,23%	20 936,52%	1 606 098
30	30	537,06%	2 342,35%	18 991,29%	1 605 910
30	35	538,49%	2 328,82%	17 284,35%	1 605 225
35	35	530,45%	2 293,07%	17 130,78%	1 606 553

En analysant les données du Tableau 6.15, il est possible de constater que le débit journalier moyen annualisé a peu d'impact sur la décision du moment de réparation. Il faut comprendre que même si une simulation a une évolution rapide du débit, le débit finira simplement par plafonner plus rapidement au débit maximal du modèle. Ainsi, il est plus difficile d'avoir des simulations qui se démarquent à ce niveau. Les deux taux d'inflation sont très peu variables selon le scénario de réparation. Cependant, il est possible de noter une certaine tendance. L'inflation générale a tendance à être plus élevée plus la réparation est tardive (sauf la réparation 35-35 qui a très peu d'occurrences). Cela s'explique par l'augmentation des revenus futurs proportionnellement à l'inflation générale. Toute chose étant égale par ailleurs, une augmentation de l'inflation favorise les revenus à long terme et donc une réparation plus tardive. L'effet opposé peut être constaté pour l'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre. Ce taux diminue légèrement plus les réparations

sont tardives. Ce taux d'inflation fait varier les coûts de réparation. De faibles taux diminuent les coûts de réparation et permettent ainsi une réparation future à moindre coût. Finalement, le paramètre le plus influent semble être le taux d'actualisation ajusté au risque. Tout comme dans l'analyse à un seul élément, il est possible de constater que la volatilité est significative pour ce paramètre selon le scénario optimal. Le taux d'actualisation dévalorise les valeurs futures. Ainsi, plus ce taux est élevé, moins les valeurs futures ont un impact sur la valeur actualisée nette du pont. C'est pour cette raison que les scénarios hâtifs ont des taux d'actualisation élevés. À l'inverse, un taux plus faible favorise les revenus à plus long terme. Ainsi, une réparation un peu plus tardive permet de maximiser les revenus sur une plus longue période puisque cette période est plus importante sur la valeur actualisée nette. Cette explication est soutenue par les valeurs actualisées nettes moyennes pour chacun des scénarios optimaux de réparation qui sont présentées au Tableau 6.16.

Tableau 6.16 - Valeur actualisée nette moyenne pour chaque scénario optimal de réparation pour une détérioration déterministe de deux éléments et des paramètres financiers et de débit stochastiques

Année de réparation (années)		Valeur actualisée nette moyenne
Dalle	Poutres	
25	25	241 736 153\$
25	30	249 596 220\$
30	30	259 165 696\$
30	35	264 015 520\$
35	35	281 087 704\$

Il est possible de remarquer que plus la réparation est tardive, plus la valeur actualisée nette est élevée. Cela s'explique par les taux d'actualisation associés à chaque scénario. Les réparations tardives sont associées à de plus faibles taux d'actualisation et, donc, une plus grande valeur actualisée nette.

Encore une fois, il faut mentionner qu'aucun avantage n'est attribué pour une réparation simultanée des deux éléments, ce qui est peu réaliste. Les résultats suggèrent par contre une réparation de la dalle à 25 ans et des poutres à 30 ans pour une économie plus volatile, alors qu'une économie plus favorable à long terme devrait diriger le gestionnaire vers une réparation des deux éléments à 30 ans.

Par contre, une détérioration déterministe est peu réaliste puisqu'il est faux de penser que deux ponts identiques vont se détériorer exactement de la même façon, peu importe leur environnement. Les deux autres modèles de détérioration sont donc étudiés dans les prochaines sections.

6.2.2 Détérioration markovienne de la dalle en béton et des poutres en acier

La détérioration markovienne de la dalle en béton armé et des poutres en acier signifie que chaque élément se retrouve dans un seul état à la fois. Leur détérioration stochastique se fait donc selon une chaîne de Markov. Chaque élément ne peut donc avoir que quatre valeurs résiduelles possibles (100%, 30%, 15% ou 0%). La valeur résiduelle du pont correspond donc à une combinaison des valeurs résiduelles des éléments. Pour ce type de détérioration, le nombre de chemins de détérioration est multiple, mais fini. Pour l'étude, il existe 1 160 chemins de détérioration pour chaque élément. En combinatoire pour les deux éléments, cela correspond à 1 345 600 chemins ($1\ 160^2$) possibles pour le pont.

6.2.2.1 Paramètres financiers et de débit routier déterministes

Lorsque les valeurs financières et de débit sont déterministes, seule la variabilité de la détérioration affecte la décision de réparer. Pour une détérioration markovienne, la variabilité est très élevée en raison de la possibilité (faible, mais possible) de maintien infini dans un état donné pour chaque élément. La répartition du moment optimal est présentée à la Figure 6.27. Il est à noter qu'un graphique surfacique en trois dimensions est utilisé afin de faciliter la compréhension. Une réparation à l'année 0 signifie que l'élément n'a reçu aucune réparation sur sa durée de vie. Pour associer des pourcentages de répartition à la figure, les répartitions des scénarios optimaux de réparation sont présentées au Tableau 6.17.

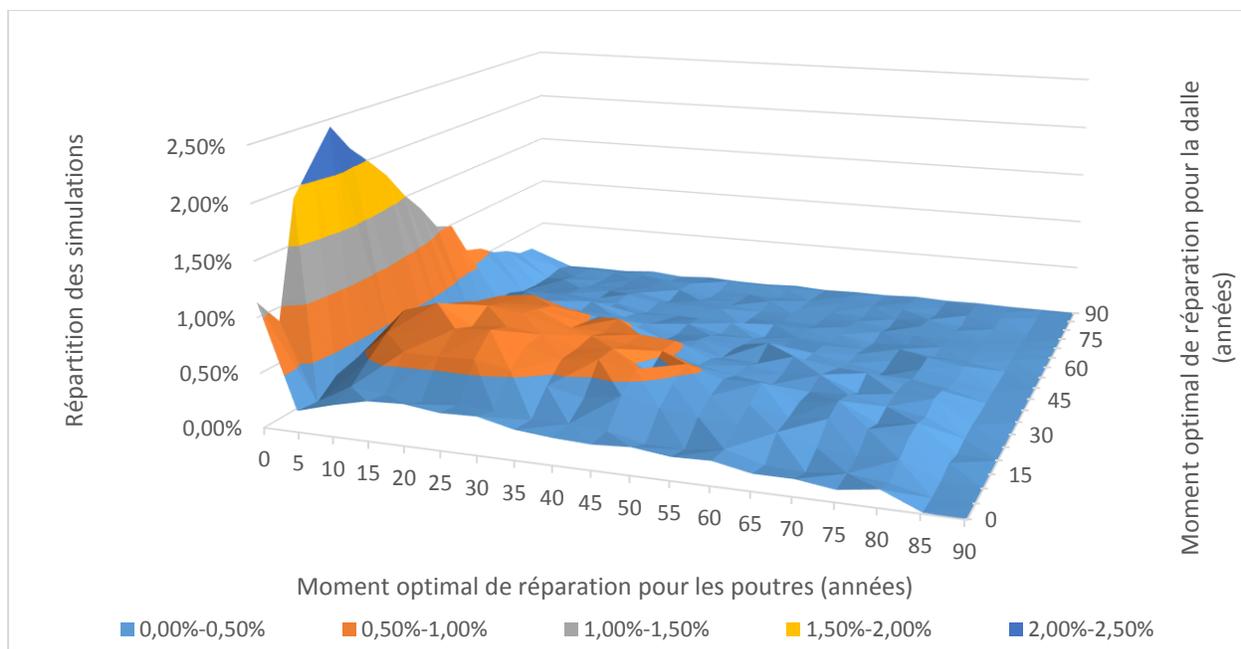


Figure 6.27 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit déterministes

En analysant le graphique, il est difficile de dégager une tendance. En effet, la majorité des scénarios de réparation sont optimaux pour moins d'un pour cent des simulations (Tableau 6.17). Pour bien comprendre les décisions de réparation à deux éléments, il est intéressant d'évaluer la répartition de réparations un élément à la fois. En effet, il est possible de considérer ces simulations comme deux événements de réparation indépendants. La seule différence par rapport à une simulation à un élément est l'impact d'un élément détérioré sur la pénalité d'état et les coûts totaux de réparation d'un élément. En effet, la dalle ne représentant plus que la moitié du pont, elle a un impact sur seulement 50% de la pénalité d'état et ses coûts de réparation sont aussi proportionnels. La répartition du moment optimal de réparation pour chaque élément est présentée au Tableau 6.18 et est comparée à la valeur obtenue pour une simulation à un seul élément.

Tableau 6.17 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit déterministes

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	1,14%	0,20%	0,29%	0,36%	0,38%	0,34%	0,35%	0,27%	0,24%	0,23%	0,25%	0,21%	0,22%	0,15%	0,15%	0,11%	0,16%	0,01%	0,00%
	5	0,88%	0,17%	0,35%	0,32%	0,29%	0,30%	0,29%	0,25%	0,25%	0,23%	0,16%	0,15%	0,20%	0,10%	0,09%	0,12%	0,08%	0,01%	0,00%
	10	1,91%	0,31%	0,51%	0,60%	0,60%	0,61%	0,55%	0,44%	0,37%	0,43%	0,36%	0,32%	0,29%	0,27%	0,18%	0,15%	0,16%	0,02%	0,00%
	15	2,17%	0,35%	0,65%	0,71%	0,76%	0,78%	0,66%	0,59%	0,62%	0,57%	0,47%	0,41%	0,36%	0,28%	0,32%	0,27%	0,23%	0,06%	0,00%
	20	2,43%	0,37%	0,77%	0,87%	0,68%	0,72%	0,68%	0,58%	0,62%	0,43%	0,55%	0,45%	0,45%	0,32%	0,37%	0,20%	0,25%	0,01%	0,00%
	25	2,17%	0,37%	0,68%	0,76%	0,79%	0,75%	0,67%	0,60%	0,56%	0,53%	0,44%	0,38%	0,33%	0,30%	0,32%	0,25%	0,19%	0,04%	0,00%
	30	1,99%	0,44%	0,65%	0,71%	0,73%	0,70%	0,55%	0,54%	0,56%	0,53%	0,40%	0,37%	0,33%	0,36%	0,22%	0,26%	0,25%	0,05%	0,00%
	35	1,79%	0,30%	0,54%	0,59%	0,62%	0,64%	0,51%	0,58%	0,36%	0,35%	0,31%	0,29%	0,39%	0,29%	0,31%	0,24%	0,22%	0,03%	0,00%
	40	1,53%	0,31%	0,42%	0,59%	0,63%	0,53%	0,48%	0,36%	0,31%	0,35%	0,29%	0,39%	0,25%	0,22%	0,17%	0,18%	0,13%	0,03%	0,00%
	45	1,32%	0,27%	0,41%	0,37%	0,48%	0,39%	0,41%	0,35%	0,27%	0,30%	0,24%	0,22%	0,23%	0,16%	0,11%	0,18%	0,12%	0,03%	0,00%
	50	1,06%	0,18%	0,27%	0,38%	0,34%	0,42%	0,29%	0,26%	0,29%	0,22%	0,21%	0,20%	0,20%	0,15%	0,13%	0,19%	0,14%	0,02%	0,00%
	55	0,99%	0,10%	0,22%	0,28%	0,29%	0,23%	0,24%	0,21%	0,25%	0,24%	0,12%	0,15%	0,13%	0,11%	0,14%	0,10%	0,08%	0,03%	0,00%
	60	0,65%	0,14%	0,26%	0,25%	0,23%	0,23%	0,16%	0,15%	0,14%	0,13%	0,16%	0,16%	0,13%	0,07%	0,09%	0,10%	0,08%	0,04%	0,00%
	65	0,59%	0,12%	0,14%	0,18%	0,15%	0,23%	0,17%	0,18%	0,17%	0,10%	0,11%	0,09%	0,11%	0,09%	0,09%	0,08%	0,06%	0,03%	0,00%
	70	0,47%	0,06%	0,11%	0,15%	0,15%	0,16%	0,10%	0,14%	0,12%	0,09%	0,09%	0,07%	0,08%	0,04%	0,10%	0,08%	0,04%	0,02%	0,00%
	75	0,40%	0,04%	0,13%	0,10%	0,10%	0,13%	0,14%	0,08%	0,08%	0,11%	0,07%	0,05%	0,03%	0,04%	0,07%	0,03%	0,04%	0,01%	0,00%
	80	0,30%	0,04%	0,08%	0,08%	0,11%	0,13%	0,13%	0,06%	0,06%	0,05%	0,06%	0,06%	0,06%	0,06%	0,02%	0,06%	0,06%	0,01%	0,00%
85	0,27%	0,07%	0,08%	0,07%	0,07%	0,04%	0,06%	0,10%	0,09%	0,06%	0,03%	0,05%	0,03%	0,04%	0,02%	0,05%	0,03%	0,01%	0,00%	
90	0,05%	0,01%	0,02%	0,01%	0,04%	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	

Tableau 6.18 - Répartition des moments optimaux de réparation pour la dalle en béton armé et les poutres en acier si elles sont étudiées seules ou ensemble pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

		Dalle en béton armé					Poutres en acier		
		2 éléments considérés	1 élément considéré	Différence			2 éléments considérés	1 élément considéré	Différence
Moment optimal de réparation de la dalle (années)	0	5,00%	4,92%	0,08%	Moment optimal de réparation des poutres (années)	0	22,05%	18,15%	3,90%
	5	4,18%	4,38%	-0,20%		5	3,80%	4,48%	-0,67%
	10	8,05%	7,97%	0,08%		10	6,53%	6,88%	-0,35%
	15	10,22%	10,47%	-0,25%		15	7,35%	7,45%	-0,10%
	20	10,71%	10,77%	-0,06%		20	7,39%	7,16%	0,23%
	25	10,10%	10,66%	-0,57%		25	7,31%	6,77%	0,54%
	30	9,59%	9,31%	0,28%		30	6,41%	6,42%	-0,01%
	35	8,31%	8,27%	0,04%		35	5,73%	5,88%	-0,15%
	40	7,13%	6,65%	0,47%		40	5,32%	4,85%	0,48%
	45	5,81%	5,70%	0,11%		45	4,93%	4,78%	0,15%
	50	4,91%	4,75%	0,16%		50	4,26%	4,45%	-0,19%
	55	3,87%	4,09%	-0,22%		55	3,99%	4,24%	-0,25%
	60	3,12%	3,26%	-0,14%		60	3,79%	3,63%	0,16%
	65	2,66%	2,43%	0,23%		65	3,04%	3,27%	-0,23%
	70	2,01%	2,08%	-0,07%		70	2,85%	2,66%	0,19%
	75	1,62%	1,65%	-0,04%		75	2,61%	2,61%	0,00%
	80	1,38%	1,39%	0,00%		80	2,28%	2,14%	0,14%
	85	1,13%	1,02%	0,12%		85	0,40%	2,38%	-1,98%
90	0,24%	0,26%	-0,02%	90	0,00%	1,86%	-1,86%		

L'analyse de la distribution pour la dalle en béton armé démontre qu'il y a peu de différence pour le choix optimal de la réparation qu'il y ait un ou deux éléments étudiés. Les mêmes conclusions qu'à la section 6.1.2.1 peuvent alors être tirées pour le moment optimal de réparation pour la dalle. En effet, il est possible de remarquer un nombre important de simulations où aucune réparation pour la dalle n'est souhaitable, cela s'explique par la probabilité de maintien en bon état de la dalle sur l'ensemble de la durée de vie du pont. Le reste de la répartition est principalement reliée à la détérioration de l'élément. La majorité des réparations pour la dalle doivent donc être effectuées entre 10 et 35 ans.

Pour les poutres en acier, le fait de considérer deux éléments sur le pont a un impact sur le moment optimal de réparation. Il y a une diminution importante des réparations en fin de vie et une hausse des simulations où aucune réparation n'est nécessaire. En effet, pour 22,09% des simulations, aucune réparation n'est souhaitable pour les poutres en acier. Ce haut pourcentage explique le pic gauche du graphique de la Figure 6.27. Pour comprendre ce résultat, il faut se rappeler que la

matrice de détérioration des poutres est beaucoup moins sévère que celle de la dalle. La probabilité de maintien dans l'état A sur la durée de vie est de 18,31% ($0,91^{18}$). Qui plus est, une réparation à 90 ans des poutres n'est jamais souhaitable. Cela veut donc dire qu'une réparation à 90 ans suite à une première dégradation n'est plus souhaitable, puisque le coût engendré par la réparation est inférieur aux revenus générés. Cela est aussi vrai pour certaines détériorations à 85 ans. En considérant plusieurs éléments sur un pont, la réparation d'un seul élément a un impact sur seulement 50% de la pénalité d'état (et donc des revenus), ce qui explique cette décision de ne pas réparer.

Les moments de réparation de chacun des éléments sont, pour ce cas d'étude, indépendants l'un de l'autre. Il faut noter que la détérioration des deux éléments est aussi indépendante.

Une autre information intéressante est l'état des éléments lors de leur réparation. La répartition de l'état lors de la réparation pour les deux éléments est présentée à la Figure 6.28. Puisque la détérioration et le moment de réparation sont indépendants d'un élément à l'autre, l'information concernant l'état d'un élément lors de la réparation est analysée indépendamment de l'état lors de la réparation du second élément.

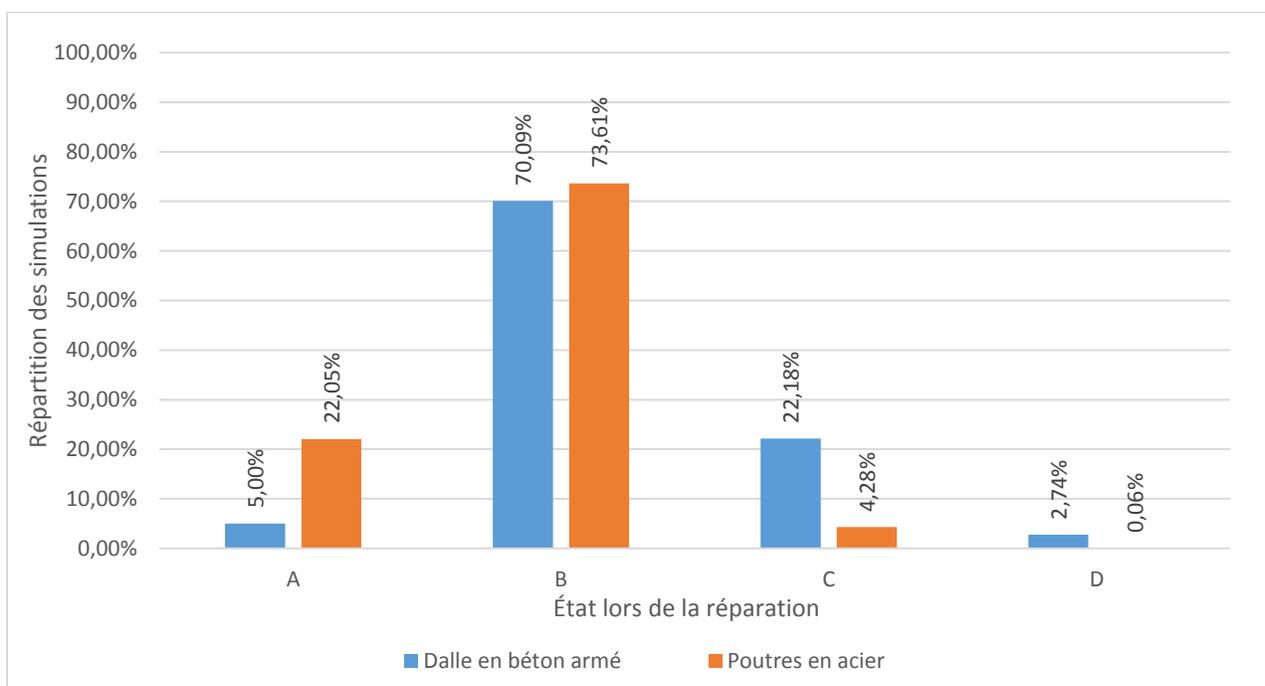


Figure 6.28 - Répartition de l'état lors de la réparation pour deux éléments selon la détérioration markovienne et les paramètres financiers et de débit déterministes

La répartition des états de réparation pour la dalle en béton armé est très similaire au résultat obtenu lorsque la dalle représentait l'ensemble du pont. Ce résultat vient solidifier l'hypothèse selon laquelle, pour la dalle, considérer un seul ou deux éléments a peu ou pas d'impact sur le moment de réparation et, directement, l'état lors de la réparation. La comparaison entre les états de réparation pour un pont représenté par un seul élément ou par deux éléments est présentée au Tableau 6.19.

Tableau 6.19 - Répartition des états lors de la réparation d'une dalle en béton armé et des poutres en acier selon qu'elles soient étudiées seules ou conjointement pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit déterministes

		Dalle en béton armé					Poutres en acier		
		2 éléments considérés	1 élément considéré	Différence			2 éléments considérés	1 élément considéré	Différence
État de réparation	A	5,00%	4,92%	0,08%	État de réparation	A	22,05%	18,41%	3,65%
	B	70,09%	69,62%	0,46%		B	73,61%	76,33%	-2,72%
	C	22,18%	22,69%	-0,51%		C	4,28%	4,86%	-0,58%
	D	2,74%	2,78%	-0,04%		D	0,06%	0,41%	-0,35%

Ce tableau permet aussi d'étudier les états de réparation pour les poutres en acier. Le nombre de réparations dans l'état C et D est semblable qu'il y ait un seul ou deux éléments considérés. La faible différence peut s'expliquer par le moindre impact à long terme d'un mauvais état pour un des deux éléments. Ainsi, les poutres peuvent être réparées plus tôt et être suivies d'une détérioration en D par la suite. L'atteinte de cet état sera balancée par la dalle. L'optimisation du temps en D sur la durée de vie est donc amenuisée pour les poutres lorsque deux éléments sont considérés.

Par contre, une partie des simulations où la réparation s'effectuait dans l'état B lorsque seules les poutres étaient considérées ne nécessitent pas de réparation lorsque deux éléments sont considérés. Ce résultat peut être relié aux résultats du moment optimal de réparation. Les simulations qui étaient initialement faites dans l'état B et ne nécessitent plus de réparations sont des simulations où la dégradation commence en fin de vie du pont. Puisqu'il y a maintenant deux éléments, l'impact d'une réparation d'un des éléments est plus faible sur l'ensemble des revenus. Elle n'est plus nécessairement viable financièrement, coûtant davantage que ce qu'elle rapportera. Pour vérifier cet aspect, il faut s'attarder aux valeurs actualisées générées en fin de vie. Pour des poutres qui se détériorent en B à 90 ans, la comparaison des valeurs actualisées nettes générées pour les 10 dernières années est présentée aux Tableau 6.20, Tableau 6.21 et Tableau 6.22, toutes choses

égales par ailleurs. Pour obtenir les valeurs de ce tableau, il faut se servir des équations 6.3 et 6.4. Ces équations permettent de calculer le revenu brut annuel généré dès la 90^e année si les poutres sont à l'état A (RB_A) ou à l'état B (RB_B). Les poutres n'affectant que 50% de la pénalité d'état, il faut donc pondérer ce paramètre dans les équations suivantes.

$$RB_A = 23,88 \times 0,09 \times 20\,000 \times 365 \times (50\% \times 1) = 7\,844\,580\$ \quad 6.3$$

$$RB_B = 23,88 \times 0,09 \times 20\,000 \times 365 \times (50\% \times 0,9) = 7\,060\,122\$ \quad 6.4$$

Tableau 6.20 - Revenus et coûts bruts pour les poutres suite à une détérioration en B à 90 ans selon une approche de réparation à 90 ans ou aucune réparation sur la durée de vie

Année	Réparation à 90 ans		Aucune réparation	
	Revenus bruts	Coûts bruts	Revenus bruts	Coûts bruts
90	7 060 122,00 \$	1 849 439,22 \$	7 060 122,00 \$	0,00 \$
91	7 060 122,00 \$	0,00 \$	7 060 122,00 \$	0,00 \$
92	7 060 122,00 \$	0,00 \$	7 060 122,00 \$	0,00 \$
93	7 060 122,00 \$	0,00 \$	7 060 122,00 \$	0,00 \$
94	7 060 122,00 \$	0,00 \$	7 060 122,00 \$	0,00 \$
95	7 844 580,00 \$	0,00 \$	7 060 122,00 \$	0,00 \$
96	7 844 580,00 \$	0,00 \$	7 060 122,00 \$	0,00 \$
97	7 844 580,00 \$	0,00 \$	7 060 122,00 \$	0,00 \$
98	7 844 580,00 \$	0,00 \$	7 060 122,00 \$	0,00 \$
99	7 844 580,00 \$	0,00 \$	7 060 122,00 \$	0,00 \$

Tableau 6.21 - Facteur d'indexation et d'actualisation des revenus et de coûts de 90 à 100 ans

Année	Facteur d'indexation et d'actualisation	
	Revenus	Coûts
90	0,03560307	0,131805
91	0,0343078	0,128870
92	0,03305966	0,126001
93	0,03185692	0,123196
94	0,03069794	0,120453
95	0,02958112	0,117771
96	0,02850493	0,115149
97	0,0274679	0,112585
98	0,02646859	0,110079
99	0,02550564	0,107628

Tableau 6.22 – Revenus et coûts nets pour les poutres suite à une détérioration en B à 90 ans selon une approche de réparation à 90 ans ou aucune réparation sur la durée de vie

Année	Réparation à 90 ans		Aucune réparation	
	Revenus nets	Coûts nets	Revenus nets	Coûts nets
90	251 362,05 \$	243 765,05 \$	251 362,05 \$	0,00 \$
91	242 217,28 \$	0,00 \$	242 217,28 \$	0,00 \$
92	233 405,21 \$	0,00 \$	233 405,21 \$	0,00 \$
93	224 913,72 \$	0,00 \$	224 913,72 \$	0,00 \$
94	216 731,17 \$	0,00 \$	216 731,17 \$	0,00 \$
95	232 051,45 \$	0,00 \$	208 846,30 \$	0,00 \$
96	223 609,21 \$	0,00 \$	201 248,29 \$	0,00 \$
97	215 474,12 \$	0,00 \$	193 926,71 \$	0,00 \$
98	207 634,98 \$	0,00 \$	186 871,49 \$	0,00 \$
99	200 081,04 \$	0,00 \$	180 072,94 \$	0,00 \$
VAN	2 003 715,19 \$		2 139 595,15 \$	

Ainsi, il ne faut pas réparer les poutres dans la situation présentée aux Tableau 6.20, Tableau 6.21 et Tableau 6.22. En effet, le coût de réparation en valeur actualisée est supérieur à la création de revenus générée par cette réparation.

6.2.2.2 Paramètres financiers et de débit routier stochastiques

Avec l'utilisation de valeurs financières et de débit stochastique, le modèle de détérioration markovien n'est plus le seul à influencer les réparations optimales. Il est à noter que les mêmes valeurs financières et de débits simulées pour les autres modèles de détérioration sont utilisées ici. Les détériorations des éléments simulées à la section 6.2.2.1 sont aussi conservées à des fins de comparaisons. La répartition des moments de réparation optimaux pour chaque élément est présentée graphiquement à la Figure 6.29 et au Tableau 6.23.

Tableau 6.23 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit stochastiques

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	1,14%	0,19%	0,27%	0,35%	0,38%	0,37%	0,34%	0,28%	0,25%	0,23%	0,24%	0,20%	0,21%	0,15%	0,15%	0,11%	0,16%	0,01%	0,00%
	5	0,85%	0,17%	0,34%	0,31%	0,29%	0,29%	0,28%	0,26%	0,25%	0,23%	0,16%	0,14%	0,19%	0,10%	0,09%	0,12%	0,08%	0,01%	0,00%
	10	1,90%	0,30%	0,49%	0,58%	0,58%	0,62%	0,54%	0,46%	0,36%	0,41%	0,37%	0,32%	0,28%	0,26%	0,18%	0,15%	0,17%	0,02%	0,00%
	15	2,12%	0,37%	0,62%	0,75%	0,74%	0,80%	0,63%	0,60%	0,60%	0,54%	0,49%	0,41%	0,36%	0,29%	0,31%	0,27%	0,23%	0,05%	0,00%
	20	2,43%	0,35%	0,77%	0,84%	0,69%	0,73%	0,66%	0,61%	0,63%	0,44%	0,52%	0,46%	0,46%	0,33%	0,36%	0,20%	0,24%	0,02%	0,00%
	25	2,20%	0,38%	0,70%	0,77%	0,81%	0,75%	0,67%	0,59%	0,55%	0,55%	0,44%	0,40%	0,34%	0,30%	0,30%	0,25%	0,21%	0,04%	0,00%
	30	2,01%	0,43%	0,64%	0,70%	0,73%	0,68%	0,55%	0,55%	0,56%	0,51%	0,40%	0,37%	0,32%	0,35%	0,23%	0,27%	0,25%	0,05%	0,00%
	35	1,79%	0,30%	0,54%	0,58%	0,63%	0,65%	0,52%	0,58%	0,37%	0,34%	0,32%	0,30%	0,40%	0,27%	0,32%	0,25%	0,21%	0,03%	0,00%
	40	1,51%	0,30%	0,42%	0,60%	0,61%	0,51%	0,46%	0,38%	0,33%	0,34%	0,30%	0,39%	0,24%	0,24%	0,16%	0,18%	0,14%	0,03%	0,00%
	45	1,34%	0,27%	0,42%	0,38%	0,50%	0,39%	0,42%	0,34%	0,27%	0,30%	0,25%	0,22%	0,22%	0,17%	0,11%	0,17%	0,12%	0,03%	0,00%
	50	1,07%	0,18%	0,29%	0,37%	0,36%	0,42%	0,29%	0,29%	0,28%	0,22%	0,21%	0,21%	0,21%	0,16%	0,13%	0,19%	0,15%	0,03%	0,00%
	55	0,99%	0,10%	0,21%	0,27%	0,29%	0,25%	0,24%	0,21%	0,25%	0,23%	0,13%	0,16%	0,13%	0,10%	0,15%	0,10%	0,08%	0,03%	0,00%
	60	0,64%	0,14%	0,26%	0,25%	0,23%	0,23%	0,15%	0,16%	0,15%	0,12%	0,17%	0,16%	0,13%	0,06%	0,09%	0,10%	0,08%	0,03%	0,00%
	65	0,57%	0,12%	0,13%	0,17%	0,16%	0,22%	0,17%	0,18%	0,16%	0,11%	0,11%	0,09%	0,11%	0,09%	0,08%	0,08%	0,06%	0,03%	0,00%
	70	0,48%	0,06%	0,10%	0,16%	0,15%	0,17%	0,10%	0,15%	0,12%	0,09%	0,09%	0,07%	0,08%	0,05%	0,09%	0,08%	0,04%	0,02%	0,00%
	75	0,39%	0,04%	0,12%	0,10%	0,11%	0,13%	0,15%	0,08%	0,08%	0,11%	0,07%	0,05%	0,03%	0,05%	0,06%	0,03%	0,04%	0,00%	0,00%
	80	0,31%	0,03%	0,09%	0,08%	0,11%	0,13%	0,12%	0,06%	0,07%	0,06%	0,06%	0,06%	0,06%	0,05%	0,03%	0,06%	0,06%	0,01%	0,00%
85	0,27%	0,07%	0,08%	0,07%	0,07%	0,04%	0,07%	0,10%	0,08%	0,07%	0,03%	0,05%	0,03%	0,04%	0,02%	0,05%	0,03%	0,01%	0,00%	
90	0,06%	0,01%	0,02%	0,01%	0,04%	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	

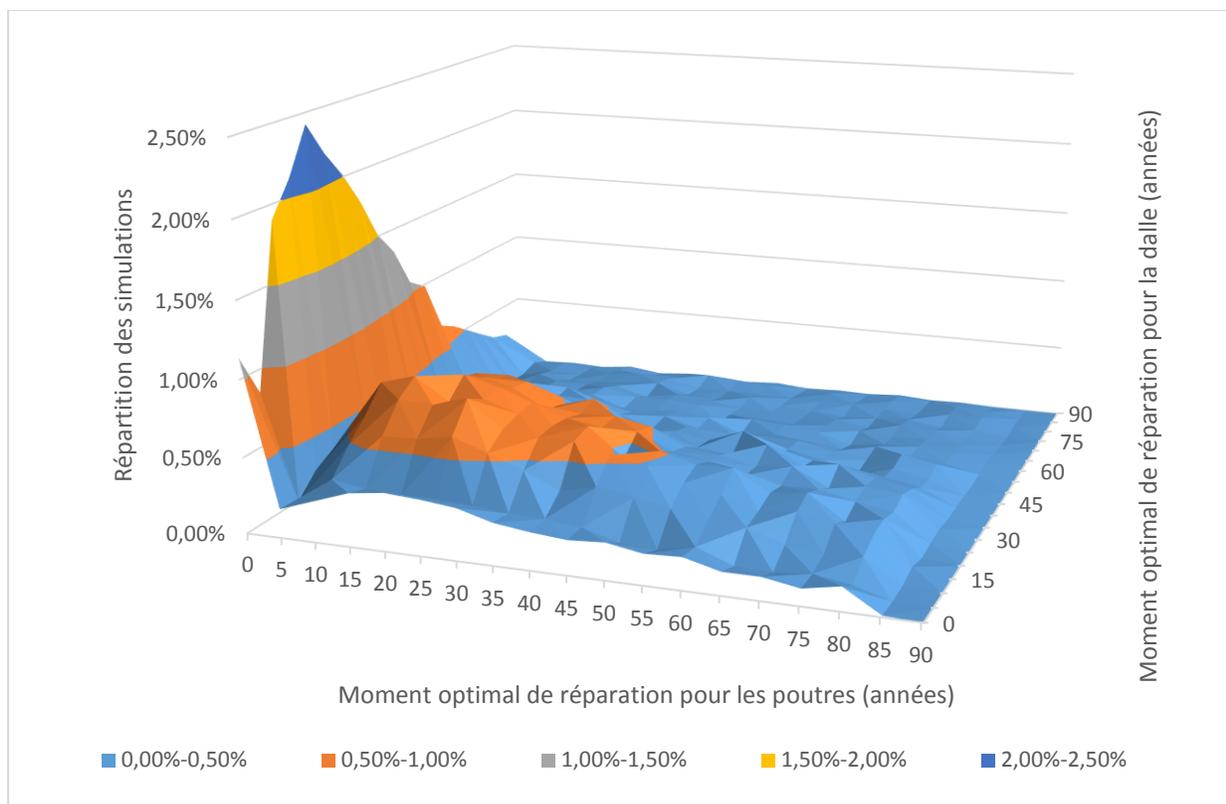


Figure 6.29 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit stochastiques

Encore une fois, il y a une forte répartition des moments optimaux. Pour faciliter l'analyse, celle-ci se fera premièrement élément par élément en comparaison avec les résultats lorsque le pont ne considèrerait qu'un seul élément. Cette analyse permettra de confirmer ou d'infirmer les résultats de la section 6.1.2.2, où les paramètres financiers et de débit étaient stochastiques. Deuxièmement, les résultats seront comparés avec ceux de la section 6.2.2.1, afin de déterminer l'impact de l'incertitude sur les paramètres financiers et de débit.

Ainsi, la répartition des moments de réparation des 20 000 simulations pour chaque élément est présentée au Tableau 6.24, selon que le pont soit représenté à la fois par la dalle et les poutres (2 éléments considérés : section actuelle) ou que le pont soit représenté par un seul élément (1 élément représenté : section 6.1). Dans les deux cas, les résultats sont ceux d'une détérioration markovienne avec paramètres financiers et de débit stochastiques.

Tableau 6.24 - Répartition des moments optimaux de réparation pour la dalle en béton armé et les poutres en acier si elles sont étudiées seules ou ensemble pour une détérioration markovienne et des paramètres financiers et de débit stochastiques

		Dalle en béton armé			Poutres en acier				
		2 éléments considérés	1 élément considéré	Différence	2 éléments considérés	1 élément considéré	Différence		
Moment optimal de réparation de la dalle (années)	0	5,00%	4,94%	0,06%	Moment optimal de réparation des poutres (années)	0	22,03%	18,15%	3,88%
	5	4,11%	4,29%	-0,18%		5	3,76%	4,38%	-0,62%
	10	7,95%	7,87%	0,08%		10	6,48%	6,77%	-0,29%
	15	10,13%	10,39%	-0,25%		15	7,29%	7,47%	-0,19%
	20	10,69%	10,80%	-0,11%		20	7,43%	7,13%	0,30%
	25	10,19%	10,71%	-0,52%		25	7,35%	6,75%	0,59%
	30	9,56%	9,30%	0,26%		30	6,34%	6,54%	-0,21%
	35	8,36%	8,34%	0,02%		35	5,83%	5,90%	-0,07%
	40	7,14%	6,70%	0,44%		40	5,32%	4,90%	0,41%
	45	5,87%	5,71%	0,17%		45	4,87%	4,73%	0,14%
	50	5,00%	4,80%	0,20%		50	4,31%	4,48%	-0,16%
	55	3,89%	4,10%	-0,21%		55	4,05%	4,26%	-0,21%
	60	3,10%	3,27%	-0,16%		60	3,77%	3,66%	0,12%
	65	2,61%	2,45%	0,17%		65	3,06%	3,24%	-0,18%
	70	2,07%	2,06%	0,01%		70	2,83%	2,70%	0,14%
	75	1,59%	1,67%	-0,08%		75	2,63%	2,61%	0,02%
	80	1,41%	1,41%	0,00%		80	2,29%	2,14%	0,16%
	85	1,12%	1,01%	0,11%		85	0,41%	2,38%	-1,97%
90	0,25%	0,24%	0,01%	90	0,00%	1,86%	-1,86%		

Ainsi, la répartition des états lors de la réparation des 20 000 simulations pour chaque élément est présentée au Tableau 6.25, selon que le pont soit représenté à la fois par la dalle et les poutres ou que le pont soit représenté par un seul élément. Dans les deux cas, les résultats sont ceux d'une détérioration markovienne avec paramètres financiers et de débit stochastiques.

Tableau 6.25 – Répartition des états lors de la réparation d'une dalle en béton armé et des poutres en acier selon qu'elles soient étudiées seules ou conjointement pour une détérioration markovienne et des paramètres stochastiques

		Dalle en béton armé			Poutres en acier				
		2 éléments considérés	1 élément considéré	Différence	2 éléments considérés	1 élément considéré	Différence		
État de réparation	A	5,00%	4,94%	0,06%	État de réparation	A	22,03%	18,15%	3,88%
	B	69,75%	69,28%	0,47%		B	73,47%	76,38%	-2,91%
	C	22,26%	22,75%	-0,49%		C	4,44%	4,93%	-0,49%
	D	2,99%	3,04%	-0,05%		D	0,07%	0,55%	-0,48%

Dans les deux cas, l'ajout de paramètres financiers et de débit stochastiques ne change pas la tendance dégagée à la section 6.2.1.1. En effet, il n'y a à peu près aucun impact pour la dalle en béton armé. La réparation optimale demeure donc la même. Pour les poutres en acier, il y a encore une augmentation significative de simulations où aucune réparation n'est nécessaire sur la durée de vie. Cette augmentation est, encore une fois, associée aux détériorations en fin de vie. Dans ces situations, une réparation n'est pas favorable financièrement et il vaut mieux attendre la fin de vie utile que de réparer. Il y a aussi une faible baisse du nombre de réparations dans l'état C et D pour les poutres en acier. Cette baisse s'explique par la baisse d'importance des détériorations en fin de vie d'un élément puisque cette baisse est compensée par l'autre élément. Ainsi, à un seul élément, une réparation des poutres en mauvais état pouvait être retardée afin de minimiser le temps passé en mauvais état (avant et après la réparation). Le temps passé en mauvais état en fin de vie étant moins significatif lorsque deux éléments sont considérés, les poutres en acier se détériorant rapidement sont réparées plus tôt, diminuant le nombre de réparations dans l'état C et D.

En ce qui a trait à l'impact des valeurs financières et de débit, la comparaison entre les moments optimaux de réparation lorsque les valeurs financières et de débit sont déterministes ou stochastiques est présentée pour la dalle et pour les poutres.

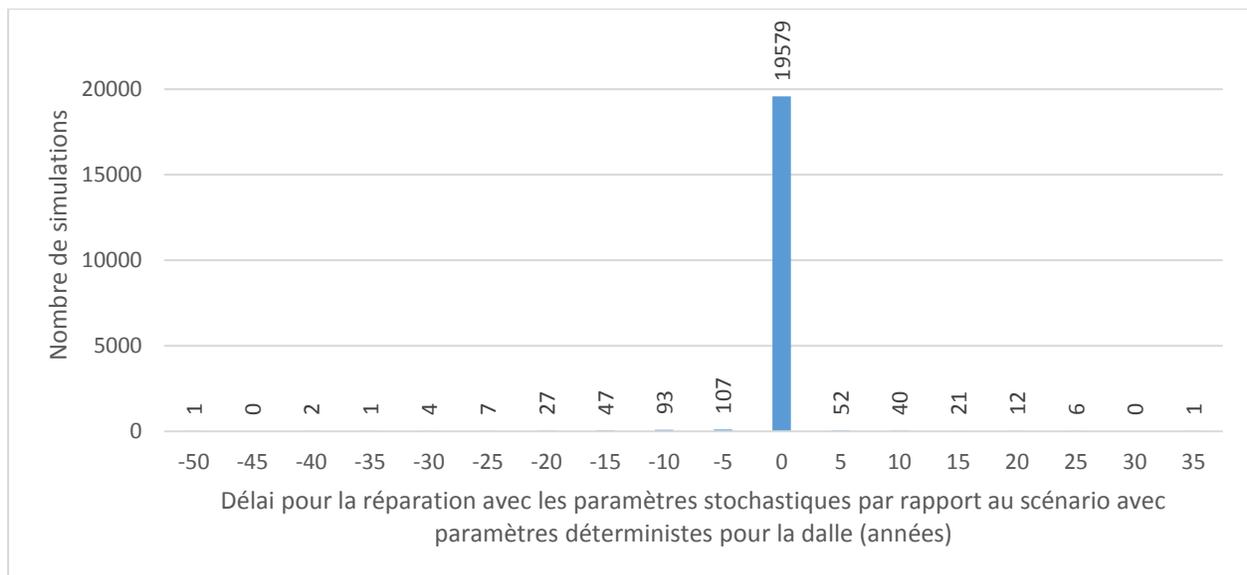


Figure 6.30 - Délai pour la réparation optimale pour le scénario avec paramètres financiers et de débit stochastiques par rapport aux paramètres financiers et de débit déterministes pour une détérioration markovienne de la dalle en béton armé lorsque deux éléments sont considérés

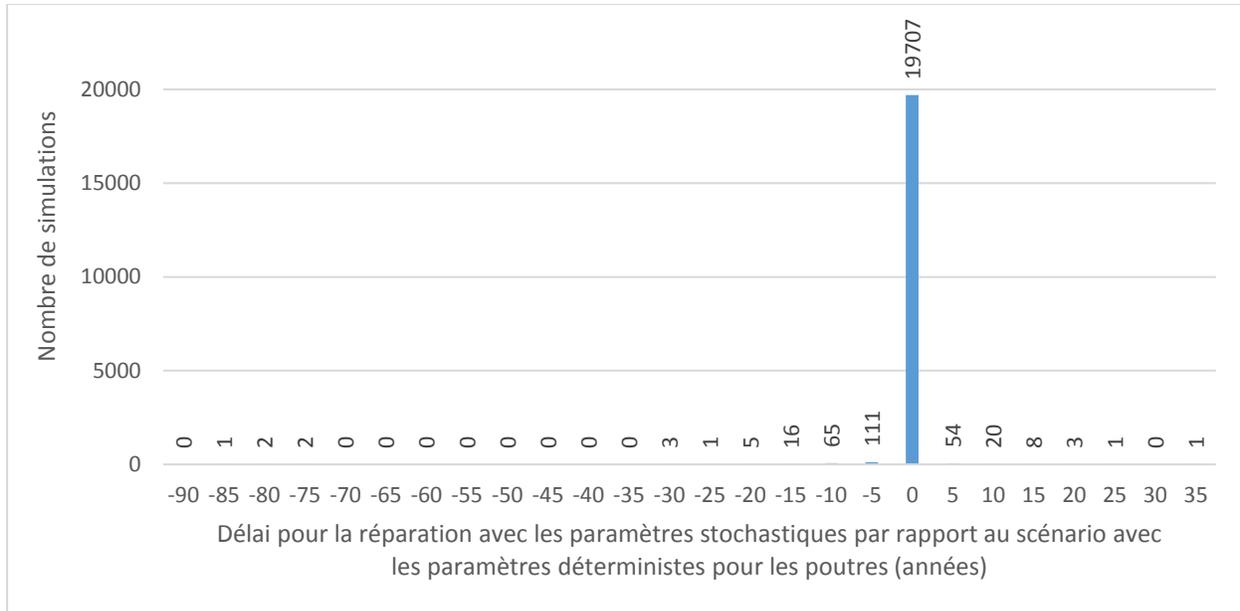


Figure 6.31 - Délai pour la réparation optimale pour le scénario avec paramètres financiers et de débit stochastiques par rapport aux paramètres financiers et de débit déterministes pour une détérioration stochastique des poutres en acier lorsque deux éléments sont considérés

Pour le modèle de détérioration markovien, les paramètres financiers et de débit stochastiques n'ont aucun impact pour 98% des simulations, la volatilité de la détérioration étant le principal facteur qui régit le moment de réparation. Il peut être étonnant de voir un impact de plus de 75 ans sur le moment optimal de réparation des poutres pour 5 simulations. Or il s'agit de simulations où une réparation tardive était souhaitable avec les paramètres déterministes, mais où aucune réparation n'est nécessaire avec les paramètres stochastiques. Il faut donc utiliser les mêmes conclusions qu'à la section 6.2.2.1 pour ce scénario de détérioration. Il faut cependant garder un coup d'œil sur le taux d'intérêt et les taux d'inflation, qui peuvent légèrement influencer le résultat en cas de volatilité significative. Il faut alors se rapporter à la section 6.1.1.2 sur l'impact de ces paramètres.

6.2.3 Détérioration stochastique de la dalle en béton et des poutres en acier

La détérioration stochastique de la dalle en béton armé et des poutres en acier signifie que l'ensemble du pont est représenté à la fois par la dalle en béton armé et les poutres en acier. L'état de ces deux éléments est réparti entre les quatre états possibles du Ministère (A, B, C et D). La détérioration de chaque élément est stochastique puisqu'elle suit une matrice de détérioration qui évolue de façon aléatoire.

6.2.3.1 Paramètres financiers et de débit routier déterministes

Encore une fois pour ce modèle de détérioration, lorsque les valeurs financières et de débit sont déterministes, seule la variabilité de la détérioration affecte la décision de réparer. Avec ce modèle de détérioration, une infinité de chemins de détérioration est possible. Seul le critère subjectif de vitesse de dégradation peut aider à prendre une décision optimisée. Ainsi, les moments optimaux de réparation de 20 000 simulations pour les poutres en acier et la dalle en béton armé sont présentés à la Figure 6.32 et au Tableau 6.26. Certains moments de réparation ne sont pas présentés au Tableau 6.26 puisqu'aucune réparation n'est optimale à ces dates.

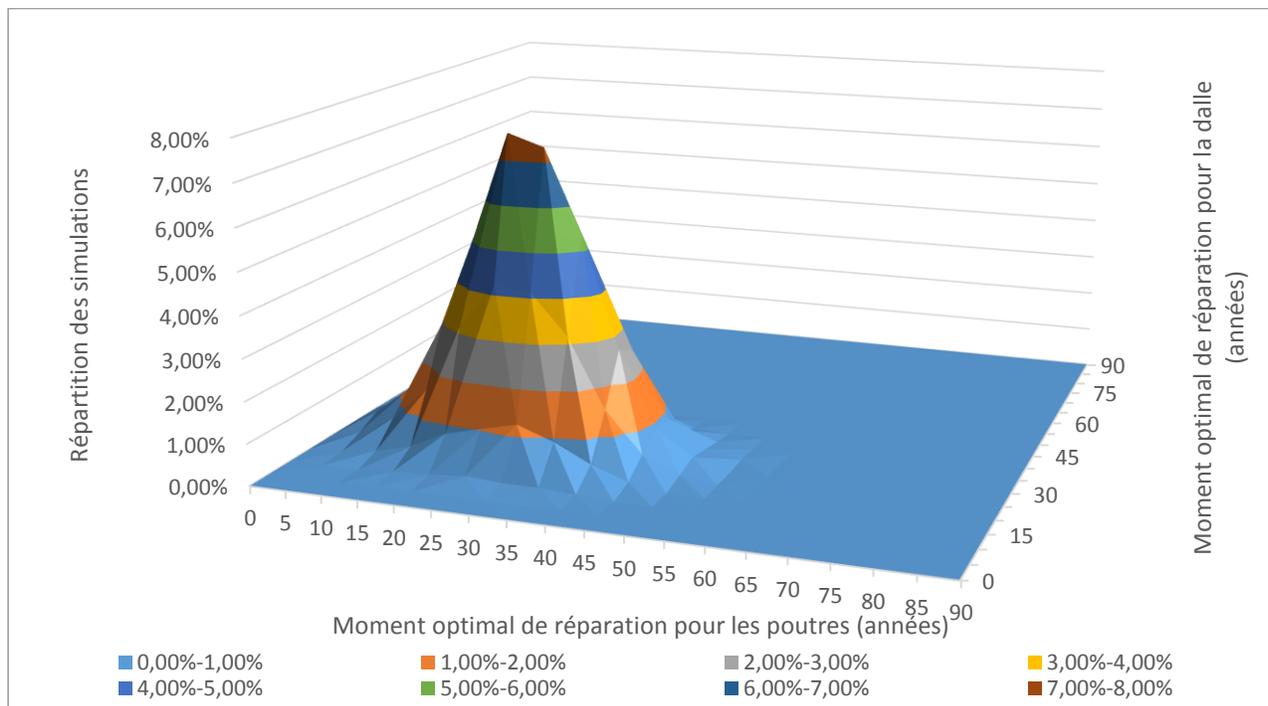


Figure 6.32 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit déterministes

Cependant, puisque la détérioration de chaque élément est représentée par un événement aléatoire indépendant, l'étude du moment optimal de réparation élément par élément permet de mieux comprendre ce qui explique la décision de réparer ou non. Ainsi, la répartition du moment optimal de réparation pour chaque élément est présentée au Tableau 6.27 et est comparée à la valeur obtenue pour une simulation à un seul élément.

Tableau 6.26 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit déterministes

		Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)										
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5	0,00%	0,01%	0,02%	0,07%	0,26%	0,52%	0,46%	0,15%	0,01%	0,00%	
	10	0,00%	0,01%	0,01%	0,19%	0,71%	1,19%	0,91%	0,42%	0,08%	0,01%	
	15	0,00%	0,01%	0,08%	0,40%	1,53%	2,88%	2,53%	0,84%	0,17%	0,01%	
	20	0,00%	0,01%	0,12%	0,81%	3,15%	5,13%	4,52%	1,68%	0,17%	0,01%	
	25	0,00%	0,01%	0,19%	1,03%	4,25%	7,63%	6,01%	2,36%	0,34%	0,02%	
	30	0,00%	0,02%	0,13%	1,24%	4,14%	7,35%	6,15%	2,25%	0,28%	0,01%	
	35	0,00%	0,01%	0,13%	0,92%	3,17%	5,37%	4,39%	1,56%	0,27%	0,00%	
	40	0,00%	0,01%	0,08%	0,49%	1,51%	2,71%	2,44%	0,82%	0,13%	0,01%	
	45	0,00%	0,01%	0,02%	0,18%	0,54%	0,90%	0,84%	0,29%	0,06%	0,00%	
	50	0,00%	0,00%	0,01%	0,02%	0,15%	0,29%	0,20%	0,09%	0,01%	0,00%	
	55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,02%	0,05%	0,01%	0,00%	0,00%	
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	

En observant les résultats, le moment optimal de réparation est moins volatil que pour la détérioration markovienne. En effet, les réparations de la dalle doivent se faire majoritairement entre 20 et 35 ans, alors que les poutres doivent être réparées majoritairement entre 15 et 40 ans (zone verdâtre du Tableau 6.26). La différence s'explique simplement par la différence entre les matrices de détérioration. La matrice des poutres, bien que proposant une détérioration moins rapide, génère une plus grande volatilité sur le moment de réparation. La réparation moyenne est aussi légèrement plus tardive pour les poutres que pour la dalle.

La comparaison avec les résultats à un seul élément démontre que ne considérer un seul élément ou deux éléments en même temps n'a pas d'impact sur le moment de réparation optimal de chaque élément. Ainsi, il faut se fier à l'analyse de la section 6.1.3.1 pour prendre la décision sur le moment de réparation.

Tableau 6.27 - Répartition des moments optimaux de réparation pour la dalle en béton armé et les poutres en acier si elles sont étudiées seules ou ensemble pour une détérioration stochastique et des paramètres financiers et de débit déterministes

		Dalle en béton armé							Poutres en acier		
		2 éléments considérés	1 élément considéré	Différence					2 éléments considérés	1 élément considéré	Différence
Moment optimal de réparation de la dalle (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	Moment optimal de réparation des poutres (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%		
	5	0,08%	0,11%	-0,04%		5	1,48%	1,36%	0,13%		
	10	0,78%	0,90%	-0,12%		10	3,51%	3,49%	0,02%		
	15	5,33%	5,71%	-0,39%		15	8,43%	8,13%	0,29%		
	20	19,40%	19,32%	0,09%		20	15,58%	15,44%	0,14%		
	25	33,96%	34,02%	-0,05%		25	21,82%	22,25%	-0,43%		
	30	28,47%	28,29%	0,19%		30	21,55%	21,93%	-0,39%		
	35	10,44%	10,14%	0,31%		35	15,80%	16,13%	-0,32%		
	40	1,49%	1,48%	0,00%		40	8,18%	7,75%	0,43%		
	45	0,06%	0,05%	0,02%		45	2,83%	2,83%	0,00%		
	50	0,00%	0,01%	-0,01%		50	0,75%	0,63%	0,12%		
	55	0,00%	0,00%	0,00%		55	0,09%	0,09%	0,00%		
	60	0,00%	0,00%	0,00%		60	0,01%	0,01%	0,01%		
	65	0,00%	0,00%	0,00%		65	0,00%	0,00%	0,00%		
	70	0,00%	0,00%	0,00%		70	0,00%	0,00%	0,00%		
	75	0,00%	0,00%	0,00%		75	0,00%	0,00%	0,00%		
	80	0,00%	0,00%	0,00%		80	0,00%	0,00%	0,00%		
	85	0,00%	0,00%	0,00%		85	0,00%	0,00%	0,00%		
	90	0,00%	0,00%	0,00%		90	0,00%	0,00%	0,00%		

Puisque la tendance demeure la même qu'il y ait un ou deux éléments considérés, l'analyse de la section 6.1.3.1 demeure applicable pour cette section.

6.2.3.2 Paramètres financiers et débit routier stochastiques

Avec l'utilisation de valeurs financières et de débit stochastique, le modèle de détérioration stochastique n'est plus le seul à influencer les réparations optimales. Il est à noter que les mêmes valeurs financières et de débits simulées pour les autres modèles de détérioration sont utilisées ici. Les détériorations des éléments simulées à la section 6.2.3.1 sont aussi conservées à des fins de comparaison. La répartition des moments de réparation optimaux pour chaque élément pour 20 000 simulations est présentée graphiquement à la Figure 6.33 et au Tableau 6.28.

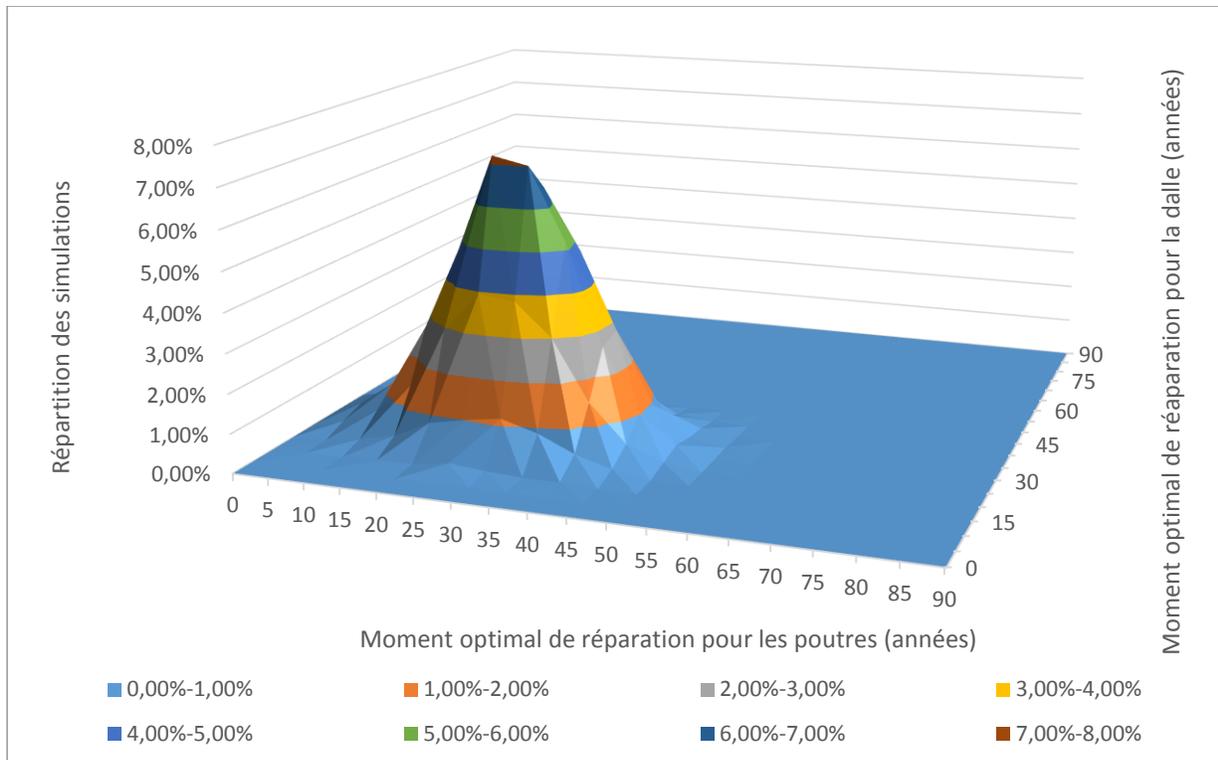


Figure 6.33 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit stochastiques

Tableau 6.28 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres financiers et de débit stochastiques

		Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)										
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5	0,00%	0,01%	0,03%	0,05%	0,27%	0,45%	0,43%	0,14%	0,04%	0,00%	0,00%
	10	0,00%	0,01%	0,02%	0,19%	0,65%	1,10%	0,80%	0,41%	0,07%	0,02%	0,00%
	15	0,00%	0,01%	0,06%	0,39%	1,40%	2,69%	2,39%	0,92%	0,20%	0,01%	0,00%
	20	0,00%	0,01%	0,08%	0,82%	2,91%	4,77%	4,32%	1,77%	0,27%	0,03%	0,00%
	25	0,00%	0,01%	0,21%	1,01%	3,95%	7,22%	5,75%	2,64%	0,46%	0,03%	0,00%
	30	0,00%	0,02%	0,13%	1,15%	3,84%	7,02%	6,31%	2,62%	0,55%	0,06%	0,01%
	35	0,00%	0,01%	0,08%	0,88%	3,02%	5,19%	4,77%	2,00%	0,41%	0,02%	0,00%
	40	0,00%	0,01%	0,08%	0,47%	1,48%	2,64%	2,80%	1,13%	0,22%	0,03%	0,00%
	45	0,00%	0,01%	0,02%	0,20%	0,53%	1,03%	0,95%	0,41%	0,12%	0,01%	0,00%
	50	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,17%	0,31%	0,19%	0,14%	0,03%	0,01%	0,00%
	55	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,02%	0,02%	0,05%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	

Encore une fois, le choix du moment de réparation est beaucoup moins volatil pour une détérioration stochastique que pour une détérioration markovienne, malgré l'ajout de valeurs financières et de débit stochastiques. Par contre, la tendance demeure difficile à étudier en raison du grand nombre de résultats possibles. Afin de simplifier l'analyse, les moments optimaux de réparation sont étudiés individuellement au Tableau 6.29 et comparés aux moments optimaux de réparation si un seul élément représente l'état global du pont.

Tableau 6.29 – Répartition des moments optimaux de réparation pour la dalle en béton armé et les poutres en acier s'ils sont étudiés seuls ou ensemble pour une détérioration stochastique et des paramètres financiers et de débit stochastiques

		Dalle en béton armé					Poutres en acier		
		2 éléments considérés	1 élément considéré	Différence			2 éléments considérés	1 élément considéré	Différence
Moment optimal de réparation de la dalle (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	Moment optimal de réparation des poutres (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%
	5	0,07%	0,09%	-0,02%		5	1,39%	1,17%	0,23%
	10	0,68%	0,88%	-0,20%		10	3,24%	3,12%	0,12%
	15	5,15%	5,43%	-0,28%		15	8,05%	7,37%	0,68%
	20	18,21%	18,23%	-0,02%		20	14,97%	15,58%	-0,61%
	25	32,42%	32,23%	0,18%		25	21,27%	21,85%	-0,58%
	30	28,75%	28,62%	0,13%		30	21,68%	21,87%	-0,19%
	35	12,18%	12,07%	0,11%		35	16,36%	16,05%	0,31%
	40	2,36%	2,34%	0,02%		40	8,83%	8,91%	-0,08%
	45	0,19%	0,12%	0,07%		45	3,26%	3,04%	0,22%
	50	0,01%	0,01%	0,00%		50	0,85%	0,86%	-0,01%
	55	0,00%	0,00%	0,00%		55	0,09%	0,21%	-0,12%
	60	0,00%	0,00%	0,00%		60	0,02%	0,01%	0,01%
	65	0,00%	0,00%	0,00%		65	0,00%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%		70	0,00%	0,00%	0,00%
	75	0,00%	0,00%	0,00%		75	0,00%	0,00%	0,00%
	80	0,00%	0,00%	0,00%		80	0,00%	0,00%	0,00%
	85	0,00%	0,00%	0,00%		85	0,00%	0,00%	0,00%
90	0,00%	0,00%	0,00%	90	0,00%	0,00%	0,00%		

En analysant les résultats, il est possible de constater qu'il n'y a pas de différence significative pour un élément s'il est analysé comme seul élément du pont ou non. En effet, ce résultat vient encore une fois confirmer que la détérioration d'un élément est étudiée comme un événement aléatoire indépendant et n'est donc pas influencée par le reste du pont.

Afin de déterminer l'impact des variables financières et de débit qui sont maintenant stochastiques, il faut déterminer, simulation par simulation, l'impact sur le résultat. Ainsi, la différence de moment

de réparation pour la dalle en béton armé pour une détérioration stochastique à deux éléments est présentée à la Figure 6.34. Le scénario avec paramètres financiers et de débit déterministe est utilisé comme scénario de base.

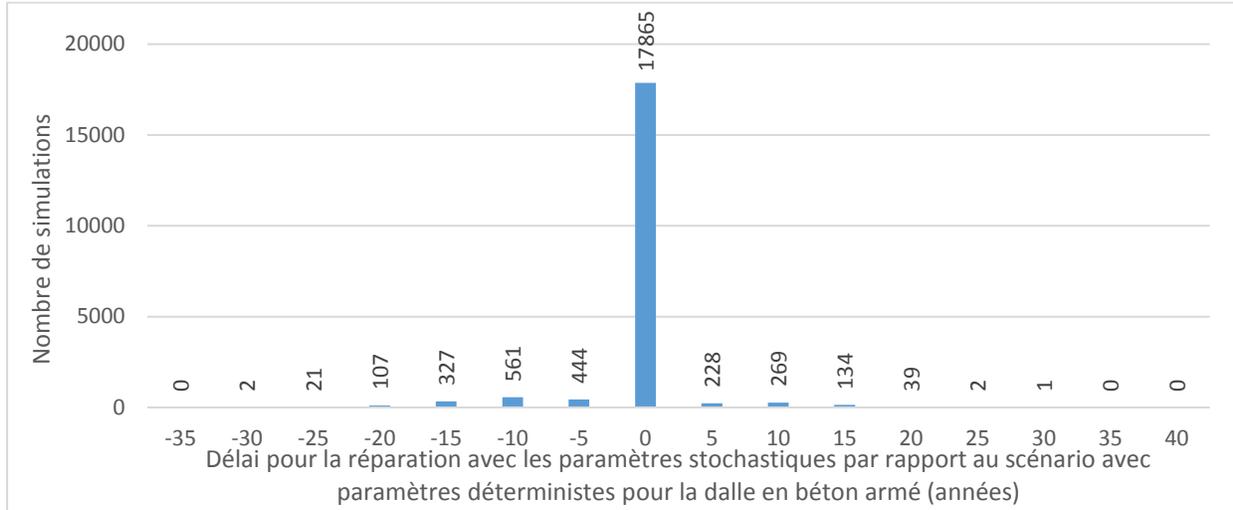


Figure 6.34 - Délai pour la réparation optimale pour le scénario avec paramètres financiers et de débit stochastiques par rapport aux paramètres financiers et de débit déterministes pour une détérioration stochastique de la dalle en béton armé lorsque deux éléments sont considérés

La différence de moment de réparation pour les poutres en acier pour une détérioration stochastique à deux éléments est présentée à la Figure 6.35. Le scénario avec paramètres financiers et de débit déterministe est utilisé comme scénario de base.

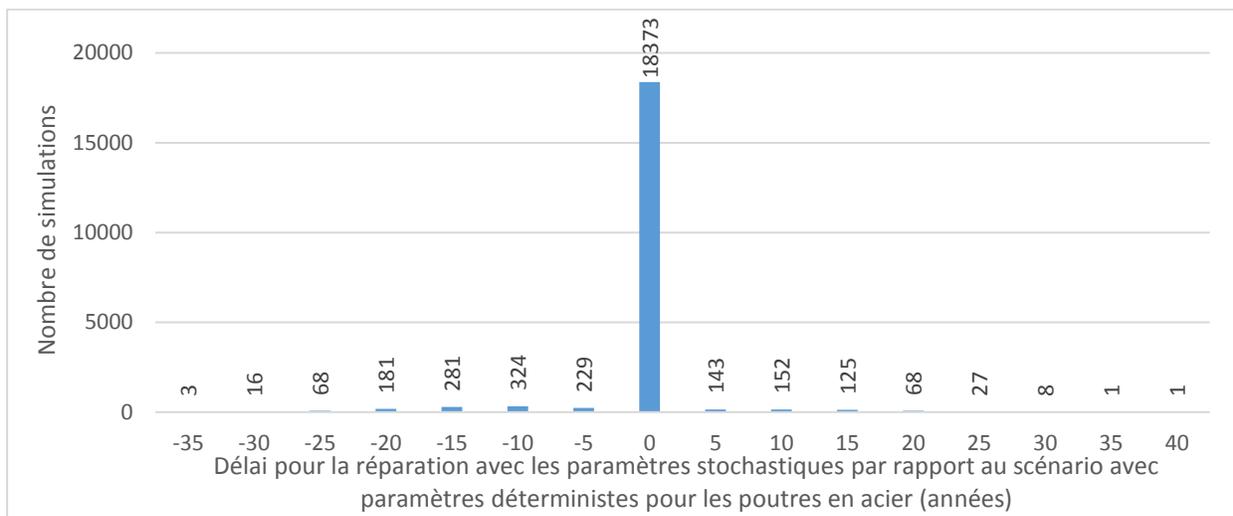


Figure 6.35 - Délai pour la réparation optimale pour le scénario avec paramètres financiers et de débit stochastiques par rapport aux paramètres financiers et de débit déterministes

pour une détérioration stochastique des poutres en acier lorsque deux éléments sont considérés

À première vue, le moment optimal de réparation est affecté pour l'un ou l'autre des éléments pour environ 10% des simulations lorsque les paramètres financiers et de débit deviennent stochastiques. Cet impact peut aller jusqu'à 30 ans pour la dalle et jusqu'à 40 ans pour les poutres. Les variables financières et de débit stochastiques peuvent donc avoir un impact significatif sur le moment optimal pour réparer. L'analyse de la section 6.1.1.2 explique alors que c'est le taux d'intérêt qui a la plus grande influence sur les résultats, suivi des taux d'inflation.

6.2.4 Résumé des résultats pour l'étude de la détérioration de la dalle en béton armé et des poutres en acier

La section 6.2 visait à comparer trois modèles de détérioration sur deux éléments d'un pont, la dalle en béton armé et les poutres en acier, afin de déterminer le moment optimal de réparation. Les trois modèles de détérioration sont le modèle déterministe, le modèle markovien et le modèle stochastique. Le modèle déterministe suit la même détérioration sur une période donnée pour un état initial donné. Le modèle markovien fait changer l'état total d'une structure selon un tirage aléatoire à chaque période. Le modèle stochastique est un modèle développé dans le cadre de cette étude où la détérioration évolue à mesure que les informations de détérioration sur la structure dans le temps sont connues.

Les résultats démontrent que pour le modèle déterministe, le moment optimal pour réparer une dalle en béton armé est de 25 alors qu'il est de 30 ans pour des poutres en acier. Ce résultat représente bien la tendance réelle pour la durée de vie moyenne d'une dalle en béton armé tourne aux alentours de 25 ou 30 ans, mais est tout de même conservateur pour les poutres en acier. Par contre, ce modèle de détérioration ne permet pas d'inclure aucun facteur aléatoire dans la détérioration, ce qui rend une analyse à grande échelle plus difficile.

Les résultats du modèle de détérioration markovien sont très répartis et propose une réparation optimale entre 10 et 40 ans pour la dalle en béton armé, alors qu'il est presque impossible de tirer une tendance des résultats pour les poutres en acier, les résultats étant trop répartis sur l'ensemble des périodes possibles. La détérioration sur les poutres étant moins sévère que sur la dalle, la probabilité de maintien à l'état neuf sur la durée de vie est très élevée (18%).

Les résultats du modèle stochastique sont entre le modèle déterministe et markovien. Le moment optimal de réparation d'une dalle en béton armé serait entre 20 et 35 ans avec quelques possibilités de retarder ou devancer la réparation selon l'évolution de la détérioration. Le moment optimal de réparation pour les poutres est entre 15 et 40 ans, soit un peu plus dispersé que pour la dalle en béton armé. Cette plus grande dispersion s'explique par la détérioration plus lente d'une poutre en acier (probabilité de maintien de la matrice élevée). En effet, lors de l'évolution de la détérioration, il arrive que le modèle plafonne ce qui ralentit la détérioration (probabilité de maintien à 95%).

Les résultats pour la détérioration stochastique (markovienne ou stochastique) tant de la dalle en béton armé et des poutres en acier montrent une tendance qui serait intéressante d'approfondir pour une prochaine étude. Le résultat peut être influencé par deux aspects qui sont intrinsèque au modèle, soit la détérioration post-réparation et l'optimisation du temps dans l'état D. En effet, la réparation pourrait être retardé ou devancé de 5 à 10 ans si la détérioration post-réparation n'est pas favorable au moment normalement considéré comme optimal. Aussi, si un élément fait face à deux détériorations rapides (avant et après la réparation), le temps de réparation peut être retardé afin de limiter la période de temps où l'élément se retrouve dans l'état D. Ce deuxième aspect imposé par la limitation du modèle à une seule réparation sur la durée de vie totale de la structure. Il pourrait être intéressant d'augmenter le nombre de réparations possibles pour diminuer l'impact de cet aspect.

Finalement, l'évolution des paramètres financiers et de débits ont aussi un impact sur le choix du moment optimal de réparation des éléments. Cet aspect peut avoir un impact jusqu'à 10 ans sur le moment optimal de réparation. Cette section a démontré que c'est principalement l'évolution du taux d'intérêt qui affecte le moment optimal de réparation. Puisque les paramètres financiers et de débit sont les mêmes pour les deux éléments, l'impact sur le moment de réparation optimal devrait être perceptible tant pour la dalle que les poutres.

CHAPITRE 7 : ANALYSE DE SENSIBILITÉ

L'analyse de sensibilité permet de vérifier l'impact de certains paramètres fixes initiaux et de voir à quel point la précision est décisive sur les résultats. Cette analyse se fera avec les paramètres de débit et financiers déterministes et avec un seul élément en détérioration, soit la dalle en béton armé.

7.1 Matrice de transition

Pour déterminer la sensibilité de la matrice de détérioration, il faut faire varier les valeurs de la matrice et voir l'impact de ces modifications. L'objectif est de déterminer quelle précision est nécessaire afin d'éviter une modification significative des résultats.

7.1.1 Modèle de détérioration déterministe

Pour la détérioration déterministe, il suffit de déterminer à partir de quelle matrice de transition le choix optimal passe de 25 ans à 30 ans, puis de 25 ans à 20 ans. Pour augmenter à 30 ans, il faut une variation de moins d'un pour cent à chaque ligne de la matrice. Il faut se rappeler que la différence entre les valeurs actualisées nettes de ces deux choix était déjà très faible (voir Tableau 6.3). Cela signifie que la matrice de base était déjà à la limite du choix optimal de 25 ans.

Une réparation à 20 ans n'était toutefois pas envisageable à priori. En effet, pour changer le choix optimal à 20 ans, il faut abaisser la diagonale de la matrice par plus de 10% (et augmenter les valeurs de droite du même pourcentage). Ainsi, la matrice de transition initiale a très peu d'impact sur le choix optimal. L'impact est davantage sur l'ordre de grandeur des valeurs actualisées et donc des gains faits grâce à un choix optimal. Les matrices limites (au pour cent près) pour changer le scénario optimal de 25 ans à un autre choix optimal sont présentées au Tableau 7.1. La matrice faisant passer la réparation à 20 ans dans ce cas-ci sera dénommée *sévère*, alors que la matrice faisant passer la réparation à 30 sera dénommée *légère*. La matrice utilisée par le MTMDET sera dénommée *de base*.

Tableau 7.1 - Matrice limite pour modifier le choix optimal avec l'approche déterministe

Moment optimal	20 ans (Sévère)	30 ans (Légère)
Matrice limite	$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,69 & 0,31 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,56 & 0,44 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,35 & 0,65 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix}$	$[P_5] = \begin{bmatrix} 0,85 & 0,15 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,72 & 0,28 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,51 & 0,49 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix}$

7.1.2 Modèle de détérioration markovien

Puisqu'il est plus difficile de cibler un changement notable des scénarios optimaux de réparation à l'aide de la détérioration markovienne, les deux matrices trouvées à la dernière section sont utilisées pour déterminer les moments optimaux de réparation. Le moment optimal pour réparer est présenté pour les trois matrices de transition à la Figure 7.1.

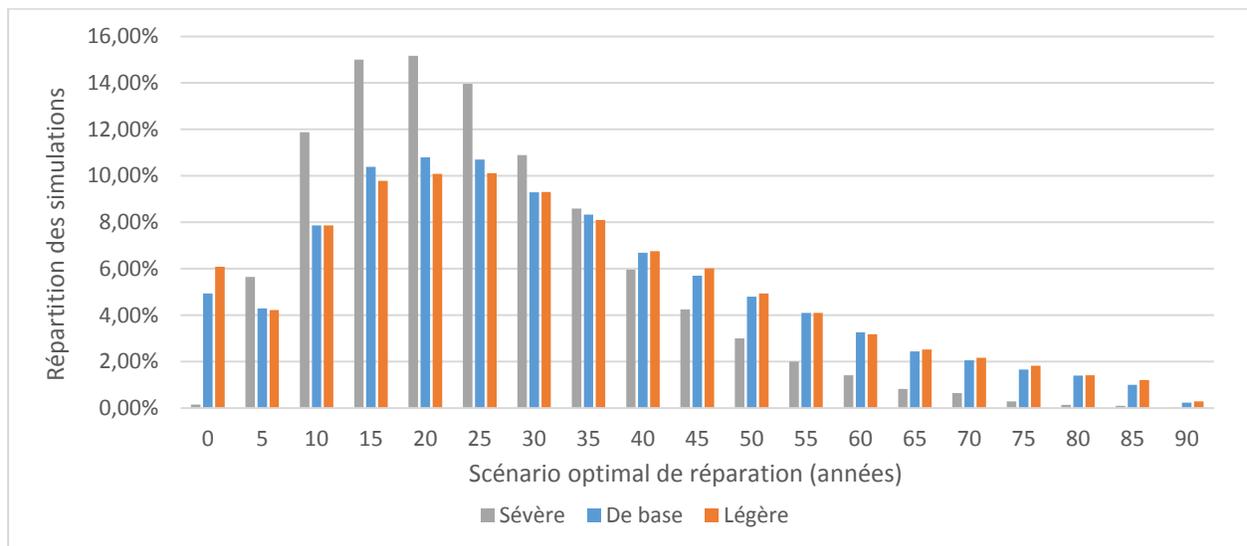


Figure 7.1 – Répartition des moments optimaux de réparation pour l'approche markovienne avec 3 matrices de transition (sévère, de base et légère)

À la vue de la dispersion des scénarios optimaux, l'impact est surtout sur la densité des valeurs. Plus la matrice est sévère dans la détérioration, plus la date optimale est hâtive. Il faut aussi noter que les valeurs sont plus condensées pour un tel scénario alors que les valeurs sont plus dispersées avec la matrice la moins conservatrice (notée légère à la Figure 7.1). Cela s'explique principalement par le nombre important de simulations qui restent dans un bon état (A) sur une plus grande période et ne peuvent donc être réparées plus tôt.

7.1.3 Modèle de détérioration stochastique

La même méthode d'analyse que la section précédente est utilisée pour la détérioration stochastique. Ainsi, le moment optimal de réparation selon la matrice de transition utilisée est présenté à la Figure 7.2.

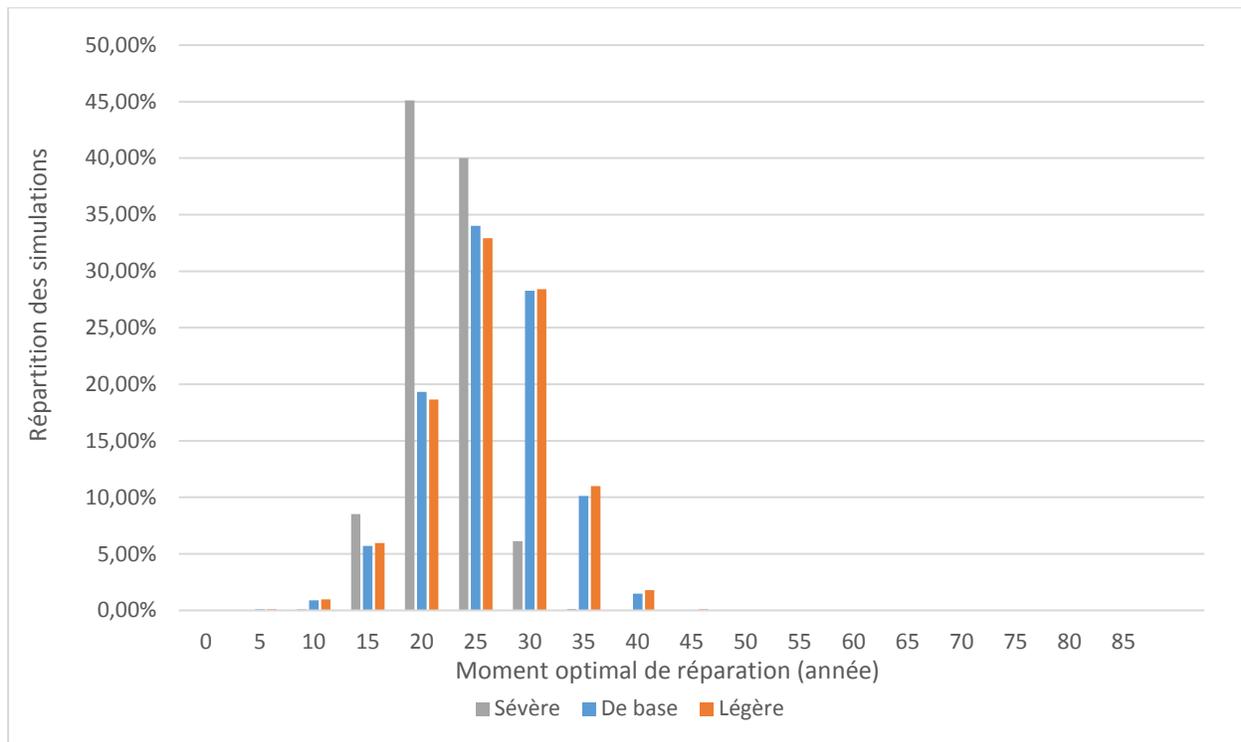


Figure 7.2 - Répartition des moments optimaux de réparation pour l'approche stochastique avec 3 matrices de transition (sévère, de base et légère)

Il est possible de remarquer que plus la matrice est sévère, moins le choix optimal est volatil. De plus, le moment optimal est aussi avancé (entre 15 et 30 ans pour la matrice sévère). La différence de volatilité entre la matrice légère et de base est moins notable en raison de leur proximité. Malgré tout, il est possible de voir que la distribution du moment optimal est plus tardive avec l'utilisation de la matrice légère.

7.1.4 Résumé des impacts de la matrice de transition

La matrice de transition (ou de détérioration) reflète la sévérité de la détérioration d'un élément dans le temps. Ainsi, il est évident que de modifier ce paramètre a un impact direct sur le moment optimal de réparation.

Une matrice plus sévère (détérioration rapide) nécessite des réparations plus rapides. La répartition des moments optimaux de réparations sera donc plus à gauche et plus condensée sur le graphique. À l'inverse, une détérioration plus lente retardera le moment optimal de réparation et augmentera aussi la distribution des résultats. Cette section a démontré qu'une modification d'un seul pourcent sur la matrice a une influence sur le moment optimal de réparation.

7.2 Pénalité d'état

La pénalité d'état dans ce modèle a été introduite comme une hypothèse pour considérer que la détérioration d'une structure affecte négativement ses revenus. En effet, il est possible de croire qu'un pont en mauvais état sera affecté par des travaux de réfection routiniers plus fréquents, des accidents plus fréquents ou même un ralentissement du débit routier. L'hypothèse de base pour cette variable est peu négative pour les états B et C, mais très défavorable pour l'état D. L'approche *de base* sera comparée avec une approche linéaire et une approche basée sur la valeur résiduelle du MTMDET. Ces deux approches sont présentées au Tableau 7.2 et seront étudiées pour chaque modèle de détérioration utilisé dans cette étude avec les paramètres déterministes.

Tableau 7.2 – Approche linéaire et du MTMDET pour la pénalité d'état

	Approche linéaire	Approche MTMDET
Pénalité d'état	$PE = [1 \quad 0,667 \quad 0,333 \quad 0]$	$PE = [1 \quad 0,3 \quad 0,15 \quad 0]$

7.2.1 Modèle de détérioration déterministe

Pour la détérioration déterministe, le moment de réparation optimal est de 25 avec les paramètres initiaux du modèle. Pour cette analyse de sensibilité, la pénalité d'état est modifiée pour les deux approches présentées précédemment. L'approche linéaire dévalorise légèrement l'état B et l'état C par rapport aux valeurs initiales. Pour de telles valeurs, le moment optimal reste inchangé à 25 ans. Ainsi, il y a une certaine marge de manœuvre sur ce paramètre avant qu'un impact se fasse ressentir lorsque la détérioration déterministe est utilisée.

L'approche de la valeur résiduelle du MTMDET est plus critique envers la détérioration. Pour une telle pénalité d'état, le moment optimal est maintenant de 20 ans. La réparation se fait donc alors qu'une plus grande proportion de la dalle se trouve dans l'état A. Ce résultat donne une idée de la dépréciation qu'il faut attribuer à la détérioration pour percevoir un impact sur le moment optimal

de réparation. Or, il faut mentionner que cette pénalité est exagérée puisqu'une dalle dans l'état B ou C demeure toujours fonctionnel et n'empêche donc pas significativement la rentabilité. Le débit routier pourra toujours emprunter la structure. Il faut cependant considérer une hausse des interventions routinières qui peuvent être nécessaires et une baisse (mineure) de la sécurité des usagers qui est comptabilisée dans les revenus grâce au terme de pénalité d'état. Ainsi, l'hypothèse initiale (modèle de base) semble plus appropriée pour représenter la réalité, mais une étude exhaustive pourrait proposer des valeurs plus précises.

7.2.2 Modèle de détérioration markovienne

Pour la détérioration markovienne, la variabilité du moment optimal de réparation était déjà très élevée. La modification du paramètre de pénalité d'état a donc un effet limité sur le résultat global. Le moment optimal de réparation pour les approches de pénalité d'état de types linéaire, de base et MTMDET est présenté à la Figure 7.3.

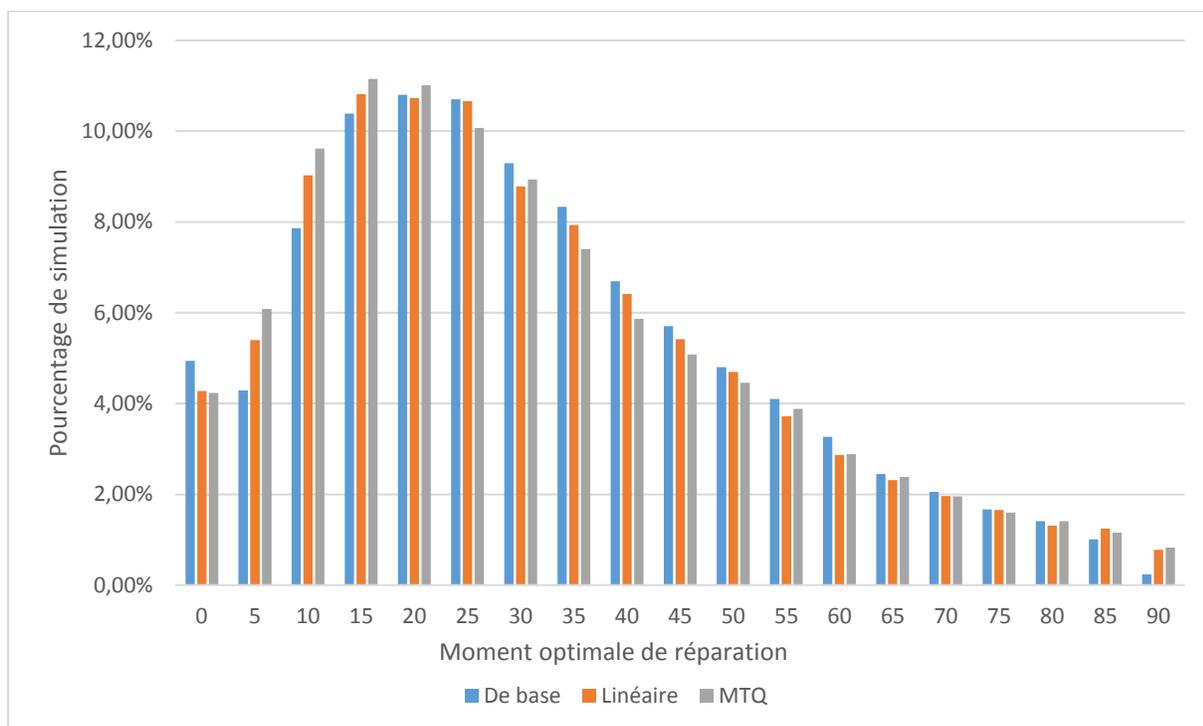


Figure 7.3 - Moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne selon différentes approches de pénalité d'état

L'impact est difficilement perceptible entre les différents paramètres de pénalité d'état utilisés. Il est cependant possible de constater que plus la pénalité d'état est importante (bas pourcentage)

pour les états B et C, plus la réparation optimale sera hâtive. Ce phénomène est plutôt perceptible pour les résultats avant 20 ans. Il faut aussi noter la baisse de ponts qui ne nécessitent aucune réparation sur la durée de vie avec la pénalité d'état linéaire et du MTMDET. Cette baisse est attribuable aux réparations hâtives.

7.2.3 Modèle de détérioration stochastique

Pour la détérioration stochastique, le moment optimal de réparation est fortement influencé par la pénalité d'état. Le moment optimal de réparation pour chacune des approches de pénalité d'état est présenté à la Figure 7.4.

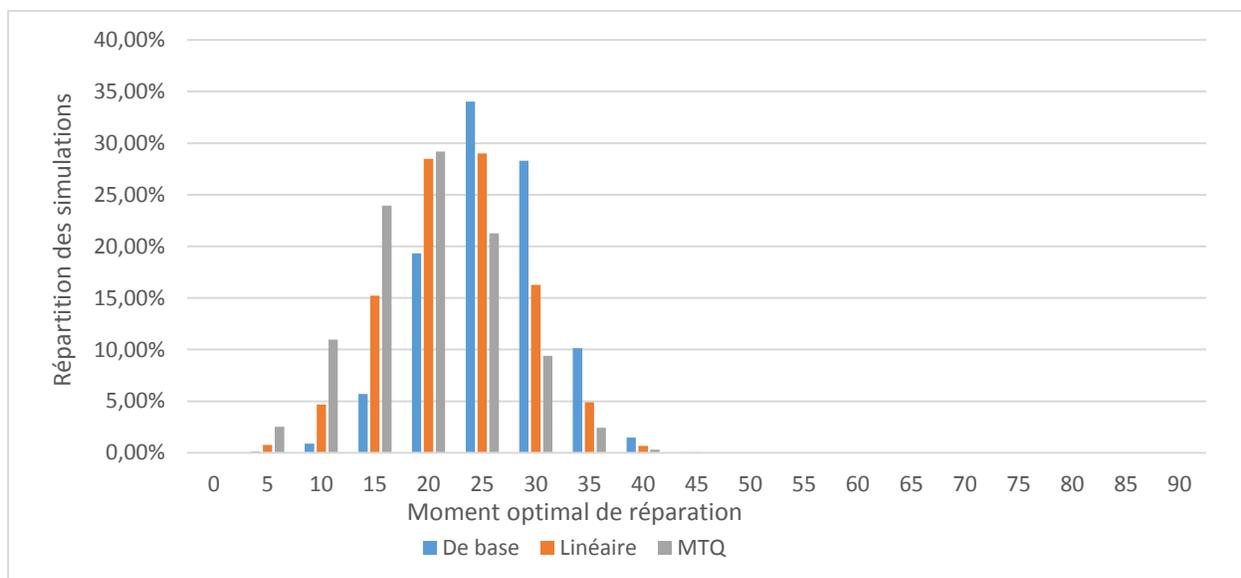


Figure 7.4 - Moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique selon différentes approches de pénalité d'état

Il est possible de remarquer que la dispersion semble peu affectée par le choix de la pénalité d'état. Il faut cependant remarquer que plus la pénalité d'état est sévère plus le moment optimal de réparation est hâtif. Avec la pénalité d'état de base, une réparation à 25 ou 30 était à privilégier. Pour une pénalité d'état linéaire, une réparation de 20 à 25 est à privilégier, alors que pour une pénalité d'état suivant les valeurs résiduelles du MTMDET, une réparation de 15 à 20 est à privilégier.

7.2.4 Résumé des impacts de la pénalité d'état

Le paramètre de pénalité d'état fait varier directement les revenus selon l'état dans lequel se trouve un élément. Cette section a testé deux modèles de pénalités d'états plus sévère que celui de l'étude. En étant plus sévère, le paramètre de pénalité d'état pénalise grandement les structures détériorées. Il est donc normal que plus la pénalité d'état est sévère pour une structure détériorée, plus la réparation serait faite tôt dans la détérioration. C'est pour cette raison que la dispersion des résultats est peu affectée par les modifications de ce paramètre, alors que le moment optimal de réparation est davantage affecté.

Le paramètre de pénalité d'état n'a pas été énormément développé dans le cadre de cette étude, mais pourrait être critique dans le développement d'un modèle fiable de gestion des structures. Ce paramètre doit pouvoir considérer tous les risques monétaires pouvant être causés par une structure déficiente.

7.3 Bornes pour l'approche stochastique

Les bornes pour l'approche stochastique ont été fixées à 5% de la matrice de base de la dalle en béton armé comme hypothèse initiale. Cela signifie que les courbes extrêmes correspondent à la détérioration de la matrice de transition de base où chaque terme de la diagonale a été modifié par plus ou moins 5%. Bien entendu, le terme à droite de la diagonale est modifié par l'inverse afin que chaque ligne somme à 100%. Cette variation pourra se confirmer à la venue de nouveaux rapports d'inspection. Pour l'instant, la sensibilité de ce paramètre sera étudiée. Des bornes de 2% et de 8% de la matrice de base seront étudiées. Encore une fois, les paramètres financiers et de débits sont utilisés de façon déterministe pour cette analyse. Le moment optimal de réparation pour chaque borne de l'approche stochastique est présenté à la Figure 7.5.

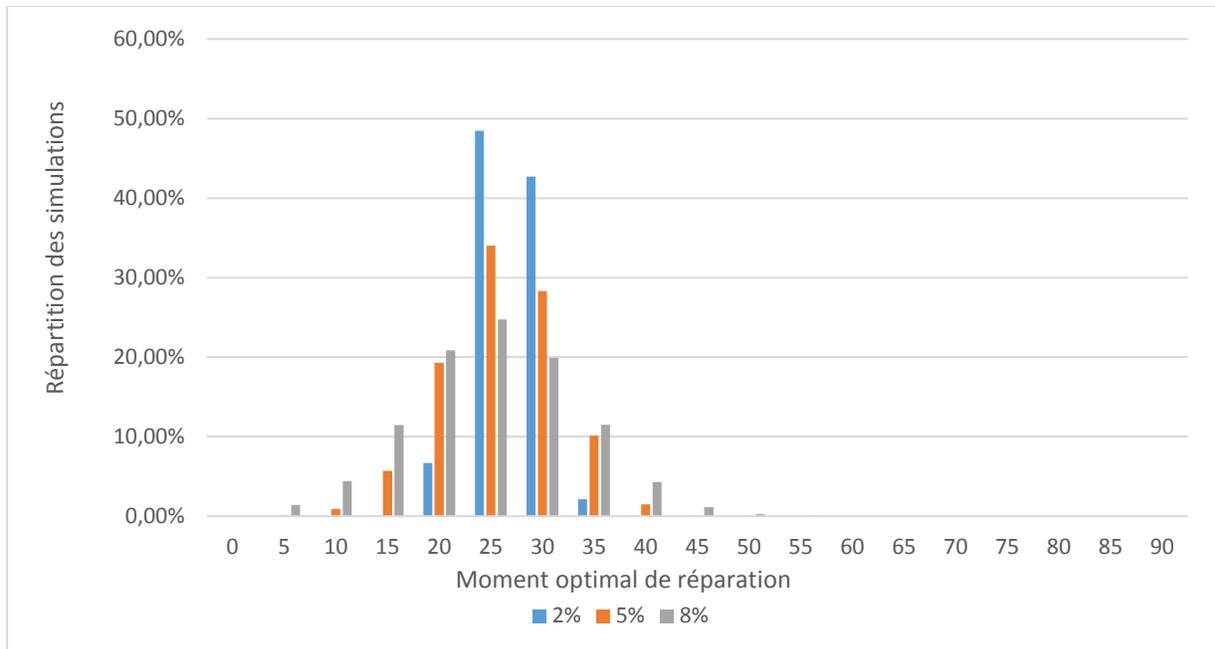


Figure 7.5 - Moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique selon différents pourcentages de bornes extrêmes

À l'aide de cette figure, il est possible de remarquer que le moment optimal moyen demeure inchangé à 25 ans pour toutes les approches. C'est la volatilité des résultats qui est largement affectée par ce paramètre. Il est possible de remarquer que pour une variation de 2%, l'ensemble des moments optimaux de réparation se situe 20 et 35 ans. Pour une variation de 5%, cet ensemble devient de 10 à 40 ans, alors que pour une variation de 8%, l'ensemble est de 5 à 50 ans ce qui est significativement plus étalé. Il faut comprendre qu'en augmentant la différence entre la médiane et les extrêmes, il y a davantage d'étalement possible dans les résultats.

7.4 Avantage d'une réparation simultanée

Lorsque le pont est représenté par la dalle en béton armé et les poutres en acier, l'étude considère la réparation de chaque élément comme un événement indépendant. Pourtant, il pourrait être logique de penser qu'une réparation simultanée des deux éléments devrait procurer un avantage économique. En effet, les coûts d'intervention devraient être réduits puisque certains frais fixes seraient répartis entre les deux réparations. À cet effet, cette section étudie l'impact de réduire les dépenses totales si les réparations sont exécutées à la même période sur le moment optimal de réparation.

7.4.1 Modèle de détérioration déterministe

Pour la détérioration déterministe, le moment optimal de réparation était de 25 ans pour la dalle en béton armé et de 30 ans pour les poutres en acier. À la section 6.1.1.1, il a cependant été démontré que l'avantage économique de réparation à 25 ans pour la dalle est très faible par rapport à une réparation à 30 ans. Cette section étudiera donc la réduction de coût de réparation nécessaire lors d'une réparation simultanée pour qu'il devienne optimal de réparer les deux éléments à 30 ans. Pour ce faire, une approche algébrique est utilisée. Sachant les valeurs actualisées pour les deux scénarios, il faut donc déterminer la réduction de coûts nécessaires pour combler l'écart. Ce cheminement est présenté à l'équation 7.1.

$$VAN_{25-30} - VAN_{30-30} = 249\,507\,559\$ - 249\,474\,720\$ \cong 32\,840\$ \quad 7.1$$

Ainsi, il faut réduire les coûts bruts de 32 840\$. Il faut savoir que les coûts de réparation totaux indexés à 30 ans et actualisés pour les deux éléments sont de 882 735\$. Une réduction de 32 840\$ correspond donc à une réduction de 3,72% des coûts. Pour la détérioration déterministe, il faut donc un avantage de réparation simultané d'au moins 3,72% pour affecter la décision. Cette économie devrait être réalisée simplement par la réduction des frais d'immobilisation.

7.4.2 Modèle de détérioration markovien

Pour la détérioration markovienne, le pourcentage de réduction de coût pour obtenir des réparations simultanée varie significativement d'une simulation à l'autre. Ainsi, trois niveaux de réductions de coûts sont étudiés pour déterminer l'impact sur le moment optimal de réparation. Des réductions de 10%, de 30% et de 50% des coûts simultanés sont analysées. Pour ce faire, un nouvel ensemble de 20 000 simulations est généré. Aucun avantage de réparation simultanée n'est d'abord attribué. Ce bloc de simulation sert donc de comparatif pour déterminer l'impact des avantages sur le coût. Les coûts et les valeurs actualisées sont ensuite recalculés avec les différents pourcentages d'avantages de réparation simultanée. La répartition des moments optimaux de réparation sans avantage de réparation simultanée est présentée au Tableau 7.3. La répartition pour un avantage de 10%, 30% et 50% est présentée respectivement au Tableau 7.4, au Tableau 7.5 et au Tableau 7.6. La différence entre un avantage de réparation simultané de 10%, 30% et 50% par rapport au cas sans avantage est présentée respectivement au Tableau 7.7, au Tableau 7.8 et au Tableau 7.9.

Tableau 7.3 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres déterministes sans avantage de réparation simultanée

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	1,22%	0,17%	0,31%	0,37%	0,41%	0,28%	0,35%	0,30%	0,22%	0,28%	0,22%	0,20%	0,16%	0,14%	0,13%	0,16%	0,08%	0,04%	0,00%
	5	0,87%	0,17%	0,25%	0,31%	0,28%	0,29%	0,31%	0,23%	0,16%	0,21%	0,23%	0,15%	0,15%	0,13%	0,16%	0,09%	0,10%	0,02%	0,00%
	10	1,79%	0,31%	0,38%	0,63%	0,58%	0,54%	0,60%	0,49%	0,43%	0,33%	0,36%	0,31%	0,26%	0,21%	0,22%	0,20%	0,15%	0,03%	0,00%
	15	2,20%	0,36%	0,66%	0,81%	0,71%	0,78%	0,66%	0,59%	0,57%	0,49%	0,45%	0,45%	0,37%	0,31%	0,30%	0,20%	0,27%	0,07%	0,00%
	20	2,31%	0,45%	0,72%	0,87%	0,83%	0,81%	0,73%	0,66%	0,69%	0,50%	0,50%	0,36%	0,39%	0,27%	0,37%	0,27%	0,25%	0,06%	0,00%
	25	2,17%	0,44%	0,73%	0,67%	0,73%	0,66%	0,65%	0,55%	0,50%	0,62%	0,50%	0,35%	0,32%	0,27%	0,30%	0,31%	0,20%	0,07%	0,00%
	30	2,07%	0,45%	0,70%	0,67%	0,79%	0,64%	0,65%	0,46%	0,61%	0,41%	0,40%	0,39%	0,38%	0,29%	0,26%	0,20%	0,25%	0,06%	0,00%
	35	2,12%	0,32%	0,61%	0,54%	0,74%	0,54%	0,53%	0,52%	0,51%	0,45%	0,30%	0,44%	0,33%	0,28%	0,21%	0,21%	0,20%	0,04%	0,00%
	40	1,51%	0,29%	0,43%	0,54%	0,53%	0,42%	0,47%	0,43%	0,38%	0,37%	0,36%	0,30%	0,28%	0,21%	0,15%	0,18%	0,18%	0,04%	0,00%
	45	1,44%	0,32%	0,37%	0,41%	0,44%	0,33%	0,24%	0,44%	0,32%	0,29%	0,22%	0,22%	0,20%	0,21%	0,12%	0,19%	0,14%	0,02%	0,00%
	50	1,06%	0,19%	0,27%	0,31%	0,35%	0,30%	0,29%	0,28%	0,28%	0,29%	0,18%	0,16%	0,15%	0,17%	0,12%	0,11%	0,10%	0,02%	0,00%
	55	0,86%	0,17%	0,30%	0,29%	0,27%	0,26%	0,30%	0,21%	0,19%	0,21%	0,18%	0,12%	0,15%	0,14%	0,11%	0,09%	0,10%	0,01%	0,00%
	60	0,66%	0,14%	0,17%	0,23%	0,26%	0,20%	0,22%	0,28%	0,18%	0,17%	0,14%	0,11%	0,09%	0,14%	0,09%	0,13%	0,11%	0,04%	0,00%
	65	0,61%	0,07%	0,16%	0,15%	0,17%	0,14%	0,23%	0,19%	0,15%	0,10%	0,14%	0,10%	0,09%	0,03%	0,09%	0,06%	0,05%	0,02%	0,00%
	70	0,41%	0,10%	0,12%	0,19%	0,15%	0,09%	0,18%	0,11%	0,08%	0,11%	0,12%	0,08%	0,08%	0,06%	0,05%	0,06%	0,05%	0,01%	0,00%
	75	0,41%	0,05%	0,15%	0,13%	0,14%	0,12%	0,14%	0,14%	0,10%	0,07%	0,08%	0,05%	0,06%	0,05%	0,06%	0,02%	0,04%	0,01%	0,00%
	80	0,27%	0,03%	0,09%	0,13%	0,09%	0,12%	0,07%	0,08%	0,08%	0,04%	0,07%	0,06%	0,04%	0,05%	0,04%	0,03%	0,03%	0,01%	0,00%
85	0,20%	0,06%	0,08%	0,09%	0,07%	0,10%	0,06%	0,06%	0,05%	0,04%	0,06%	0,04%	0,03%	0,05%	0,03%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%	
90	0,04%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,04%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%	

Tableau 7.4 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres déterministes avec 10% d'avantage de réparation simultanée

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	1,22%	0,17%	0,31%	0,37%	0,41%	0,28%	0,35%	0,30%	0,22%	0,28%	0,22%	0,20%	0,16%	0,14%	0,13%	0,16%	0,08%	0,04%	0,00%
	5	0,87%	0,17%	0,25%	0,31%	0,28%	0,29%	0,31%	0,23%	0,16%	0,21%	0,23%	0,15%	0,15%	0,13%	0,16%	0,09%	0,10%	0,02%	0,00%
	10	1,79%	0,30%	0,40%	0,63%	0,57%	0,54%	0,60%	0,49%	0,43%	0,33%	0,36%	0,31%	0,26%	0,21%	0,22%	0,20%	0,15%	0,03%	0,00%
	15	2,20%	0,35%	0,65%	0,89%	0,67%	0,77%	0,66%	0,59%	0,56%	0,49%	0,45%	0,45%	0,37%	0,31%	0,30%	0,20%	0,27%	0,07%	0,00%
	20	2,31%	0,45%	0,72%	0,87%	0,88%	0,79%	0,72%	0,65%	0,69%	0,50%	0,50%	0,36%	0,39%	0,27%	0,37%	0,27%	0,25%	0,06%	0,00%
	25	2,17%	0,44%	0,73%	0,66%	0,70%	0,74%	0,62%	0,54%	0,50%	0,62%	0,50%	0,35%	0,32%	0,27%	0,30%	0,31%	0,20%	0,07%	0,00%
	30	2,07%	0,45%	0,70%	0,67%	0,78%	0,62%	0,70%	0,45%	0,61%	0,40%	0,40%	0,39%	0,38%	0,29%	0,26%	0,20%	0,25%	0,06%	0,00%
	35	2,12%	0,32%	0,61%	0,54%	0,74%	0,54%	0,52%	0,57%	0,50%	0,45%	0,30%	0,44%	0,33%	0,28%	0,21%	0,21%	0,20%	0,04%	0,00%
	40	1,51%	0,29%	0,43%	0,54%	0,53%	0,42%	0,46%	0,41%	0,43%	0,35%	0,36%	0,30%	0,28%	0,21%	0,15%	0,18%	0,18%	0,04%	0,00%
	45	1,44%	0,32%	0,37%	0,41%	0,43%	0,33%	0,24%	0,44%	0,30%	0,32%	0,22%	0,21%	0,20%	0,21%	0,12%	0,19%	0,14%	0,02%	0,00%
	50	1,06%	0,19%	0,27%	0,31%	0,35%	0,30%	0,29%	0,28%	0,27%	0,27%	0,22%	0,15%	0,15%	0,17%	0,12%	0,11%	0,10%	0,02%	0,00%
	55	0,86%	0,17%	0,30%	0,29%	0,27%	0,26%	0,30%	0,21%	0,18%	0,21%	0,17%	0,13%	0,15%	0,14%	0,11%	0,09%	0,10%	0,01%	0,00%
	60	0,66%	0,14%	0,17%	0,23%	0,26%	0,20%	0,22%	0,28%	0,18%	0,17%	0,14%	0,11%	0,09%	0,13%	0,09%	0,13%	0,11%	0,04%	0,00%
	65	0,61%	0,07%	0,16%	0,15%	0,17%	0,14%	0,23%	0,19%	0,15%	0,10%	0,14%	0,10%	0,09%	0,05%	0,08%	0,06%	0,04%	0,02%	0,00%
	70	0,41%	0,10%	0,12%	0,19%	0,15%	0,09%	0,18%	0,11%	0,08%	0,11%	0,12%	0,08%	0,08%	0,06%	0,06%	0,06%	0,04%	0,01%	0,00%
	75	0,41%	0,05%	0,15%	0,13%	0,14%	0,12%	0,14%	0,14%	0,10%	0,07%	0,08%	0,05%	0,06%	0,05%	0,06%	0,02%	0,04%	0,01%	0,00%
	80	0,27%	0,03%	0,09%	0,13%	0,09%	0,12%	0,07%	0,08%	0,08%	0,04%	0,07%	0,06%	0,04%	0,05%	0,04%	0,03%	0,03%	0,01%	0,00%
85	0,17%	0,06%	0,08%	0,09%	0,07%	0,10%	0,06%	0,06%	0,05%	0,04%	0,06%	0,04%	0,03%	0,05%	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%	0,00%	
90	0,04%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,04%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%	

Tableau 7.5 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres déterministes avec 30% d'avantage de réparation simultanée

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	1,22%	0,17%	0,31%	0,37%	0,41%	0,28%	0,35%	0,30%	0,22%	0,28%	0,22%	0,20%	0,16%	0,14%	0,13%	0,16%	0,08%	0,04%	0,00%
	5	0,87%	0,19%	0,24%	0,30%	0,27%	0,29%	0,31%	0,23%	0,16%	0,21%	0,23%	0,15%	0,15%	0,13%	0,16%	0,09%	0,10%	0,02%	0,00%
	10	1,79%	0,30%	0,44%	0,58%	0,57%	0,54%	0,60%	0,49%	0,43%	0,33%	0,36%	0,31%	0,26%	0,21%	0,22%	0,20%	0,15%	0,03%	0,00%
	15	2,20%	0,35%	0,61%	1,00%	0,63%	0,75%	0,65%	0,59%	0,56%	0,49%	0,45%	0,45%	0,37%	0,31%	0,30%	0,20%	0,27%	0,07%	0,00%
	20	2,31%	0,44%	0,71%	0,81%	1,03%	0,74%	0,70%	0,64%	0,69%	0,50%	0,50%	0,36%	0,39%	0,27%	0,37%	0,27%	0,25%	0,06%	0,00%
	25	2,17%	0,44%	0,72%	0,65%	0,68%	0,87%	0,56%	0,54%	0,50%	0,62%	0,50%	0,35%	0,32%	0,27%	0,30%	0,31%	0,20%	0,07%	0,00%
	30	2,07%	0,44%	0,69%	0,66%	0,77%	0,57%	0,82%	0,43%	0,60%	0,40%	0,40%	0,39%	0,38%	0,29%	0,26%	0,20%	0,25%	0,06%	0,00%
	35	2,12%	0,32%	0,61%	0,53%	0,73%	0,54%	0,47%	0,69%	0,45%	0,45%	0,29%	0,44%	0,33%	0,28%	0,21%	0,21%	0,20%	0,04%	0,00%
	40	1,51%	0,29%	0,43%	0,54%	0,52%	0,41%	0,45%	0,36%	0,54%	0,34%	0,36%	0,29%	0,28%	0,21%	0,15%	0,18%	0,18%	0,04%	0,00%
	45	1,44%	0,32%	0,37%	0,41%	0,43%	0,33%	0,24%	0,43%	0,27%	0,39%	0,18%	0,20%	0,19%	0,21%	0,12%	0,19%	0,14%	0,02%	0,00%
	50	1,06%	0,19%	0,27%	0,31%	0,35%	0,30%	0,29%	0,28%	0,26%	0,26%	0,28%	0,14%	0,14%	0,17%	0,12%	0,11%	0,10%	0,02%	0,00%
	55	0,86%	0,17%	0,30%	0,29%	0,27%	0,26%	0,30%	0,21%	0,18%	0,21%	0,16%	0,18%	0,13%	0,14%	0,11%	0,09%	0,10%	0,01%	0,00%
	60	0,66%	0,14%	0,17%	0,23%	0,26%	0,20%	0,22%	0,28%	0,18%	0,16%	0,13%	0,10%	0,13%	0,11%	0,08%	0,13%	0,11%	0,04%	0,00%
	65	0,61%	0,07%	0,16%	0,15%	0,17%	0,14%	0,23%	0,19%	0,15%	0,10%	0,13%	0,10%	0,07%	0,09%	0,07%	0,05%	0,04%	0,02%	0,00%
	70	0,41%	0,10%	0,12%	0,19%	0,15%	0,09%	0,18%	0,11%	0,08%	0,11%	0,12%	0,08%	0,08%	0,06%	0,07%	0,05%	0,04%	0,01%	0,00%
	75	0,41%	0,05%	0,15%	0,13%	0,14%	0,12%	0,14%	0,14%	0,10%	0,07%	0,08%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,04%	0,03%	0,01%	0,00%
	80	0,27%	0,03%	0,09%	0,13%	0,09%	0,12%	0,07%	0,08%	0,08%	0,04%	0,07%	0,06%	0,04%	0,05%	0,04%	0,03%	0,04%	0,01%	0,00%
	85	0,17%	0,06%	0,08%	0,09%	0,07%	0,10%	0,06%	0,06%	0,05%	0,04%	0,06%	0,04%	0,03%	0,05%	0,03%	0,03%	0,00%	0,06%	0,00%
	90	0,04%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,04%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%

Tableau 7.6 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments et des paramètres déterministes avec 50% d'avantage de réparation simultanée

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	1,20%	0,17%	0,31%	0,37%	0,41%	0,28%	0,35%	0,30%	0,22%	0,28%	0,22%	0,20%	0,16%	0,14%	0,13%	0,16%	0,08%	0,04%	0,00%
	5	0,87%	0,20%	0,23%	0,30%	0,27%	0,29%	0,31%	0,23%	0,16%	0,21%	0,23%	0,15%	0,15%	0,13%	0,16%	0,09%	0,10%	0,02%	0,00%
	10	1,79%	0,27%	0,52%	0,56%	0,56%	0,52%	0,60%	0,49%	0,43%	0,33%	0,36%	0,31%	0,26%	0,21%	0,22%	0,20%	0,15%	0,03%	0,00%
	15	2,20%	0,33%	0,55%	1,16%	0,61%	0,72%	0,64%	0,59%	0,56%	0,49%	0,45%	0,45%	0,37%	0,31%	0,30%	0,20%	0,27%	0,07%	0,00%
	20	2,31%	0,44%	0,68%	0,59%	1,30%	0,70%	0,69%	0,64%	0,69%	0,49%	0,50%	0,36%	0,39%	0,27%	0,37%	0,27%	0,25%	0,06%	0,00%
	25	2,17%	0,44%	0,71%	0,61%	0,53%	1,14%	0,52%	0,53%	0,49%	0,61%	0,50%	0,35%	0,32%	0,27%	0,30%	0,31%	0,20%	0,07%	0,00%
	30	2,07%	0,44%	0,69%	0,65%	0,75%	0,45%	1,05%	0,37%	0,58%	0,40%	0,40%	0,39%	0,38%	0,29%	0,26%	0,20%	0,25%	0,06%	0,00%
	35	2,12%	0,32%	0,61%	0,53%	0,72%	0,50%	0,34%	0,91%	0,37%	0,43%	0,28%	0,44%	0,33%	0,28%	0,21%	0,21%	0,20%	0,04%	0,00%
	40	1,51%	0,29%	0,43%	0,54%	0,52%	0,41%	0,41%	0,24%	0,77%	0,30%	0,35%	0,29%	0,28%	0,21%	0,15%	0,18%	0,18%	0,04%	0,00%
	45	1,44%	0,32%	0,37%	0,41%	0,43%	0,33%	0,23%	0,41%	0,16%	0,56%	0,18%	0,20%	0,19%	0,21%	0,12%	0,19%	0,14%	0,02%	0,00%
	50	1,06%	0,19%	0,27%	0,31%	0,35%	0,29%	0,29%	0,28%	0,25%	0,16%	0,42%	0,12%	0,13%	0,17%	0,12%	0,11%	0,10%	0,02%	0,00%
	55	0,86%	0,17%	0,30%	0,29%	0,27%	0,26%	0,30%	0,21%	0,17%	0,20%	0,09%	0,28%	0,07%	0,14%	0,11%	0,09%	0,10%	0,01%	0,00%
	60	0,66%	0,14%	0,17%	0,23%	0,26%	0,20%	0,22%	0,28%	0,18%	0,16%	0,13%	0,05%	0,25%	0,06%	0,07%	0,13%	0,11%	0,04%	0,00%
	65	0,61%	0,07%	0,16%	0,15%	0,17%	0,14%	0,23%	0,19%	0,15%	0,10%	0,13%	0,09%	0,04%	0,16%	0,05%	0,05%	0,04%	0,02%	0,00%
	70	0,41%	0,10%	0,12%	0,19%	0,15%	0,09%	0,18%	0,11%	0,08%	0,11%	0,12%	0,08%	0,08%	0,04%	0,12%	0,04%	0,04%	0,01%	0,00%
	75	0,41%	0,05%	0,15%	0,13%	0,14%	0,12%	0,14%	0,14%	0,10%	0,07%	0,08%	0,05%	0,05%	0,05%	0,02%	0,10%	0,02%	0,01%	0,00%
	80	0,26%	0,03%	0,09%	0,13%	0,09%	0,12%	0,07%	0,08%	0,08%	0,04%	0,07%	0,06%	0,04%	0,05%	0,04%	0,01%	0,08%	0,00%	0,00%
85	0,17%	0,06%	0,08%	0,09%	0,07%	0,10%	0,06%	0,06%	0,05%	0,04%	0,06%	0,04%	0,03%	0,05%	0,03%	0,03%	0,00%	0,08%	0,00%	
90	0,04%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,04%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,02%	0,00%	0,02%	

Tableau 7.7 – Différence entre les moments optimaux de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments avec paramètres déterministes pour un avantage de réparation simultanée de 10% par rapport à aucun avantage

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,00%	-0,01%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15	0,00%	-0,01%	-0,01%	0,09%	-0,05%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	-0,02%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	25	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,01%	-0,03%	0,08%	-0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,01%	0,00%	-0,02%	0,05%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	35	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,01%	-0,01%	0,05%	-0,01%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,02%	0,06%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	45	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,03%	0,03%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,02%	0,04%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,01%	0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	65	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,03%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	-0,01%	0,00%
	75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	80	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
	85	-0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,03%	0,00%
	90	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau 7.8 - Différence entre les moments optimaux de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments avec paramètres déterministes pour un avantage de réparation simultanée de 30% par rapport à aucun avantage

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5	0,00%	0,02%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,00%	-0,01%	0,06%	-0,05%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15	0,00%	-0,01%	-0,05%	0,20%	-0,08%	-0,04%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,00%	0,00%	-0,06%	0,20%	-0,07%	-0,03%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	25	0,00%	-0,01%	-0,02%	-0,03%	-0,05%	0,22%	-0,09%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	-0,07%	0,17%	-0,04%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	35	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,02%	-0,01%	-0,07%	0,17%	-0,07%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	-0,02%	-0,07%	0,17%	-0,03%	0,00%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	45	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,02%	-0,06%	0,10%	-0,04%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	-0,02%	-0,03%	0,10%	-0,03%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,02%	0,06%	-0,02%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,05%	-0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	65	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,02%	0,07%	-0,02%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,02%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%
	75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,01%	0,02%	-0,01%	0,00%	0,00%
	80	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,01%	0,02%	0,00%	0,00%
	85	-0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,03%	0,06%	0,00%
	90	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau 7.9 - Différence entre les moments optimaux de réparation pour une détérioration markovienne à 2 éléments avec paramètres déterministes pour un avantage de réparation simultanée de 50% par rapport à aucun avantage

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																			
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
	5	0,00%	0,04%	-0,03%	-0,02%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,00%	-0,04%	0,15%	-0,07%	-0,02%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15	0,00%	-0,03%	-0,11%	0,36%	-0,11%	-0,06%	-0,02%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,00%	-0,04%	-0,28%	0,47%	-0,11%	-0,04%	-0,02%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	25	0,00%	-0,01%	-0,02%	-0,06%	-0,20%	0,48%	-0,13%	-0,02%	-0,01%	-0,01%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,03%	-0,04%	-0,19%	0,40%	-0,09%	-0,03%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	35	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,02%	-0,04%	-0,19%	0,40%	-0,14%	-0,02%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	-0,05%	-0,19%	0,40%	-0,07%	-0,01%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	45	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,01%	-0,03%	-0,16%	0,27%	-0,05%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,02%	0,00%	0,00%	-0,03%	-0,13%	0,24%	-0,04%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,02%	-0,01%	-0,09%	0,16%	-0,08%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,01%	-0,06%	0,17%	-0,08%	-0,02%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
	65	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,01%	-0,05%	0,14%	-0,04%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,03%	0,07%	-0,03%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
	75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,05%	0,08%	-0,02%	-0,01%	0,00%	0,00%
	80	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,03%	0,06%	-0,01%	0,00%	0,00%
	85	-0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,03%	0,08%	0,00%	0,00%
	90	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%

Par l'analyse des trois derniers tableaux, il est possible de déduire qu'un avantage de réparation simultanée a très peu d'impact sur la décision du moment de réparation lorsque la détérioration est markovienne. Dans un premier temps, il faut noter que lorsqu'aucun avantage de réparation simultanée n'est prodigué, 5,16% des simulations ont une réparation simultanée des deux éléments. La détérioration des deux éléments suivant une matrice différente combinée à la forte volatilité du modèle laisse peu de chance à l'atteinte d'un état de réparation optimal simultanée. L'ajout d'un avantage de réparation simultanée réduit les coûts et augmente donc la valeur actualisée nette des scénarios de réparation simultanée. Pour une réduction des coûts de 10% lors d'une réparation simultanée, il y a seulement 0,53% de simulations de plus qui sont faites simultanément (cellules rougeâtres du Tableau 7.7). Pour une réduction de 30%, il y a 1,68% de simulations de plus que le scénario sans avantage qui sont faites simultanément. Finalement, pour une réduction de 50%, il y a 3,94% de simulations de plus que le scénario sans avantage qui sont faites simultanément. Malgré les avantages significatifs de réparation simultanée, il y a très peu d'impact sur le choix du moment de réparation. Il faut aussi remarquer que les simulations affectées sont les simulations qui sont près des zones de réparation simultanée dans le Tableau 7.7, Tableau 7.8 et Tableau 7.9. En effet, l'avantage de réparation simultanée peut modifier le temps de réparation optimal de 5 à 10 ans. Il faut comprendre que les simulations où les éléments sont réparés à des moments très différents dans le scénario sans avantage produisent un bénéfice net souvent bien supérieur au coût total de réparation. Ainsi, aucune réduction de coûts ne permettrait une réparation simultanée. Considérant la grande volatilité des moments de réparation optimale pour une détérioration, il y a donc peu de simulations qui sont affectées par un avantage de réparation simultanée.

7.4.3 Modèle de détérioration stochastique

Encore une fois, pour la détérioration stochastique, le pourcentage de réduction de coût pour obtenir des réparations simultanées varie d'une simulation à l'autre. Ainsi, trois niveaux de réductions de coûts sont étudiés pour déterminer l'impact sur le moment optimal de réparation. Des réductions de 10%, de 30% et de 50% des coûts simultanés sont analysées. Pour ce faire, un nouvel ensemble de 20 000 simulations est généré. Aucun avantage de réparation simultanée n'est d'abord attribué. Ce bloc de simulation sert donc de comparatif pour déterminer l'impact des avantages sur le coût. Les coûts et les valeurs actualisées sont ensuite recalculés avec les différents pourcentages d'avantages de réparation simultanée. La répartition des moments optimaux de réparation sans

avantage de réparation simultanée est présentée au Tableau 7.10. La répartition pour un avantage de 10%, 30% et 50% est présentée respectivement au Tableau 7.11, au Tableau 7.12 et au Tableau 7.13. La différence entre un avantage de réparation simultané de 10%, 30% et 50% par rapport au cas sans avantage est présentée respectivement au Tableau 7.14, au Tableau 7.15 et au Tableau 7.16.

Par l'analyse des trois derniers tableaux, il est possible de déduire qu'un avantage de réparation simultané a un impact significatif sur la décision du moment de réparation lorsque la détérioration est stochastique. Dans un premier temps, il faut noter que lorsqu'aucun avantage de réparation simultanée n'est prodigué, 18,65% des simulations ont une réparation simultanée des deux éléments. Cette proportion est significativement plus importante que pour la détérioration markovienne. En effet, il faut noter que la volatilité du modèle de détérioration stochastique est beaucoup plus faible que celle du modèle markovien. Ainsi, sans avantage de réparation, la majorité des moments optimaux de réparation se situent entre 15 et 35 ans. Malgré la différence entre les deux matrices de détérioration, la probabilité d'obtenir une réparation simultanée est nettement augmentée. L'ajout d'un avantage de réparation simultané réduit les coûts et augmente donc la valeur actualisée nette des scénarios de réparation simultanée. Pour une réduction des coûts de 10% lors d'une réparation simultanée, il y a 4,01% de simulations de plus qui sont faites simultanément pour un total de 22,66%. Pour une réduction de 30%, il y a 12,13% de simulations de plus que le scénario sans avantage qui sont faites simultanément, pour un total de 30,78%. Finalement, pour une réduction de 50%, il y a 21,14% de simulations de plus que le scénario sans avantage qui sont faites simultanément, pour un total 39,79%. L'impact de l'avantage de réparation simultanée est peu significatif à 10%, mais devient important à 30% et 50%. Encore une fois, il faut remarquer que les simulations affectées sont les simulations qui se situent près d'une réparation simultanée dans le Tableau 7.14, Tableau 7.15 et Tableau 7.16. En effet, l'avantage de réparation simultanée peut modifier le temps de réparation optimal de 5 à 10 ans. La majorité des moments optimaux de réparation étant dans cette zone, l'impact de l'avantage de réparation simultanée est beaucoup plus notable pour une détérioration stochastique. Aussi, plus la réparation optimale est loin en termes de temps d'une réparation simultanée, plus le gain de valeur actualisée nette est important par rapport à ce scénario de réparation. Ainsi, dans certains cas, aucune réduction de coûts, aussi important soit-il, ne permettrait un gain suffisant pour une réparation simultanée.

7.4.4 Résumé des impacts de l'avantage de réparation simultanée

L'avantage de réparation simultanée permet de considérer l'avantage de réparer plusieurs éléments simultanément plutôt qu'à des périodes différentes. Ainsi, cet aspect permet de considérer la baisse des frais fixes liés au lancement d'un chantier une seule fois sur la durée de vie plutôt que deux fois.

Les résultats de cette section démontrent que même une légère baisse des frais fixes pour une réparation simultanée est avantageuse lorsque le moment optimal de réparation des deux éléments se trouvent à moins de 10 ans l'un de l'autre. Il devient alors plus rentable de coordonner les activités. Si les moments optimaux sont trop séparés l'un de l'autre, il faut faire trop de concession sur l'état et la sécurité de la structure pour l'opération soit rentable. Celle tend à démontrer qu'il est favorable d'utiliser des matériaux qui se détériorent au même rythme afin de limiter le nombre d'interventions sur la structure.

Tableau 7.10 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres déterministes sans avantage de réparation simultanée

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,00%	0,02%	0,02%	0,07%	0,16%	0,19%	0,14%	0,12%	0,06%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15	0,00%	0,03%	0,22%	0,46%	0,88%	1,25%	1,24%	0,82%	0,47%	0,21%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,26%	0,67%	1,59%	2,81%	4,17%	4,17%	3,21%	1,43%	0,63%	0,09%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	25	0,00%	0,51%	1,30%	2,89%	5,39%	7,70%	7,41%	5,17%	2,81%	1,02%	0,19%	0,05%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,44%	1,01%	2,40%	4,42%	6,07%	5,91%	4,55%	2,15%	0,90%	0,18%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	35	0,00%	0,14%	0,39%	0,86%	1,64%	2,30%	2,28%	1,63%	0,86%	0,33%	0,05%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,02%	0,07%	0,12%	0,26%	0,30%	0,32%	0,25%	0,14%	0,06%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	45	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	65	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	80	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	85	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	90	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau 7.11 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres déterministes avec 10% d'avantage de réparation simultanée

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,00%	0,02%	0,03%	0,07%	0,16%	0,16%	0,14%	0,12%	0,06%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15	0,00%	0,03%	0,22%	0,59%	0,85%	1,20%	1,16%	0,81%	0,46%	0,21%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,26%	0,64%	1,50%	3,49%	3,97%	3,92%	3,12%	1,40%	0,61%	0,09%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	25	0,00%	0,50%	1,25%	2,78%	5,06%	9,13%	6,94%	4,90%	2,77%	0,98%	0,19%	0,05%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,44%	0,97%	2,29%	4,14%	5,64%	7,24%	4,32%	2,06%	0,85%	0,17%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	35	0,00%	0,14%	0,39%	0,86%	1,58%	2,16%	2,11%	2,03%	0,83%	0,31%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,02%	0,07%	0,11%	0,26%	0,29%	0,30%	0,25%	0,17%	0,06%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	45	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	65	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	80	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	85	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	90	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau 7.12 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres déterministes avec 30% d'avantage de réparation simultanée

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,00%	0,02%	0,03%	0,07%	0,16%	0,12%	0,13%	0,11%	0,06%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15	0,00%	0,03%	0,21%	0,80%	0,79%	1,12%	1,06%	0,77%	0,46%	0,20%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,24%	0,56%	1,40%	4,69%	3,50%	3,42%	2,92%	1,34%	0,61%	0,09%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	25	0,00%	0,47%	1,17%	2,50%	4,48%	12,02%	5,98%	4,47%	2,58%	0,91%	0,19%	0,05%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,40%	0,91%	2,08%	3,66%	4,61%	9,98%	3,85%	1,89%	0,79%	0,16%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	35	0,00%	0,13%	0,38%	0,77%	1,44%	1,88%	1,73%	3,03%	0,71%	0,30%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,02%	0,07%	0,11%	0,24%	0,24%	0,26%	0,20%	0,24%	0,06%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	45	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	65	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	80	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	85	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	90	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau 7.13 - Répartition du moment optimal de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments et des paramètres déterministes avec 50% d'avantage de réparation simultanée

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																			
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
	5	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,00%	0,02%	0,04%	0,06%	0,14%	0,12%	0,13%	0,10%	0,06%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15	0,00%	0,03%	0,21%	0,96%	0,71%	0,98%	0,96%	0,69%	0,45%	0,20%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,23%	0,51%	1,28%	5,89%	3,01%	2,98%	2,66%	1,27%	0,58%	0,08%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	25	0,00%	0,41%	1,06%	2,15%	3,79%	15,20%	5,07%	3,97%	2,37%	0,85%	0,17%	0,05%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,37%	0,83%	1,89%	3,04%	3,55%	13,22%	3,29%	1,64%	0,66%	0,15%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	35	0,00%	0,13%	0,35%	0,68%	1,30%	1,55%	1,31%	4,13%	0,63%	0,27%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,02%	0,07%	0,10%	0,23%	0,20%	0,21%	0,18%	0,36%	0,05%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	45	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	65	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	80	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	85	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	90	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau 7.14 - Différence entre les moments optimaux de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments avec paramètres déterministes pour un avantage de réparation simultanée de 10% par rapport à aucun avantage

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	-0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15	0,00%	0,00%	0,00%	0,13%	-0,04%	-0,06%	-0,08%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,00%	-0,03%	-0,09%	0,68%	-0,21%	-0,26%	-0,09%	-0,03%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	25	0,00%	-0,02%	-0,05%	-0,11%	-0,33%	1,43%	-0,47%	-0,28%	-0,04%	-0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	-0,01%	-0,04%	-0,11%	-0,28%	-0,43%	1,34%	-0,23%	-0,09%	-0,04%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	35	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,07%	-0,14%	-0,18%	0,40%	-0,03%	-0,03%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,02%	-0,02%	0,00%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	45	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	65	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	80	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	85	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	90	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau 7.15 - Différence entre les moments optimaux de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments avec paramètres déterministes pour un avantage de réparation simultanée de 30% par rapport à aucun avantage

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	-0,07%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15	0,00%	0,00%	-0,01%	0,35%	-0,09%	-0,13%	-0,18%	-0,06%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	-0,02%	-0,11%	-0,19%	1,88%	-0,68%	-0,76%	-0,30%	-0,09%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	25	0,00%	-0,04%	-0,13%	-0,39%	-0,91%	4,32%	-1,44%	-0,71%	-0,24%	-0,11%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	-0,04%	-0,10%	-0,32%	-0,77%	-1,46%	4,08%	-0,70%	-0,26%	-0,11%	-0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	35	0,00%	-0,01%	-0,02%	-0,10%	-0,20%	-0,42%	-0,56%	1,40%	-0,15%	-0,04%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,02%	-0,06%	-0,06%	-0,05%	0,11%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	45	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	65	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	80	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	85	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	90	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau 7.16 - Différence entre les moments optimaux de réparation pour une détérioration stochastique à 2 éléments avec paramètres déterministes pour un avantage de réparation simultanée de 50% par rapport à aucun avantage

		Moment optimal de réparation des poutres en acier (années)																		
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Moment optimal de réparation de la dalle en béton armé (années)	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,00%	0,00%	0,02%	-0,01%	-0,02%	-0,08%	-0,02%	-0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15	0,00%	0,00%	-0,01%	0,51%	-0,18%	-0,27%	-0,28%	-0,13%	-0,02%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	-0,04%	-0,16%	-0,31%	3,08%	-1,16%	-1,19%	-0,55%	-0,16%	-0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	25	0,00%	-0,10%	-0,24%	-0,74%	-1,60%	7,50%	-2,35%	-1,20%	-0,45%	-0,17%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	-0,07%	-0,18%	-0,51%	-1,38%	-2,52%	7,32%	-1,27%	-0,52%	-0,24%	-0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	35	0,00%	-0,01%	-0,05%	-0,18%	-0,35%	-0,75%	-0,97%	2,51%	-0,23%	-0,07%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,00%	0,00%	-0,02%	-0,03%	-0,10%	-0,11%	-0,07%	0,22%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	45	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	65	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	80	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	85	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	90	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

CHAPITRE 8 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

8.1 Conclusions

L'objectif principal de ce projet consistait à contribuer au développement de la littérature existante au sujet des systèmes de gestion de pont (Bridge Management System (BMS)) par le développement d'un outil d'aide à la décision pour optimiser les réparations sur les ponts. L'outil décisionnel développé se base sur un programme Matlab® pour maximiser la valeur actualisée nette d'un pont. La création de richesse par un réseau routier efficace est ainsi mise à l'avant-plan dans le calcul de la valeur actualisée. De plus, l'étude permet d'étudier l'impact de l'évolution du taux d'intérêt, de l'inflation, ainsi que du débit routier.

L'outil permet d'utiliser différents blocs de code pour représenter une variable ou un paramètre du modèle afin d'étudier l'impact que celui-ci a sur la décision de réparer une structure. Parmi ceux-ci, les modèles de détérioration sont les premiers étudiés. Le premier est le modèle de détérioration déterministe utilisée par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. Pour ce modèle, la détérioration d'un élément de structure suit toujours la même évolution pour un état initial donné. Le deuxième modèle étudié est le modèle markovien. Ce modèle applique l'évolution d'un processus markovien à un élément de structure. Pour ce modèle de détérioration, l'élément du pont se trouve entièrement dans un état à la fois. Le dernier modèle a été développé dans le cadre de cette étude. Ce modèle de détérioration stochastique utilise l'application de la détérioration déterministe du modèle du MTMDET, mais applique une variabilité à la matrice de transition à chaque période. L'évolution de la détérioration se trouve donc stochastique.

Ce projet poursuit l'étude de Power et coll. (2015) sur l'étude des paramètres financiers sur le moment optimal de réparation. En effet, les mêmes modèles évolutifs des paramètres de taux d'intérêt et d'inflation, mis à jour dans Fortin et coll. (2017), sont utilisés pour cette étude. Pour évaluer l'évolution du débit routier, un nouveau modèle est développé grâce à l'étude de l'historique de l'évolution de l'achalandage du réseau routier québécois. Afin de déterminer

l'impact de la volatilité de l'évolution de ces paramètres, des simulations avec ces paramètres fixes dans le temps sont aussi réalisées. La valeur moyenne du modèle est alors utilisée.

L'historique du système de gestion de structure du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports est aussi abordé dans le cadre de cette étude afin de bien comprendre l'environnement de gestion dans lequel ce projet s'insère. Il faut alors comprendre que le système de gestion actuel du Ministère a été implanté en 2008 et utilise une méthode de classification des dommages différents ce qui avait été utilisé précédemment. Cette modification limite grandement les données d'inspection compatible à l'élaboration d'une tendance de détérioration. Ce système impose notamment plusieurs hypothèses pour cette étude. Ces hypothèses comprennent :

- la limitation de la durée de vie du pont à 100 ans;
- la dégradation et la réparation d'un élément se fait seulement aux 5 ans;
- une seule réparation (à neuf) peut être effectuée sur la durée de vie du pont pour chaque élément;
- et, seulement certains éléments du pont (dalle et poutres) représentent la détérioration de l'entièreté de la structure.

Chaque scénario d'étude s'effectue à l'aide d'une analyse probabiliste de 20 000 simulations et il y a au total 12 scénarios étudiés. Dans un premier temps, le pont est représenté exclusivement par la dalle en béton armé. L'étude est effectuée pour les trois modèles de détérioration. Pour chaque modèle de détérioration, l'analyse est conduite avec des paramètres financiers et de débit fixes, puis des paramètres variables. Dans un second temps, le pont est représenté à la fois par la dalle en béton armé et les poutres en acier. La même analyse est alors répétée, soit trois modèles de détériorations, avec paramètres fixes, puis variables. Cette étude met en évidence l'importance de considérer la variabilité aléatoire dans l'anticipation de la détérioration d'un élément/pont, du taux d'intérêt et, à moindre importance, de l'inflation.

Ainsi, lorsque le pont est uniquement représenté par la dalle en béton armé, six ensembles de résultats sont à considérer, c'est-à-dire les trois modèles de détérioration évalués avec les paramètres financiers et de débit d'abord déterministes et ensuite stochastiques.

Pour une détérioration déterministe et des paramètres fixes, une réparation à 25 ans est optimale. Par contre, il faut noter que ce moment de réparation n'offre pas un très grand avantage par rapport à une réparation à 30 ans. Si les paramètres financiers et de débit sont variables, le moment de réparation optimale est légèrement plus volatil. Il faut alors favoriser une réparation entre 25 et 30 ans. Dans certains cas extrêmes, une réparation à 35 ans est aussi suggérée. Cette différence dans les choix s'explique principalement par la volatilité du taux d'intérêt, et, à moindre ampleur, de l'inflation. Par exemple, un taux d'intérêt élevé et une inflation générale faible favorisent une réparation hâtive. Or, puisque l'inflation générale est fortement corrélée avec l'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre et que ces deux inflations ont des effets opposés sur le moment optimal de réparation, leur effet tend à s'annuler.

Pour une détérioration markovienne de la dalle, il y a une très forte variabilité du moment optimal de réparation. Une évolution markovienne mène à une probabilité très élevée de maintien en bon état d'un élément. Ainsi, des réparations en fin de vie ou l'absence de réparation sur la durée de vie sont parfois optimales. L'impact des paramètres variables est alors difficile à évaluer. Les résultats pour la détérioration déterministe demeurent donc pertinents pour ce modèle; il faut principalement surveiller l'évolution du taux d'intérêt.

Pour une détérioration stochastique de la dalle et des paramètres financiers et de débit fixes, la majorité des réparations doivent être effectuées entre 20 et 35 ans en fonction de la rapidité de la détérioration. Il est cependant possible de remarquer que certains cas extrêmes proposent des réparations entre 5 et 50 ans. Il faut donc bien suivre l'environnement de détérioration dans lequel se trouve la structure (présence d'agents agressifs, facteurs physiques, etc.) pour prendre une décision éclairée du moment de réparation. L'ajout de paramètres variables a très peu d'impact sur la distribution globale des moments optimaux de réparation. La majorité des réparations doivent toujours être effectuées entre 20 et 35 ans, alors que certains cas extrêmes se trouvent toujours entre 5 et 50 ans. Il faut donc se rabattre sur l'analyse des paramètres variables pour le modèle de détérioration déterministe. Il faut surtout se concentrer sur le taux d'intérêt pour déterminer si ce dernier peut affecter le moment optimal de réparation.

Lorsque le pont est représenté à la fois par la dalle en béton armé et les poutres en acier, six nouveaux ensembles résultats sont à considérer.

Pour une détérioration déterministe et des paramètres financiers et débit fixes, il faut favoriser une réparation à 25 ans pour la dalle en béton armé et à 30 ans pour les poutres en acier. Encore une fois, modifier légèrement le moment de réparation, ne créent pas de grande perte financière pour le gestionnaire par rapport au scénario optimal, principalement si les deux éléments sont réparés à 30 ans. Si les paramètres financiers et de débit sont variables, il y a alors une plus grande volatilité dans les résultats, la réparation de chaque élément pouvant être effectuée entre 25 et 35 ans. Par contre, dans la grande majorité des cas, une réparation de la dalle entre 25 et 30 ans est suggérée, alors que les poutres sont réparées à 30 ans. La variabilité des résultats s'explique encore en grande partie par le taux d'intérêt. Par exemple, un taux d'intérêt élevé et une inflation générale faible favorisent une réparation hâtive. Or, puisque l'inflation générale est fortement corrélée avec l'inflation des matériaux et de la main-d'œuvre et que ces deux inflations ont des effets opposés sur le moment optimal de réparation, leur effet tend à s'annuler.

Pour une détérioration markovienne des deux éléments, il y a une très forte variabilité du moment optimal de réparation. Une évolution markovienne mène à une probabilité très élevée de maintien en bon état d'un élément. Cet effet est plus fortement perceptible pour les poutres en acier qui ne nécessitent aucune réparation sur la durée de vie dans plus de 20% des simulations. Il est cependant possible de remarquer que le choix de réparation optimal pour chaque élément est presque indépendant. Ainsi, les moments optimaux de réparation de la dalle suivent la même tendance que lorsque celui-ci représentait l'entière du pont. Cependant, il faut noter une petite exception pour les poutres où plusieurs réparations en fin de vie coûtent plus cher que les revenus qu'elles rapportent lorsque deux éléments sont considérés. Dû à la grande volatilité des résultats, l'impact des paramètres variables est alors difficile à évaluer. Les résultats pour la détérioration déterministe demeurent donc pertinents pour ce modèle; il faut principalement surveiller l'évolution du taux d'intérêt.

Pour une détérioration stochastique des deux éléments et des paramètres financiers et de débit fixes, le modèle suggère une réparation entre 20 et 35 ans pour la dalle en béton armé et une réparation entre 15 et 40 ans pour les poutres en acier. Encore une fois, le moment optimal de réparation de chaque élément peut être considéré comme un événement indépendant. La tendance obtenue pour chaque élément dans ce scénario est la même que si cet élément représentait l'entière du pont. Il est alors possible de mentionner que même si la majorité des détériorations de la dalle doivent être

effectuées entre 20 et 35 ans, certains cas extrêmes peuvent nécessiter une réparation entre 5 et 45 ans. Il en est de même pour les poutres qui, dans certains cas extrêmes, doivent être réparées entre 5 et 60 ans. Il faut donc bien suivre l'environnement de la détérioration pour prendre une décision optimale. L'ajout de paramètres financiers et de débit stochastiques a très peu d'impact sur la distribution globale des moments optimaux de réparation. La majorité des réparations doivent toujours être effectuées entre 20 et 35 ans pour la dalle et entre 15 et 40 ans pour les poutres. Il faut donc se rabattre sur l'analyse des paramètres variables pour le modèle de détérioration déterministe. Il faut surtout se concentrer sur le taux d'intérêt pour déterminer si ce dernier peut affecter le moment optimal de réparation.

Finalement, une analyse de sensibilité a permis de considérer l'impact de certains paramètres du modèle, soit la matrice de transition initiale, la pénalité d'état, la variabilité de la matrice de détérioration pour la détérioration stochastique et l'ajout d'un avantage de réparation simultanée à deux éléments. Une modification de la matrice de transition a surtout un impact sur la variabilité des résultats. Évidemment, pour une détérioration déterministe, la matrice va simplement modifier le moment optimal de réparation. Par contre, pour une détérioration markovienne ou stochastique, plus la matrice est sévère, plus les moments de réparation sont hâtifs et concentrés. Pour sa part, une modification de la pénalité d'état crée une translation de la distribution du moment optimal de réparation. La pénalité d'état de base du modèle étant la moins sévère, une modification de cette pénalité d'état vers une approche linéaire devance le moment de réparation optimale. Cet impact est encore plus marqué en utilisant une pénalité équivalente à la valeur résiduelle proposée par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports.

Pour la détérioration stochastique, la variabilité de la matrice de détérioration d'une période à l'autre a un impact direct sur la variabilité du moment optimal de réparation. Plus le pourcentage de variation de la matrice est faible, plus les moments optimaux de réparation seront concentrés. Finalement, l'ajout d'un avantage de réparation simultanée a principalement un impact sur les simulations où la réparation optimale est à 5 ou 10 ans d'une réparation simultanée. Pour une détérioration déterministe, il suffit d'un avantage de 3,72% pour faire concorder les dates de réparation. Cependant, cet avantage a peu d'impact sur une détérioration markovienne en raison de la grande dispersion des moments optimaux de réparation, mais un impact considérable pour une détérioration stochastique, la majorité des réparations se produisant entre 15 et 40 ans.

8.2 Perspectives de recherche

Ce projet se voulant une première étape et approche pour l'amélioration de la compréhension des systèmes de gestion de pont, les possibilités d'améliorer ce projet sont nombreuses.

Dans un premier temps, un modèle parfait considérerait l'ensemble des éléments d'un pont plutôt que quelques-uns. Il serait donc intéressant de considérer davantage d'éléments du pont dans l'analyse. Il serait aussi intéressant que ces éléments considèrent une interdépendance dans la détérioration. Ainsi, le poids de chaque élément serait réduit et une décision de réparation sur un groupe d'éléments serait possible. Une telle avancée nécessite un système performant puisque la gestion de données serait nettement plus lourde. Cette possibilité dépend énormément des inspections du MTMDET. Pour développer une détérioration théorique pour chaque élément, il faut avoir accès à un nombre élevé d'inspections d'ouvrage. Grâce à ces inspections, il est possible d'élaborer une tendance de détérioration pour chaque élément et d'y associer une matrice de détérioration. Le modèle de détérioration stochastique peut aussi grandement s'améliorer en se fiant à un ensemble significatif de rapports d'inspection. Il faut mentionner que pour cette étude, la variabilité de la matrice de détérioration d'une période à l'autre a été fixée arbitrairement à 5%. Ce nombre pourrait être confirmé ou gagner en précision avec un meilleur échantillon de détérioration d'éléments. Il est à noter que ce nombre pourrait aussi être différent d'un élément à l'autre.

Dans un second temps, il serait possible de pousser l'étude sur les paramètres financiers. Dans le cadre de ce projet, les paramètres financiers variables étaient basés sur les modèles de l'étude de Power et coll. (2015) mis à jour dans Fortin et coll. (2017). Il y a donc un seul modèle de l'évolution des paramètres financiers qui est étudié dans cette étude. Il pourrait être intéressant d'étudier différentes approches pour chaque paramètre financier. Une moyenne mobile pourrait être utilisée pour chaque paramètre. De plus, la corrélation entre les différents paramètres pourrait être revue.

De plus, pour cette étude, les paramètres étaient tous à la fois variables ou fixes. Il pourrait être approprié d'étudier l'impact d'un paramètre variable à la fois. Ainsi, il serait plus facile de percevoir l'impact de chacun des paramètres sur le choix du moment optimal de réparation.

Avant de conclure, il est important de rappeler que l'outil développé dans le cadre de ce projet est un outil d'aide à la décision. L'intervention humaine est donc nécessaire pour bien analyser les résultats et prioriser les interventions sur le réseau. L'outil étant limité par plusieurs hypothèses, l'aspect social n'est pas considéré dans la prise de décision. En effet, il a été mentionné qu'une réparation peut être retarder afin de limiter le temps passé dans l'état D sur la durée de vie. Ce choix n'est pas socialement acceptable puisque le risque d'effondrement lié au maintien d'une structure instable est élevé et met la sécurité publique en danger. À cet effet, il serait intéressant de peaufiner la recherche sur la pénalité d'état afin que cette dernière reflète bien le coût d'un risque d'effondrement d'une structure et le coût associé à la sécurité des usagers. Il est évident que la limitation d'une réparation majeure sur la durée de vie nuit à cet aspect présentement. Pour l'instant, cet outil est plutôt efficace pour aider le gestionnaire à développer la planification stratégique du réseau, mais pas assez précis pour faire un suivi par structure. Le développement du modèle et l'ajout de données fiables pourra, avec le temps, permettre à l'outil de remplir une tâche de suivi par structure. De plus, il faut rappeler que le mode de détérioration n'est pas considéré dans ce projet, l'outil se voulant davantage basé sur une détérioration statistique que sur les modèles de détérioration physiques. Avec le développement des modèles, il serait possible de combiner ces deux approches dans un outil plus performant.

Finalement, l'approche présenté dans cette étude ne doit pas se limiter aux ponts routiers. Il est possible de transposer l'approche à d'autres types ouvrages ou même de sphères d'infrastructures. Par exemple, l'outil pourrait être adapté à la gestion des ponceaux, à des structures ferroviaires, et même pour améliorer le réseau de transport en commun grâce à un outil qui valorise la création de richesse d'un système efficace.

BIBLIOGRAPHIE

AASTHO. (2015). Retrieved 10 septembre, 2015, from http://aastowarebridge.com/?page_id=17.

Association, C. S. (2014). CAN/CSA-S6-14, Canadian Highway Bridge Design Code, Canadian Standards Association.

Barz, G. L. J. (1999). Stochastic financial models for electricity derivatives, Stanford University.

Bastidas-Arteaga, E., P. Bressolette, A. Chateauneuf et M. Sánchez-Silva (2009). "Probabilistic lifetime assessment of RC structures under coupled corrosion–fatigue deterioration processes." Structural safety **31**(1): 84-96.

Bastidas-Arteaga, E., F. Schoefs, M. G. Stewart et X. Wang (2013). "Influence of global warming on durability of corroding RC structures: A probabilistic approach." Engineering Structures **51**: 259-266.

Boulet, J. (2007). Réponse du gouvernement du Québec aux recommandations de la Commission d'enquête sur le viaduc de la Concorde.

Bu, G., J. B. Son, J. Lee, H. Guan, M. Blumenstein et Y.-C. Loo (2013). "Typical deterministic and stochastic bridge deterioration modelling incorporating backward prediction model." Journal of Civil Structural Health Monitoring **3**(2): 141-152.

CAA-Québec (2012). Document de réflexion sur la question du financement des infrastructures de transport au Québec.

CEIC (2014). Pièce 130P-1552 : Travaux Routiers du MTQ : Portrait du marché.

CEVC (2007). Commission d'enquête sur l'effondrement d'une partie du viaduc de la Concorde 3 octobre 2006-15 octobre 2007 : rapport. G. d. Québec. Québec.

Chan, K. C., G. A. Karolyi, F. A. Longstaff et A. B. Sanders (1992). "An empirical comparison of alternative models of the short-term interest rate." The journal of finance **47**(3): 1209-1227.

Chang, T., O. Ranjbar et D. Tang (2013). "Revisiting the mean reversion of inflation rates for 22 OECD countries." Economic Modelling **30**: 245-252.

Collins, L. (1974). "Estimating Markov transition probabilities from micro-unit data." Applied statistics: 355-371.

DeStefano, P. D. et D. A. Grivas (1998). "Method for estimating transition probability in bridge deterioration models." Journal of Infrastructure Systems **4**(2): 56-62.

Ellis, R. M., P. D. Thompson, R. Gagnon et G. Richard (2008). Design and implementation of a new bridge management system for the ministry of transport of Québec. Proceedings of the 10th International Conference on Bridge and Structure Management.

Ellis, R. M., P. D. Thompson et G. Richard (2008). Quebec Ministry of Transport's Bridge Project Tactical Planning Dashboard. 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada.

Fernandez, P., P. Linares et I. Fernández Acín (2014). "Market Risk Premium used in 88 countries in 2014: a survey with 8,228 answers." Available at SSRN 2450452.

Fortin, J.-S., C. D. Tandja M, J. Bastien et G. J. Power (2017). "Optimal timing of bridge deck repairs (Non publié à ce jour)."

Hammad, A., J. Yan et B. Mostofi (2007). Recent development of bridge management systems in Canada. 2007 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada: Transportation-An Economic Enabler (Les Transports: Un Levier Economique).

Hammad, A., C. Zhang, Y. Hu et E. Mozaffari (2006). Mobile model-based bridge lifecycle management system, Blackwell Publishing Inc.

Hu, Y. (2006). Mobile location-based bridge inspection decision-support system, Concordia University.

Jiang, Y. et K. C. Sinha (1989). "Bridge service life prediction model using the Markov chain." Transportation research record(1223).

Langlois, A.-M. (2010). Influence de l'endommagement sur la fiabilité structurale de ponts en béton armé: étude de cas, Université Laval.

Liu, Y. et X. Shi (2011). "Stochastic modeling of service life of concrete structures in chloride-laden environments." Journal of Materials in Civil Engineering **24**(4): 381-390.

Madanat, S. et W. H. W. Ibrahim (1995). "Poisson regression models of infrastructure transition probabilities." Journal of Transportation Engineering **121**(3): 267-272.

Madanat, S., R. Mishalani et W. H. W. Ibrahim (1995). "Estimation of infrastructure transition probabilities from condition rating data." Journal of infrastructure systems **1**(2): 120-125.

Madanat, S. M., M. G. Karlaftis et P. S. McCarthy (1997). "Probabilistic infrastructure deterioration models with panel data." Journal of Infrastructure Systems **3**(1): 4-9.

Mankiw, N. et W. Scarth (2001). Macroeconomics. Canadian, New York: Worth Publishers.

Meyn, S. P. et R. L. Tweedie (2012). Markov chains and stochastic stability, Springer Science & Business Media.

MFQ (2012). Budget 2012-2013 : Plan budgétaire. G. d. Québec: 520.

Morcous, G. et A. Akhnoukh (2006). Stochastic modeling of infrastructure deterioration: An application to concrete bridge decks. Joint International Conference on computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montreal, Canada.

Morcous, G., H. Rivard et A. Hanna (2002). "Modeling bridge deterioration using case-based reasoning." Journal of Infrastructure Systems **8**(3): 86-95.

MTMDET. (2013). "Détail du dispositif de signalisation D-200." Retrieved 3 janvier, 2017, from <http://www.rsr.transports.gouv.qc.ca/Dispositifs/Details.aspx?cid=12553&che=DANGR&cat=DANGR&p=114&ca=PetiteVignette>.

MTQ (2000). Manuel de l'utilisateur du système de gestion des structures SGS-5016. Gouvernement du Québec. Québec, Canada, Bibliothèque Nationale du Québec.

MTQ (2004). Manuel d'inspection des structures: Évaluation des dommages. Gouvernement du Québec. Québec, Canada, Bibliothèque Nationale du Québec.

MTQ (2005). Manuel d'évaluation de la capacité portante des structures. Gouvernement du Québec. Québec, Canada, Bibliothèque Nationale du Québec.

MTQ (2005). Manuel d'inspection des structures: Instructions Techniques. Gouvernement du Québec. Québec, Canada, Bibliothèque Nationale du Québec.

MTQ (2007). Suite du rapport de la CEVC. G. d. Québec. Québec.

MTQ (2009). Rapport annuel de gestion 2008-2009. G. d. Québec. Québec: 211.

MTQ (2010). Rapport annuel de gestion 2009-2010. G. d. Québec. Québec: 226.

MTQ (2011). Le réseau routier - Contexte, bilan et perspectives. Forum sur l'état des infrastructures de transport. M. Ministère des Transports du Québec. Montréal, Québec.

MTQ (2011). Rapport annuel de gestion 2010-2011. G. d. Québec. Québec: 216.

MTQ (2012). Débits de circulation des années 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010 et 2012.

MTQ (2012). Manuel d'inspection des structures. Gouvernement du Québec. Québec, Canada, Bibliothèque Nationale du Québec.

MTQ (2012). Rapport annuel de gestion 2011-2012. G. d. Québec. Québec: 214.

MTQ (2013). Rapport annuel de gestion 2012-2013. G. d. Québec. Québec: 221.

MTQ (2014). Normes des ouvrages routiers Tome I : Conception Routière. G. d. Québec. Québec, Canada.

MTQ (2014). Rapport annuel de gestion 2013-2014. G. d. Québec. Québec: 212.

MTQ (2015). Normes des ouvrages routiers Tome III : Ouvrages d'art. G. d. Québec. Québec, Canada.

MTQ (2015). Système GSQ-6026: Algorithmes pour le calcul des indicateurs de gestion. G. d. Québec. Québec, Canada.

Na, U. J., S.-J. Kwon, S. R. Chaudhuri et M. Shinozuka (2012). "Stochastic model for service life prediction of RC structures exposed to carbonation using random field simulation." KSCE Journal of Civil Engineering **16**(1): 133-143.

Natural Resources Canada (2010). Rapport d'étape de l'Enquête sur les véhicules au Canada 2008.

Norris, J. R. (1998). Markov chains, Cambridge university press.

Peng, J. et J. Zhang (2012). "Incremental process based carbonation depth prediction model of concrete structures and its probabilistic analysis." Journal of Highway and Transportation Research and Development **29**(10): 54-58.

Power, G. J., C. D. Tandja M, J. Bastien et P. Grégoire (2015). "Measuring infrastructure investment option value." The Journal of Risk Finance **16**(1).

Québec (1996). Loi instituant le Fonds de conservation et d'amélioration du réseau routier. partie 2 : Lois et Règlements. G. o. d. Québec, Éditeur officiel du Québec. **38**: 333-337.

Québec (2015). Loi sur le ministère des Transports du Québec. É. o. d. Québec.

Ross, S. M. (2014). Introduction to probability models, Academic press.

Ryall, M. J. (2001). Bridge management, Elsevier.

SAAQ (2015). Données et Statistiques 2014. S. d. l. a. a. d. Québec.

Sanders, D. H. et Y. J. Zhang (1994). "Bridge deterioration models for states with small bridge inventories." Transportation Research Record(1442).

Setunge, S. et M. S. Hasan (2011). Concrete bridge deterioration prediction using Markov chain approach. International Conference on Structural Engineering Construction and Management. Kandy: 14 pages.

Shahin, M. Y., M. M. Nunez, M. R. Broten, S. H. Carpenter et A. Sameh (1987). New techniques for modeling pavement deterioration.

Sianipar, P. R. et T. M. Adams (1997). "Fault-tree model of bridge element deterioration due to interaction." Journal of Infrastructure Systems **3**(3): 103-110.

Smith, W. (2010). "On the simulation and estimation of the mean-reverting ornstein-uhlenbeck process." Commodities Markets and Modelling.

Sobanjo, J. O. et P. D. Thompson (2011). Enhancement of the FDOT's Project Level and Network Level Bridge Management Analysis Tools, Florida Department of Transportation: 329 pages.

Stewart, M. G. (2012). "Spatial and time-dependent reliability modelling of corrosion damage, safety and maintenance for reinforced concrete structures." Structure and Infrastructure Engineering **8**(6): 607-619.

Stratt, R. W. (2010). "Bridge Management a System Approach for Decision Making." School of Doctoral Studies European Union Journal(2).

Talukdar, S. et N. Banthia (2013). "Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change: development of a service lifespan model." Construction and Building Materials **40**: 775-782.

Transport Canada. (1994/2011). "Guide to benefit-cost analysis in Transport Canada: benefits and other effects of projects." Retrieved 14 August 2014, from <http://data.tc.gc.ca/archive/eng/corporate-services/finance-bca-122.htm>.

Yan, J. X. (2008). A survey of the state of bridge management in Canada, Concordia University Montreal, Quebec, Canada.

Yescombe, E. R. (2014). Principles of project finance, Academic Press.

ANNEXE A : COMPLÉMENT SUR LES MODÈLES DE GESTION DU MTMDET

A.1 Type de structures

Le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports classe l'ensemble de ses structures selon un code de classification. Les ponts à étage se retrouvent parmi cette classification. Les codes de classification pour les structures routières au Québec sont présentés du Tableau A.1 au Tableau A.8.

Tableau A.1 – Classification des ponceaux (tiré de MTQ 2015)

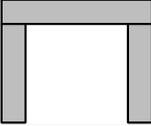
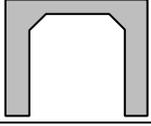
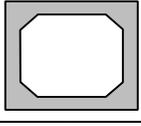
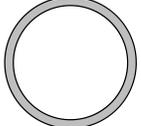
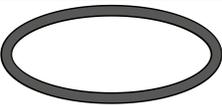
10 – PONCEAUX		
CODE	TYPE DE PONT	SCHÉMA
11	Dalle en béton armé	
12	Portique en béton armé	
13	Ponceau rectangulaire en béton armé	
14	Ponceau circulaire en béton armé	
15	Ponceau circulaire en acier	
16	Ponceau circulaire en thermoplastique	
17	Ponceau elliptique en acier	
18	Ponceau arqué en acier	
19	Ponceau voûté en béton armé	
20	Ponceau voûté en acier	
21	Ponceau en bois	

Tableau A.2 - Classification des ponts à dalle épaisse (tiré de MTQ 2015)

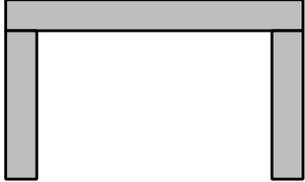
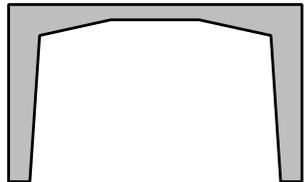
30 - PONT À DALLE ÉPAISSE		
CODE	TYPE DE PONT	SCHÉMA
31	Dalle pleine en béton armé	
32	Dalle pleine en béton précontraint	
33	Dalle évidée en béton armé	
34	Dalle évidée en béton précontraint	
35	Portique en béton armé	
36	Portique en béton armé, sous remblai	
37	Portique en béton précontraint	
38	Pont à béquilles, en béton armé	
39	Pont à béquilles, en béton précontraint	

Tableau A.3 - Classification des ponts à poutres à âme pleine (tiré de MTQ 2015)

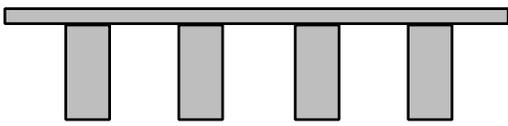
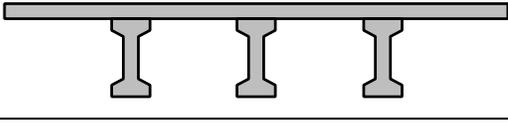
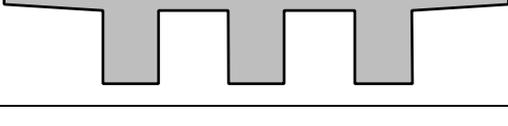
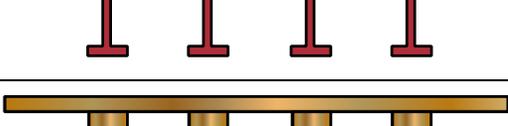
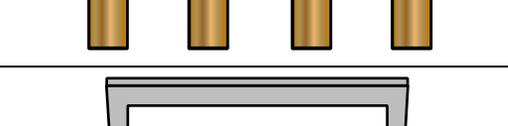
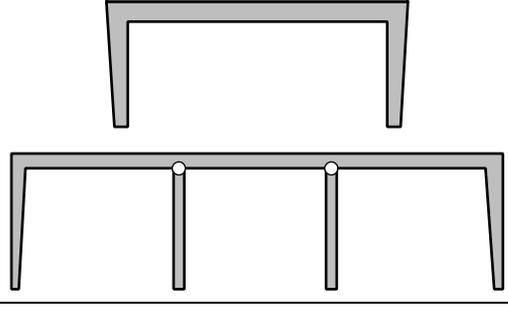
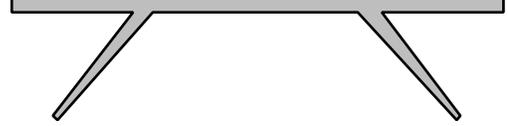
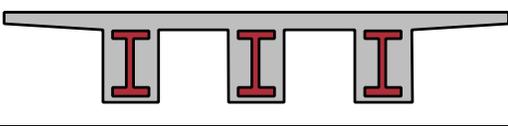
40 - PONT À POUTRES À ÂME PLEINE		
CODE	TYPE DE PONT	SCHEMA
41	Poutres en béton armé	
42	Poutres en béton précontraint, préfabriquées	
43	Poutres en béton précontraint, coulées en place	
44	Poutres en acier	
45	Pont acier-bois	
46	Poutres en bois	
47	Portique en béton armé	
48	Portique en béton armé, sous remblai	
49	Portique en acier	
50	Pont à béquilles, en béton armé	
51	Pont à béquilles, en acier	
52	Poutres en acier, enrobés de béton	

Tableau A.4 - Classification des ponts à poutres-caissons (tiré de MTQ 2015)

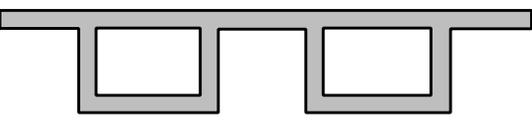
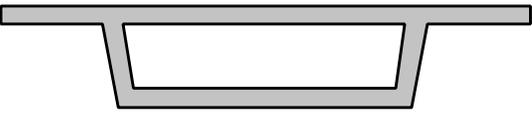
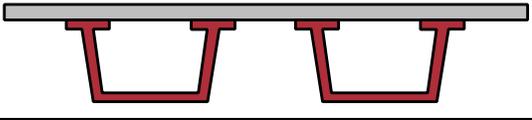
55 - PONTS À POUTRES-CAISSONS		
CODE	TYPE DE PONT	SCHÉMA
56	Poutres-caissons en béton armé	
57	Poutres-caissons en béton précontraint	
58	Poutres-caissons en acier	

Tableau A.5 - Classification des ponts à poutres triangulées (tiré de MTQ 2015)

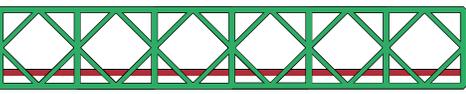
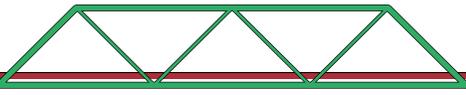
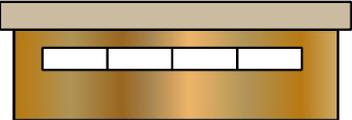
60 - PONT À POUTRES TRIANGULÉES		
CODE	TYPE DE PONT	SCHÉMA
61	À tablier inférieur, en acier	
62	À tablier intermédiaire, en acier	
63	Type Pony-Warren, en acier	
64	Type Bailey, en acier	
65	À tablier supérieur, en acier	
66	En bois	
67	Pont couvert 67B renforcés de poutres d'acier	

Tableau A.6 - Classification des ponts en arc (tiré de MTQ 2015)

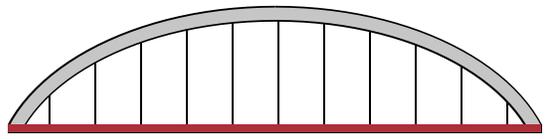
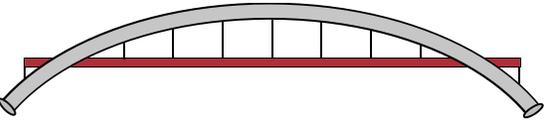
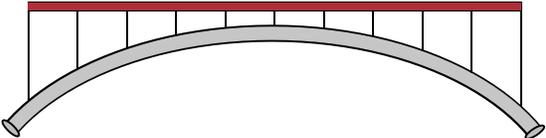
70 - PONT EN ARC		
CODE	TYPE DE PONT	SCHÉMA
71	À tablier inférieur, en béton armé	
72	À tablier inférieur, en acier	
73	À tablier intermédiaire, en béton armé	
74	À tablier intermédiaire, en acier	
75	À tablier supérieur, en béton armé *75B pour arc à tympan rigides	
76	À tablier supérieur, en acier	
77	À tablier supérieur en bois	

Tableau A.7 - Classification des ponts à câbles (tiré de MTQ 2015)

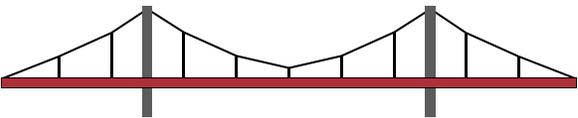
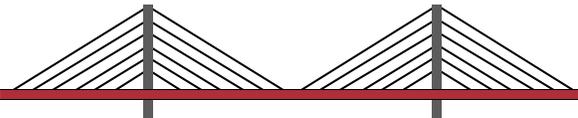
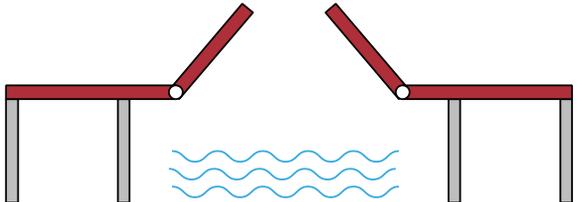
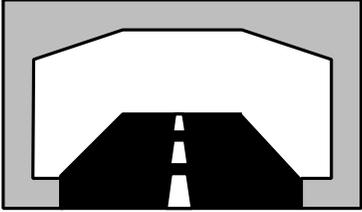
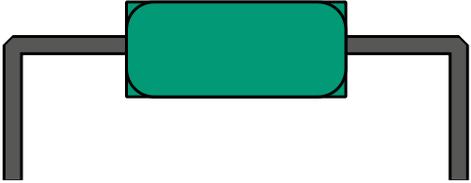
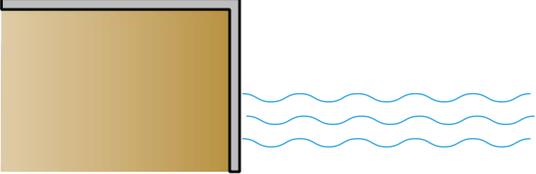
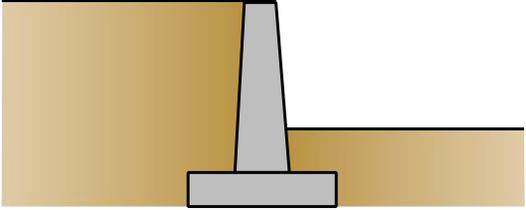
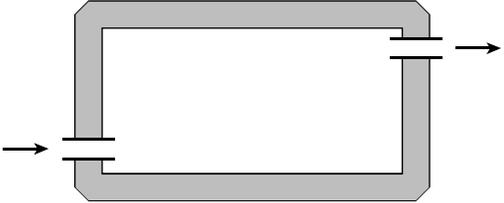
80 - PONT À CÂBLES ET MOBILE		
CODE	TYPE DE PONT	SCHÉMA
81	Pont suspendu	
82	Pont à haubans (avec poutres-caissons) 82B avec poutres à âmes pleines	
85	Pont mobile: levant, tournant, basculant	

Tableau A.8 - Classification des autres types d'ouvrages (tiré de MTQ 2015)

90 - AUTRES TYPES D'OUVRAGES		
CODE	TYPE DE PONT	SCHÉMA
94	Tunnel	
95	Support de signalisation, d'éclairage	
96	Quai	
97	Mur	
98	Station de pompage	
99	Autre	

A.2 Classification des éléments

Au ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, chaque élément d'une structure est classifié selon son importance dans le système. Selon l'ancien système SGS-5016, soit celui utilisé avant 2008, trois catégories d'éléments existaient : *Principal* (P), *Secondaire* (S) et *Accessoire* (A). De plus, les éléments étaient groupés selon la fiche d'inspection nécessaire à leur évaluation. La liste d'éléments à inspecter selon chaque fiche et leur importance sont présentées au Tableau A.9. La numérotation des éléments est importante pour le calcul des indices. Deux éléments portant le même numéro dans une même fiche indiquent que selon la structure, un des deux sera choisi. La répétition d'un élément dans une même fiche avec une numérotation différente signifie que cet élément peut apparaître à différents endroits, à ne pas confondre avec plusieurs éléments identiques au même endroit qui porteraient alors le même numéro. Par exemple, pour la fiche B, la protection de talus est numérotée 3 et 5 pour considérer la protection de talus des deux côtés du pont, alors que pour la fiche C, il n'y a qu'un élément appareils d'appui, qui considère tous les appareils d'appui de la culée.

Tableau A.9 - Classification des éléments selon leur importance selon le modèle d'avant 2008 (tiré de MTQ 2004)

FICHE	N°	ÉLÉMENT	IMPORTANCE
B - Cours d'eau, remblai d'approche et protection de talus	1	Cours d'eau	S
	2	Remblai protégeant une fondation	P
	2	Remblai ne protégeant pas une fondation	S
	3	Protection de talus	A
	4	Remblai protégeant une fondation	P
	4	Remblai ne protégeant pas une fondation	S
	5	Protection de talus	A
C - Culée ou béquille de portique	1	Fondation	P
	2	Mur de front/Colonnes et chevêtre	P
	3	Assise	S
	4	Appareils d'appui	S
	5	Garde-grève	S
	6	Mur en retour/ en aile	S
	7	Mur en retour/ en aile	S

Tableau A.9 - Classification des éléments selon leur importance selon le modèle d'avant 2008 (tiré de MTQ 2004) (suite)

FICHE	N°	ÉLÉMENT	IMPORTANCE
D - Pile ou béquille intermédiaire	1	Fondation	P
	2	Fût, colonnes, banc, etc.	P
	3	Chevêtre	P
	4	Contreventements	S
	5	Assise	S
	6	Appareils d'appui	S
E - Platelage	1	Surface de roulement	S
	2	Drainage et système de drainage	A
	3	Côté extérieur en béton	P
	4	Côté extérieur en béton	P
	5	Dessous à l'extrémité	P
	6	Dessous au centre	P
	7	Dessous à l'extrémité	P
	8	Dessus de la dalle en béton	P
F - Poutre à âme pleine	1	Extrémité de la poutre	P
	2	Milieu de la poutre	P
	3	Extrémité de la poutre	P
	4	Diaphragme/Contreventement d'extrémité	S
	5	Diaphragme/Contreventement intermédiaire	S
	6	Diaphragme/Contreventement d'extrémité	S
	7	Raidisseur d'âme	S
G - Poutre-caisson	1	Extrémité de la poutre	P
	2	Milieu de la poutre	P
	3	Extrémité de la poutre	P
	4	Raidisseur d'âme	S
	5	Raidisseur de semelle inférieure	S
	6	Diaphragme d'extrémité	P
	7	Diaphragmes intermédiaires	S
	8	Diaphragme d'extrémité	P
H - Poutre triangulée	1	Membrure supérieure	P
	2	Membrure inférieure	P
	3	Montants	P
	4	Diagonales	P
	5	Assemblages	P

Tableau A.9 - Classification des éléments selon leur importance selon le modèle d'avant 2008 (tiré de MTQ 2004) (suite)

FICHE	N°	ÉLÉMENT	IMPORTANCE
I - Arc	1	Arc	P
	2	Membrure supérieure	P
	3	Tirant	P
	4	Suspentes/Montants	P
	5	Diagonales	P
	6	Assemblages	P
J - Arc à tympans rigides	1	Tympan	P
	2	Fondation	P
	3	Naissance de l'arc	P
	4	Rein	P
	5	Clé	P
	6	Rein	P
	7	Naissance de l'arc	P
	8	Fondation	P
	9	Tympan	P
K - Structure du tablier	1	Entretoise d'extrémité	P
	2	Entretoises intermédiaires	P
	3	Entretoise d'extrémité	P
	4	Longerons panneaux d'extrémités	P
	5	Longerons panneaux intermédiaires	P
	6	Longerons panneaux d'extrémités	P
	7	Contreventements inférieurs	S
L - Contreventements	1	Supérieurs	S
	2	Inférieurs	S
	3	Portique d'extrémité	S
	4	Transversaux	S
	5	Portique d'extrémité	S
M - Joint de tablier	1	Cornières/Enclenchements	S
	2	Éléments en élastomère	S
	3	Dents/Doigts/Plaques	S
	4	Dalot	S
	5	Épaulements	S
	6	Plaques couvre-joint	S
	7	Scellement d'un joint fixe	S
N - Chasse-roues et trottoir	1	Trottoir/Chasse-roues	S
	2	Bande médiane	S
	3	Trottoir/Chasse-roues	S

Tableau A.9 - Classification des éléments selon leur importance selon le modèle d'avant 2008 (tiré de MTQ 2004) (suite)

FICHE	N°	ÉLÉMENT	IMPORTANCE
Q - Mur	1	Fondation/Système de soutien	S
	2	Mur/Parois	S
	3	Trottoir/Chasse-roues	S
	4	Parapet/Glissière en béton	S
	5	Poteaux	S
	6	Lisses et barreaux	S
R - Ponceau	1	Entrée	S
	2	Fondation/Ceinture	P
	3	Radier	P
	4	Mur/Naissance de voûte/Coin inférieur	P
	5	Dessous de la dalle/Voûte	P
	6	Sortie	S
S - Pont couvert	1	Membrure supérieure	P
	2	Membrure inférieure	P
	3	Diagonales	P
	4	Poteaux et tirants	P
	5	Membrure supérieure	P
	6	Membrure inférieure	P
	7	Diagonales	P
	8	Poteaux et tirants	P
	9	Lambris	S
	10	Toiture	S
	11	Glissière (2 côtés)	S
U - Pont suspendu	1	Massifs d'ancrage	P
	2	Chambres d'épanouissement des câbles	P
	3	Câbles porteurs et accessoires	P
	4	Suspentes et accessoires	P
	5	Bras d'articulation	P
	6	Butoirs	P
	7	Stabilisateurs transversaux	P
V - Pont à haubans	1	Haubans et accessoires	P
	2	Sabots d'attache des torons	P
	3	Bras d'articulation	P

Selon le système actuel (GSQ-6026), la catégorie d'importante *Accessoire* a été retirée et les éléments sont maintenant classés par groupe d'éléments plutôt que par fiche. La liste des éléments et leur importance pour le système de gestion GSQ-6026 sont présentées au Tableau A.10.

Tableau A.10 - Classification des éléments selon leur importance en fonction du modèle de gestion actuel (tiré de MTQ 2012, MTQ 2015)

GROUPE	N°	ÉLÉMENT	IMPORTANCE
A - Cours d'eau et remblai	1	Cours d'eau	S
	2	Remblai	S
	3	Protection de talus	S
	4	Protection du lit	S
B - Culée	1	Fondation	P
	2	Mur de front	P
	3	Colonne	P
	4	Chevêtre	P
	5	Garde-grève	S
	6	Bloc d'assise	P
	7	Corbeau	P
	8	Appareil d'appui	P
	9	Butoir	S
	10	Mur d'aile/En retour	S
	11	Assise	P
C - Pile	1	Fondation	P
	2	Fût	P
	3	Colonne/Banc	P
	4	Chevêtre	P
	5	Bloc d'assise	P
	6	Corbeau	P
	7	Appareil d'appui	P
	8	Butoir	S
	9	Assise	P
D - Platelage	1	Surface de roulement	S
	2	Système de drainage	S
	3	Côté extérieur	P
	4	Platelage	P
E - Poutre à âme pleine/poutre-caisson	1	Poutre	P
	2	Diaphragme d'extrémité à l'intérieur d'une poutre caisson	P

Tableau A.10 - Classification des éléments selon leur importance en fonction du modèle de gestion actuel (tiré de MTQ 2012, MTQ 2015) (suite)

GROUPE	N°	ÉLÉMENT	IMPORTANCE
F - Poutre triangulée	1	Corde supérieure	P
	2	Corde inférieure	P
	3	Montant/Poteau	P
	4	Diagonale	P
	5	Assemblage	P
G - Arc	1	Arc	P
	2	Membrure supérieure	P
	3	Tirant	P
	4	Suspente/Montant	P
	5	Diagonale	P
	6	Assemblage	P
H - Arc à tympan rigide	1	Tympan	P
	2	Fondation	P
	3	Voûte	P
I - Pont suspendu	1	Massif d'ancrage	P
	2	Chambre d'épanouissement des câbles	P
	3	Câble porteur et accessoires	P
	4	Suspente et accessoires	P
	5	Bras d'articulation	P
	6	Butoir	P
	7	Stabilisateurs transversaux	P
J - Pont à haubans	1	Hauban et accessoires	P
	2	Sabot d'attache des torons	P
	3	Bras d'articulation	P
K - Pont couvert	1	Tirant	P
	2	Lambris	S
	3	Toiture	S
L - Structure de tablier	1	Entretoise	P
	2	Longeron	P
M - Contreventement	1	Contreventement	S
	2	Portique d'extrémité	S
	3	Diaphragme	S
N - Joint	1	Élément en élastomère	S
	2	Épaulement	S
	3	Autres éléments	S

Tableau A.10 - Classification des éléments selon leur importance en fonction du modèle de gestion actuel (tiré de MTQ 2012, MTQ 2015) (suite)

GROUPE	N°	ÉLÉMENT	IMPORTANCE
O - Chasse-roues/trottoir	1	Trottoir	S
	2	Chasse-roues	S
	3	Bande médiane	S
P - Dispositif de retenue	1	Glissière (gauche ou droite)	S
	2	Glissière médiane	S
	3	Garde-fou	S
Q - Protection de la corrosion	1	Acier structural - unités de fondation	S
	2	Acier structural - tablier	S
	3	Acier structure - poutre triangulée/Arc	S
R - Approche	1	Transition de chaussée	S
	2	Système de drainage	S
	3	Glissière	S
	4	Escalier	S
	-	Passerelle d'inspection	S
	-	Dalle de transition	S
S - Ponceau	1	Mur de tête	S
	2	Mur en aile	S
	3	Mur parafouille	S
	4	Défecteur et/ou piège à débris	S
	5	Fondation	P
	6	Radier	P
	7	Mur/Naissance de voûte/Noin inférieur	P
	8	Dessous dalle/Voûte	P
T - Mur de soutènement	1	Fondation	P
	2	Mur	P
U - Autres types de mur	1	Fondation	S
	2	Mur	S

A.3 Complément sur l'indice fonctionnel de structure (IFS)

Pour le calcul de l'indice fonctionnel de structure, les nombreux indices définis à la section 3.2.1.4 dépendent majoritairement de valeurs souhaitables et de valeurs minimales souhaitables. Dans plusieurs cas, ces valeurs sont données directement dans l'inventaire du pont, cependant, dans certain cas, il faut estimer ces valeurs. Cette section contient donc les méthodes d'évaluation pour certaines de ces valeurs.

Avant tout, il est important de définir les différents types d'obstacles qu'un ouvrage peut traverser selon les 7 choix présentés au Tableau A.11. La position des fils par rapport à la voie ferrée est comptabilisée en fonction que l'observateur regarde vers l'est ou vers le nord.

Tableau A.11 - Types d'obstacles traversés par un ouvrage routier (MTQ 2005)

CODE	TYPE D'OBSTACLE
1	Route
2	Cours d'eau
3	Voie ferrée avec fils à gauche
4	Voie ferrée avec fils à droite
5	Voie ferrée sans fils
6	Passage pour piétons, animaux ou motoneige
7	Autre (ligne électrique, stationnement...)

De plus, il est important de définir les codifications utilisées par le Ministère pour définir les classifications fonctionnelles de son réseau routier. La classification fonctionnelle (**CF**) est une hiérarchisation des routes à partir de leurs fonctions respectives établies d'après des critères démographiques et socio-économiques (MTQ 2014). Les codes de classification fonctionnelle pour le réseau routier québécois sont présentés au Tableau A.12. Il est à noter que cette classification n'est plus utilisée aujourd'hui, mais qu'elle permet de traiter les données du système SGS-5016.

Tableau A.12 - Classification fonctionnelle du réseau routier québécois (MTQ 2005)

CODE	CLASSIFICATION FONCTIONNELLE (CF)
10	AUTOROUTE
11	Autoroute Réseau Supérieur
15	Autoroute Politique Routière Nationale
16	Autoroute Réseau Stratégique en soutien au commerce extérieur
17	Autoroute Réseau Stratégique de transport du Québec
20	NATIONALE
21	Nationale Réseau Supérieur
25	Nationale Politique Routière Nationale
26	Nationale Réseau Stratégique en soutien au commerce extérieur
27	Nationale Réseau Stratégique de transport du Québec
30	RÉGIONALE
31	Régionale Réseau Supérieur
36	Régionale Réseau Stratégique en soutien au commerce extérieur
37	Régionale Réseau Stratégique de transport du Québec
40	COLLECTRICE
41	Collectrice Réseau Supérieur
46	Collectrice Réseau Stratégique en soutien au commerce extérieur
47	Collectrice Réseau Stratégique de transport du Québec
50	LOCALE
51	Locale 1
52	Locale 2
53	Locale 3
60	ACCÈS AUX RESSOURCES
61	Accès aux ressources
66	Accès aux ressources Réseau Stratégique en soutien au commerce extérieur
67	Accès aux ressources Réseau Stratégique de transport du Québec
70	ACCÈS AUX RESSOURCES ET AUX LOCALITÉS ISOLÉES
71	Accès aux ressources et aux localités isolées
76	Accès aux ressources et aux localités isolées Réseau Stratégique en soutien au commerce extérieur
77	Accès aux ressources et aux localités isolées Réseau Stratégique de transport du Québec
90	AUTRES
91	Passage à piétons
92	Chemins de fer
93	Autres

Pour le calcul de cinq indices d'inadéquation, certains paramètres de ponts doivent être estimés s'ils ne sont pas déjà donnés dans l'inventaire. Le premier concerne la capacité du pont. La détermination des valeurs de capacité souhaitable et de capacité minimale souhaitable en fonction de la classification fonctionnelle se fait à l'aide du Tableau A.13.

Tableau A.13 - Capacité souhaitable et minimale souhaitable en fonction de la classification fonctionnelle (MTQ 2000)

CLASSIFICATION FONCTIONNELLE	CAPACITÉ SOUHAITABLE (T)			CAPACITÉ MINIMALE SOUHAITABLE (T)		
	NOMBRE D'ESSIEUX			NOMBRE D'ESSIEUX		
	2	3	4	2	3	4
10, 15	30	50	67	30	50	67
20, 25	30	50	67	12	26	34
30	30	50	67	12	26	34
40	30	50	67	12	26	34
51, 52, 53	30	50	67	12	12	12
60	30	50	67	30	50	67

Le deuxième indice d'inadéquation nécessitant des calculs est l'indice du trafic maximum. Le Tableau A.14 permet de déterminer le débit journalier maximum. Il est à noter que le terme LVC signifie Largeur de la Voie Carrossable.

Tableau A.14 - Débit journalier maximum en fonction de la classification fonctionnelle et du nombre de voie de circulation (MTQ 2000)

CLASSIFICATION FONCTIONNELLE	NOMBRE DE VOIES DE CIRCULATION	DÉBIT JOURNALIER MAXIMUM
10, 15	6	75 000
10, 15	4	50 000
> 15		1 500 x LVC

Par la suite, les valeurs de dégagement horizontal sont aussi à déterminer selon les paramètres du pont. Les valeurs de dégagements horizontaux en fonction de l'obstacle et de la classification fonctionnelle sont présentées au Tableau A.15.

Tableau A.15 - Dégagements horizontaux selon les paramètres du pont (MTQ 2000)

TYPE OBSTACLE	CF	NOMBRE DE VOIES DE CIRCULATION	SOUS-ROUTE	DÉGAGEMENT À DROITE NÉCESSAIRE (m)	DÉGAGEMENT À GAUCHE NÉCESSAIRE (m)
1	10, 15	6	0	6,00	6,00
1	10, 15	4	0	6,00	8,00
5				3,66	3,66
3, 4				6,71	6,71
1	20, 25		0	6,00	6,00
1	30		0	6,00	6,00
1	40		0	6,00	6,00
1	51, 52, 53		0	4,00	4,00
1	60		0	4,00	4,00
1	10, 15, 20, 25, 30, 40		0	5,00	5,00

Le Tableau A.16 contient, pour sa part, les valeurs de dégagement vertical recommandée et obligatoire en fonction du type d'obstacle traversé par le pont.

Tableau A.16 - Dégagement vertical recommandé et obligatoire selon l'obstacle traversé (MTQ 2000)

TYPE D'OBSTACLE	DÉGAGEMENT RECOMMANDÉ (m)	DÉGAGEMENT OBLIGATOIRE (m)
1	5,00	4,15
3, 4, 5	7,16	7,16
2	1,00	0,00

Finalement, le dernier indice d'inadéquation à vérifier est celui de la voie carrossable. Lorsque les valeurs de largeur de voie recommandée et minimale souhaitable ne sont pas données, il faut les déterminer à partir des valeurs fournies par le Tableau A.17.

Tableau A.17 - Largeur de voie recommandée et minimale souhaitable en fonction de la classification fonctionnelle et du nombre de voies (MTQ 2000)

CF	NOMBRE DE VOIES DE CIRCULATION	TYPE DE STRUCTURE	LARGEUR RECOMMANDÉE (m)	LARGEUR MINIMALE SOUHAITABLE (m)
10, 15	6		17,10	11,10
10, 15	4		11,70	7,40
20, 25			12,00	6,60
30		45	10,60	6,00
30			6,70	6,00
40			8,00	6,00
40		45	6,70	6,00
51, 52, 53	2		8,00	6,00
51, 52, 53	2	45	6,70	6,00
51, 52, 53	1		4,27	3,00
51, 52, 54	1	45	3,50	3,00
60	2		8,00	6,00
60	2	45	6,70	6,00
60	1		4,27	3,00
60	1	45	3,50	3,00

A.4 Complément sur l'indice d'état d'une structure (IES)

Pour le calcul de l'IES, la première étape est de calculer tous les indices pour les huit catégories d'éléments avant de pouvoir appliquer les équations présentées à la section 3.2.1.5. Donc, selon l'équation 3.10, il faut déterminer la cote C_i pour chacun des groupes d'éléments. Pour ce faire, les cotes d'évaluation du matériau sont combinées et pondérées en fonction de leur importance sur le système. Cette importance varie en fonction du type de structure. C'est pourquoi différentes combinaisons sont présentées au Tableau A.18 pour les éléments principaux en fonction du type de structure. Ce tableau fait référence aux fiches d'inspections et aux numéros d'éléments présentés à la section A.2. Il est à noter que le facteur de pondération pour les fiches C et D peut varier en fonction du nombre de piles ou de béquilles intermédiaires.

Tableau A.18 - Combinaison d'éléments principaux pour le calcul de l'IES (MTQ 2000)

TYPE DE STRUCTURE	FICHE	FACTEUR DE PONDÉRATION	ÉLÉMENTS		
			FONDATION	SYSTÈMES STRUCTURAUX	PLATELAGE
11, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20	R	1,00	1, 2, 3, 6		
	R	1,00		4, 5	
31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	C	1,00	1 à 7		
	D		1 à 6		
	E	1,00		3 à 7	
	N	1,00			1 à 3
41, 42, 43, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52	C	1,00	1 à 7		
	D		1 à 6		
	E	0,85			3 à 7
	F	1,00		1 à 7	
	N	0,15			1 à 3
44	C	1,00	1 à 7		
	D		1 à 6		
	E	0,85			3 à 7
	F	0,67		1 à 7	
	K	0,33		1 à 7	

**Tableau A.18 - Combinaison d'éléments principaux pour le calcul de l'IES (MTQ 2000)
(suite)**

TYPE DE STRUCTURE	FICHE	FACTEUR DE PONDÉRATION	ÉLÉMENTS		
			FONDATION	SYSTÈMES STRUCTURAUX	PLATELAGE
56, 57, 58	C	1,00	1 à 7		
	D		1 à 6		
	E	0,85			3 à 7
	G	1,00		1 à 8	
	N	0,15			1 à 3
61, 62, 65, 66	C	1,00	1 à 7		
	D		1 à 6		
	E	0,85			3 à 7
	H	0,67		1 à 5	
	K	0,22		1 à 7	
	L	0,11		1 à 5	
	N	0,15			1 à 3
63, 64	C	1,00	1 à 7		
	D		1 à 6		
	E	0,85			3 à 7
	H	0,67		1 à 5	
	K	0,33		1 à 7	
	N	0,15			1 à 3
67	C	1,00	1 à 7		
	D		1 à 6		
	E	1,00			3 à 7
	K	0,22		1 à 7	
	L	0,11		1 à 5	
	S	0,67		1 à 10	
67B	C	1,00	1 à 7		
	D		1 à 6		
	E	1,00			3 à 7
	F	0,22		1 à 7	
	K	0,67		1 à 10	
71, 72, 73, 74, 75, 76	C	1,00	1 à 7		
	D		1 à 6		
	E	0,85			3 à 7
	I	0,67		1 à 6	
	K	0,22		1 à 7	
	L	0,11		1 à 5	
	N	0,15			1 à 3

**Tableau A.18 - Combinaison d'éléments principaux pour le calcul de l'IES (MTQ 2000)
(suite)**

TYPE DE STRUCTURE	FICHE	FACTEUR DE PONDÉRATION	ÉLÉMENTS		
			FONDATION	SYSTÈMES STRUCTURAUX	PLATELAGE
75B	J	1,00	2, 8		
	J	1,00		1, 3, 4, 5, 6, 7, 9	
	E	0,85			3 à 7
	N	0,15			1 à 3
81	C	1,00	1 à 7		
	D		1 à 6		
	E	0,85			3 à 7
	H	0,35		1 à 5	
	K	0,15		1 à 7	
	L	0,15		1 à 5	
	N	0,15			1 à 3
U	0,35		1 à 6		
82	C	1,00	1 à 7		
	D		1 à 6		
	E	0,85			3 à 7
	G	0,35		1 à 5	
	K	0,20		1 à 7	
	L	0,10		1 à 5	
	N	0,15			1 à 3
	V	0,35		1 à 3	
82B	C	1,00	1 à 7		
	D		1 à 6		
	E	0,85			3 à 7
	F	0,35		1 à 5	
	K	0,20		1 à 7	
	L	0,10		1 à 5	
	N	0,15			1 à 3
	V	0,35		1 à 3	
97	Q	1,00	1		
	Q	1,00		2	

Le même exercice doit être effectué pour les éléments secondaires et accessoires. Ces combinaisons sont présentées au Tableau A.19. Les 5 types d'éléments secondaires et accessoires sont ainsi présentés : Revêtement (**RV**), Surface de roulement (**SR**), Joints (**JT**), Éléments de sécurité (**ES**) et Autres (**AU**).

Tableau A.19 - Combinaison d'éléments secondaires et accessoires pour le calcul de l'IES (MTQ 2000)

TYPE DE STRUCTURE	FICHE	FACTEUR DE PONDÉRATION	ÉLÉMENTS				
			RV	SR	JT	ES	AU
11, 14, 15, 17, 18, 19, 20	B	0,50					1 à 5
	P	0,50					1 à 7
13	B	0,50					1 à 5
	N	0,50				1 à 3	
	O	1,00	3, 4, 5, 8, 9				
	O	0,50				1 à 9	
	P	0,50					1 à 7
31, 32, 33, 34, 35, 38, 39	B	0,30					1 à 5
	D	0,80	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	M	1,00			1 à 7		
	O	0,20	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
36, 37, 46, 47, 48	B	0,30					1 à 5
	D	0,80	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	O	0,20	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
	P	0,50					1 à 7
41, 42, 43, 50, 52, 56, 57	B	0,30					1 à 5
	D	0,80	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	M	1,00			1 à 7		
	O	0,20	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
	P	0,50					1 à 7

Tableau A.19 - Combinaison d'éléments secondaires et accessoires pour le calcul de l'IES (MTQ 2000) (suite)

TYPE DE STRUCTURE	FICHE	FACTEUR DE PONDÉRATION	ÉLÉMENTS				
			RV	SR	JT	ES	AU
44	B	0,30					1 à 5
	D	0,20	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	F	0,35	1 à 7				
	K	0,35	1 à 7				
	M	1,00			1 à 7		
	O	0,10	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
	P	0,50					1 à 7
45, 49	B	0,30					1 à 5
	D	0,30	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	F	0,50	1 à 7				
	O	0,20	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
	P	0,50					1 à 7
51	B	0,30					1 à 5
	D	0,30	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	F	0,50	1 à 7				
	M	1,00			1 à 7		
	O	0,20	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
	P	0,50					1 à 7
58	B	0,30					1 à 5
	D	0,30	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	G	0,50	1 à 8				
	M	1,00			1 à 7		
	O	0,20	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
	P	0,50					1 à 7

Tableau A.19 - Combinaison d'éléments secondaires et accessoires pour le calcul de l'IES (MTQ 2000) (suite)

TYPE DE STRUCTURE	FICHE	FACTEUR DE PONDÉRATION	ÉLÉMENTS				
			RV	SR	JT	ES	AU
61, 62, 65, 66	B	0,30					1 à 5
	D	0,20	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	H	0,30	1 à 5				
	K	0,20	1 à 7				
	L	0,20	1 à 5				
	M	1,00			1 à 7		
	O	0,10	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
P	0,50					1 à 7	
63, 64	B	0,30					1 à 5
	D	0,20	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	H	0,35	1 à 5				
	K	0,35	1 à 7				
	M	1,00			1 à 7		
	O	0,10	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
	P	0,50					1 à 7
67	B	0,30					1 à 5
	D	0,20	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	K	0,30	1 à 7				
	L	0,30	1 à 5				
	P	0,50					1 à 7
	S	0,20	1 à 11				
	S	1,00				11	

Tableau A.19 - Combinaison d'éléments secondaires et accessoires pour le calcul de l'IES (MTQ 2000) (suite)

TYPE DE STRUCTURE	FICHE	FACTEUR DE PONDÉRATION	ÉLÉMENTS				
			RV	SR	JT	ES	AU
67B	B	0,30					1 à 5
	D	0,20	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	F	0,20	1 à 7				
	K	0,20	1 à 7				
	L	0,20	1 à 5				
	P	0,50					1 à 7
	S	0,20	1 à 11				
	S	1,00				11	
71, 72, 73, 74, 75, 76	B	0,30					1 à 5
	D	0,20	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	I	0,30	1 à 6				
	K	0,20	1 à 7				
	L	0,20	1 à 5				
	M	1,00			1 à 7		
	O	0,10	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
	P	0,50					1 à 7
75B	B	0,30					1 à 5
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	M	1,00			1 à 7		
	O	1,00	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
	P	0,50					1 à 7
97	Q	1,00	2, 5, 6				
	Q	1,00					3, 4, 5, 6

Tableau A.19 - Combinaison d'éléments secondaires et accessoires pour le calcul de l'IES (MTQ 2000) (suite)

TYPE DE STRUCTURE	FICHE	FACTEUR DE PONDÉRATION	ÉLÉMENTS				
			RV	SR	JT	ES	AU
81	B	0,30					1 à 5
	D	0,15	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	H	0,20	1 à 5				
	K	0,20	1 à 7				
	L	0,20	1 à 5				
	M	1,00			1 à 7		
	O	0,05	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
	P	0,45					1 à 7
	U	0,20	1 à 7			1 à 9	
U	0,05					7	
82	B	0,30					1 à 5
	D	0,15	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	G	0,20	1 à 8				
	K	0,20	1 à 7				
	L	0,20	1 à 5				
	M	1,00			1 à 7		
	O	0,05	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
	P	0,50					1 à 7
	V	0,20	1 à 3				
82B	B	0,30					1 à 5
	D	0,15	2, 3, 4				
	E	1,00		1			
	E	0,20					2
	F	0,20	1 à 7				
	K	0,20	1 à 7				
	L	0,20	1 à 5				
	M	1,00			1 à 7		
	O	0,05	3, 4, 5, 8, 9				
	O	1,00				1 à 9	
	P	0,50					1 à 7
	V	0,20	1 à 3				

Par contre, il reste à savoir comment obtenir la combinaison de cote pour chaque fiche ou combinaison de fiches. Encore une fois, des facteurs de pondération sont utilisés. S'il y a plusieurs éléments du même numéro sur une même fiche, la pire cote est utilisée. Les facteurs de pondération pour les éléments principaux sont présentés au Tableau A.20.

Tableau A.20 - Facteurs de pondération pour les calculs de cotes pour les éléments principaux par fiche d'inspection (MTQ 2000)

FICHE	FACTEUR DE PONDÉRATION										
	ÉLÉMENT										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C	0,5000	0,1500	0,1000	0,1000	0,0500	0,0500	0,0500				
D	0,5000	0,1500	0,1000	0,0500	0,1000	0,1000					
E	0,0000	0,0000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000				
F	0,2200	0,2200	0,2200	0,0600	0,1100	0,0600	0,1100				
G	0,1500	0,1500	0,1500	0,0800	0,0800	0,1500	0,0900	0,1500			
H	0,3500	0,2500	0,1500	0,1500	0,1000						
I	0,2500	0,1800	0,1800	0,1300	0,1300	0,1300					
J	0,1250	0,5000	0,1500	0,1500	0,1500	0,1500	0,1500	0,5000	0,1250		
K	0,1000	0,3000	0,1000	0,1125	0,2250	0,1125	0,0500				
L	0,1250	0,1250	0,2500	0,2500	0,2500						
N	0,3500	0,3000	0,3500								
Q	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000					
R	0,2500	0,2500	0,2500	0,5000	0,5000	0,2500					
S	0,1000	0,1500	0,1000	0,1000	0,1000	0,1500	0,1000	0,1000	0,0500	0,0500	0,0000
U	0,1500	0,2500	0,2500	0,2500	0,0500	0,0500	0,0000				
V	0,5000	0,3000	0,2000								

La même logique s'applique pour les éléments secondaires et accessoires. Les facteurs de pondération à utiliser pour combiner les éléments d'une même fiche sont présentés au Tableau A.21.

Tableau A.21 - Facteurs de pondération pour les calculs de cotes pour les éléments secondaires et accessoires par fiche d'inspection (MTQ 2000)

FICHE	FACTEUR DE PONDÉRATION										
	ÉLÉMENT										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20						
D	0,00	0,33	0,34	0,33	0,00	0,10					
E (surf. roul.)	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
E (autres)	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
F	0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10				
G	0,20	0,20	0,20	0,05	0,05	0,10	0,10	0,10			
H	0,25	0,25	0,20	0,20	0,10						
I	0,25	0,20	0,20	0,20	0,10	0,05					
K	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,10				
L (autres)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20						
L (revêt.)	0,35	0,35	0,10	0,10	0,10						
M	0,20	0,35	0,10	0,10	0,15	0,05	0,05				
N	0,35	0,30	0,35								
O (sécurité)	0,05	0,10	0,15	0,15	0,10	0,05	0,10	0,15	0,15		
O (revêt.)	0,00	0,00	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	0,20	0,20		
P	0,20	0,20	0,10	0,05	0,20	0,05	0,20				
Q (autres)	0,00	0,00	0,25	0,25	0,25	0,25					
Q (revêt.)	0,00	0,50	0,00	0,00	0,25	0,25					
S (sécurité)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
S (revêt.)	0,10	0,10	0,05	0,05	0,10	0,10	0,05	0,05	0,20	0,15	0,05
S (autres)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00
U (autres)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00				
U (revêt.)	0,15	0,15	0,20	0,20	0,15	0,10	0,05				
V	0,50	0,25	0,25								

Pour bien comprendre le fonctionnement du calcul des indices, voici un exemple de calcul d'IFS tiré, en partie, du Manuel d'utilisation du logiciel SGS-5016 (MTQ 2000). Dans cet exemple, il s'agit d'un pont de type 41, soit un pont à poutres en béton armé. Deux fiches F ont été remplies lors de l'inspection, vérifiant un nombre différent de poutres. Le Tableau A.22 contient un résumé des résultats d'inspection pour ces fiches. Les cotes minimales ont déjà été choisies pour la création de ce tableau.

Tableau A.22 - Résultats d'inspection à des fins d'exemple (MTQ 2000)

FICHE F-1			FICHE F-2		
NOMBRE DE POUTRES : 64			NOMBRE DE POUTRES : 3		
ÉLÉMENT	CEM	CEC	ÉLÉMENT	CEM	CEC
1	3	3	1	3	4
2	3	4	2	4	4
3	3	3	3	3	4
4	3	4	4	3	3
5	4	4	5	5	5
6	3	4	6	1	1
7	0	0	7	0	0

Pour ce type de pont, la fiche F sert à calculer la cote pour les systèmes structuraux et l'ensemble des éléments sont alors nécessaires. Le calcul de la cote partielle consiste donc en une pondération de chacune des cotes de matériaux selon les facteurs données au Tableau A.20 puisqu'il s'agit alors d'un calcul pour les éléments structuraux.

$$C_{SF} = \sum_{i=1}^7 \frac{FP_i * \sum_{j=1}^{64+3} CEM_j}{FP_i * (64 + 3)} = 3,1342$$

$$= \frac{0,22 * (64 * 3 + 3 * 3) + 0,22 * (64 * 3 + 3 * 4) + 0,22 * (64 * 3 + 3 * 3) + 0,06 * (64 * 3 + 3 * 3) + 0,11 * (64 * 4 + 3 * 5) + 0,06 * (64 * 3 + 3 * 1)}{0,22 * (64 + 3) + 0,22 * (64 + 3) + 0,22 * (64 + 3) + 0,06 * (64 + 3) + 0,11 * (64 + 3) + 0,06 * (64 + 3)}$$

Il faut alors répéter ces calculs pour toutes les fiches nécessaires. Pour poursuivre l'exemple, les cotes calculées pour chaque groupe d'éléments nécessaires pour le calcul de l'indice sont présentés au Tableau A.23.

Tableau A.23 - Cotes pour chacun des groupes d'éléments pour l'exemple de calcul de l'IES

FICHE	C _F	C _S	C _P	C _{RV}	C _{SR}	C _{JT}	C _{SC}	C _{AU}
B								4,9562
C	5,3251							
D				1,2956				
E			4,1579		5,0000			2,0000
F		3,1342						
M						2,1955		
N			3,1954					
O				3,7592			4,2988	
P								3,8562

Selon les *points de démerites* pour ce type de pont et les équations présentées à la section 3.2.1.5, le calcul de l'indice d'état de la structure se fait donc comme suit :

$$C_F = 5,3251$$

$$I_F = \frac{6 - 5,3251}{5} = 0,1350$$

$$C_S = 3,1342$$

$$I_S = \frac{6 - 3,1342}{5} = 0,5732$$

$$C_P = 0,85 * 4,1579 + 0,15 * 3,1954 = 4,0135$$

$$I_P = \frac{6 - 4,0135}{5} = 0,3973$$

$$C_{RV} = 0,80 * 1,2956 + 0,20 * 3,7592 = 4,9957$$

$$I_{RV} = \frac{6 - 4,9957}{5} = 0,2009$$

$$C_{SR} = 5,0000$$

$$I_{SR} = \frac{6 - 5,3251}{5} = 0,2000$$

$$C_{JT} = 2,1955$$

$$I_{JT} = \frac{6 - 2,1955}{5} = 0,7609$$

$$C_{SC} = 4,2988$$

$$I_{SC} = \frac{6 - 4,2988}{5} = 0,3402$$

$$C_{AU} = 0,30 * 4,9562 + 0,20 * 2 + 0,5 * 3,8562 = 3,8145$$

$$I_{AU} = \frac{6 - 3,8145}{5} = 0,4371$$

$$P_{ES} = \min(25; 0,2009 * 5 + 0,2000 * 15 + 0,7609 * 15 + 0,3402 * 15 + 0,4371 * 15) = 25$$

$$IES = 100 - (0,1350 * 25 + 0,5732 * 25 + 0,3973 * 25) - 25 = 47,36$$

A.5 Compléments sur de l'indice de matériau de la structure (IMS)

L'unité de mesure pour chaque élément lors du calcul de l'indice de matériau d'une structure est présentée au Tableau A.24. Il est à noter que le Ministère possède aussi une liste de coût de remplacement par unité pour chaque élément selon son matériau. Cette liste de coût n'est cependant pas publique mais elle permet, à titre indicatif et à des fins de prévision, d'estimer l'indice de matériau. Les coûts réels lors de travaux varient en fonction de la concurrence, l'environnement et les réalités physiques des travaux.

Tableau A.24 - Liste des coûts de remplacements des éléments d'un pont (MTQ 2015)

GROUPE	N°	ÉLÉMENT	UNITÉ DE MESURE
A - Cours d'eau et remblai	1	Cours d'eau	-
	2	Remblai	-
	3	Protection de talus	-
	4	Protection du lit	-
B - Culée	1	Fondation	-
	2	Mur de front	m ²
	3	Colonnes	m ²
	4	Chevêtre	m ²
	5	Garde-grève	m ²
	6	Bloc d'assise	unité
	7	Corbeau	unité
	8	Appareil d'appui	unité
	9	Butoir	unité
	10	Mur d'aile/En retour	m ²
	11	Assise	m ²
C - Pile	1	Fondation	-
	2	Fût	m ²
	3	Colonnes/Bancs	m ²
	4	Chevêtre	m ²
	5	Bloc d'assise	unité
	6	Corbeau	unité
	7	Appareil d'appui	unité
	8	Butoir	unité
	9	Assise	m ²

Tableau A.24 - Liste des coûts de remplacements des éléments d'un pont (MTQ 2015) (suite)

GROUPE	N°	ÉLÉMENT	UNITÉ DE MESURE
D - Platelage	1	Surface de roulement	m ²
	2	Système de drainage	-
	3	Platelage	m ²
	4	Côté extérieur	m ²
E - Poutre à âme pleine/poutre-caisson	1	Poutre	m ²
	2	Diaphragme d'extrémité à l'intérieur d'une poutre caisson	m ²
F - Poutre triangulée	1	Corde supérieure	m
	2	Corde inférieure	m
	3	Montant/Poteau	m
	4	Diagonale	m
	5	Assemblage	unité
G - Arc	1	Arc	m ²
	2	Membrure supérieure	m ²
	3	Tirant	m
	4	Suspente/Montant	m
	5	Diagonale	m
	6	Assemblage	unité
H - Arc à tympan rigide	1	Tympan	m ²
	2	Fondation	-
	3	Voûte	m ²
I - Pont suspendu	1	Massif d'ancrage	-
	2	Chambre d'épanouissement des câbles	m
	3	Câble porteur et accessoires	unité
	4	Suspente et accessoires	unité
	5	Bras d'articulation	unité
	6	Butoir	unité
	7	Stabilisateurs transversaux	unité
J - Pont à haubans	1	Hauban et accessoires	unité
	2	Sabot d'attache des torons	unité
	3	Bras d'articulation	unité

Tableau A.24 - Liste des coûts de remplacements des éléments d'un pont (MTQ 2015) (suite)

GROUPE	N°	ÉLÉMENT	UNITÉ DE MESURE
K - Pont couvert	1	Tirant	unité
	2	Lambris	m ²
	3	Toiture	m ²
L - Structure de tablier	1	Entretoise	m ²
	2	Longeron	m ²
M - Contreventement	1	Contreventement	unité
	2	Portique d'extrémité	unité
	3	Diaphragme	unité
N - Joint	1	Élément en élastomère	m
	2	Épaulement	m
	3	Autres éléments	m
O - Chasse-roues/trottoir	1	Trottoir	m ²
	2	Chasse-roues	m
	3	Bande médiane	m
P - Dispositif de retenue	1	Glissière (gauche ou droite)	m
	2	Glissière médiane	m
	3	Garde-fou	m
Q - Protection de la corrosion	1	Acier structural - unités de fondation	m ²
	2	Acier structural - tablier	m ²
	3	Acier structure - poutre triangulée/Arc	m ²
R - Approche	1	Transition de chaussée	-
	2	Système de drainage	-
	3	Glissière	m
	4	Escalier	unité
	-	Passerelle d'inspection	-
	-	Dalle de transition	-

Tableau A.24 - Liste des coûts de remplacements des éléments d'un pont (MTQ 2015) (suite)

GROUPE	N°	ÉLÉMENT	UNITÉ DE MESURE
S - Ponceau	1	Mur de tête	m ²
	2	Mur en aile	m ²
	3	Mur parafouille	-
	4	Défecteur et/ou piège à débris	-
	5	Fondation	-
	6	Radier	m ²
	7	Mur/Naissance de voûte/Coin inférieur	m
	8	Dessous dalle/Voûte	m
T - Mur de soutènement	1	Fondation	-
	2	Mur	m ²
U - Autres types de mur	1	Fondation	-
	2	Mur	m ²

ANNEXE B : COMPLÉMENT SUR LES PARAMÈTRES DU MODÈLE

B.1 Données sur le parc automobile québécois

Tableau B.1 - Données sur le parc automobile québécois de 1987 à 2013 (SAAQ 2015)

ANNÉE	PERMIS DE CONDUIRE	VOITURE
1987	3 771 792	3 649 979
1988	3 870 000	3 765 173
1989	3 946 954	3 884 080
1990	4 032 971	3 964 739
1991	4 092 368	4 041 617
1992	4 111 226	4 106 324
1993	4 158 972	4 165 890
1994	4 212 592	4 228 182
1995	4 271 347	4 275 429
1996	4 328 075	4 341 168
1997	4 366 009	4 407 517
1998	4 402 692	4 496 376
1999	4 447 439	4 580 657
2000	4 496 997	4 660 947
2001	4 545 461	4 762 691
2002	4 599 815	4 881 265
2003	4 655 612	5 063 449
2004	4 724 710	5 203 491
2005	4 777 429	5 306 534
2006	4 841 176	5 402 353
2007	4 909 380	5 539 013
2008	4 973 573	5 665 272
2009	5 027 848	5 778 947
2010	5 105 623	5 913 950
2011	5 156 353	5 985 463
2012	5 194 760	6 082 303
2013	5 241 846	6 191 286

ANNEXE C : CODE INFORMATIQUE

C.1 Valeurs financières

C.1.1 Inflation générale déterministe

```
function [inf_gen,inf_gen_cumul,inf_erreur] = Inflation_generale(nbr_sim, vie_max, inf_gen_ini,
freq_ann)
% Cette fonction génère l'inflation générale sur la période voulue

% Paramètres si la fonction n'est pas appelée
% clear
% clc

% nbr_sim = 20000; % Nombre de simulations
% vie_max = 100; % Durée de vie maximale
% inf_gen_ini = 0.017; % Valeur initiale pour le modèle
% freq_ann = 4; % Fréquence du modèle (trimestriel)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Création des matrices pour le modèle

inf_gen_trim = zeros(nbr_sim,vie_max*freq_ann);
%Matrice pour les taux d'inflation trimestriel annualisés
inf_gen_trim(:,freq_ann+1:vie_max*freq_ann) = inf_gen_ini;

inf_gen = zeros(nbr_sim,vie_max);
%Matrice pour les taux d'inflation annuel
inf_gen(:,2:vie_max) = ((1+(inf_gen_ini/freq_ann))^freq_ann)-1;

inf_gen_cumul = zeros(nbr_sim,vie_max);
%Matrice pour les taux d'inflation cumulatif
for simulation = 1 : nbr_sim
    for colonne = 2:vie_max
        inf_gen_cumul(simulation,colonne) = ((inf_gen(simulation,colonne) + 1)*
(1+inf_gen_cumul(simulation,colonne-1)))-1);
        %Inflation cumulée
    end
end
end
```

C.1.2 Inflation générale stochastique

```
function [inf_gen,inf_gen_cumul,inf_erreur] = Inflation_generale(nbr_sim, vie_max, inf_gen_ini,
phi_inf, psy_inf, mu_inf, sigma_inf, freq_ann)
% Cette fonction génère l'inflation générale sur la période voulue
```

```

%%Paramètres si la fonction n'est pas appelée
% clear
% clc
%
% nbr_sim = 20000; % Nombre de simulations
% vie_max = 100; % Durée de vie maximale
% inf_gen_ini = 0.017; % valeur initiale pour le modèle
% phi_inf = 0.1; % phi
% psy_inf = 0.017; % psy
% mu_inf = 0; % mu
% sigma_inf = sqrt(0.0150)/100; % sigma
% freq_ann = 4; % Fréquence du modèle (trimestriel)

%Calcul de la matrice de corrélation à l'aide d'une décomposition de
%Cholesky
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
A=[1,0.991960037,-0.141288833;0.991960037,1,-0.067354114;-0.141288833,-0.067354114,1];

R=chol(A,'Lower');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Création des matrices pour le modèle

inf_gen_trim = zeros(nbr_sim,vie_max*freq_ann);
%Matrice pour les taux d'inflation trimestriel annualisés
inf_gen_trim(:,freq_ann+1) = inf_gen_ini;
%Le premier trimestre de l'année 1 est indexée au taux initial

inf_gen = zeros(nbr_sim,vie_max);
%Matrice pour les taux d'inflation annuel

inf_gen_cumul = zeros(nbr_sim,vie_max);
%Matrice pour les taux d'inflation cumulatif

inf_erreur = zeros(nbr_sim,vie_max*freq_ann);
%Matrice du terme d'erreur
inf_erreur(:,1:5) = 0;
%Aucune erreur à ajouter aux 5 premiers trimestres
inf_erreur = sigma_inf*randn(nbr_sim, vie_max*freq_ann);
%Création d'une matrice de valeur de loi normale(0, sigma^2)

%Génération des taux d'inflation selon le modèle, un matrice pour les
%taux cumulés est aussi générées pour simplifier

for simulation = 1 : nbr_sim
    for colonne = freq_ann+2 : vie_max*freq_ann
        inf_gen_trim(simulation,colonne) = inf_gen_trim(simulation,colonne-1)+(psy_inf-
inf_gen_trim(simulation,colonne-1))*phi_inf+ R(1,1)*inf_erreur(simulation,colonne);
        %Inflation trimestrielle
    end

    for colonne = 2:vie_max
        inf_gen(simulation, colonne) = ((1+inf_gen_trim(simulation,colonne*freq_ann-

```

```

3)/4)*(1+inf_gen_trim(simulation,colonne*freq_ann-2)/4)
*(1+inf_gen_trim(simulation,colonne*freq_ann-1)/4)
*(1+inf_gen_trim(simulation,colonne*freq_ann)/4))-1;
    %Inflation annuelle
    inf_gen_cumul(simulation,colonne) = ((inf_gen(simulation,colonne) + 1)*
(1+inf_gen_cumul(simulation,colonne-1))-1);
    %Inflation cumulée
end

end

```

C.1.3 Inflation des matériaux et de la main-d'œuvre déterministe

```

function [inf_mat,inf_mat_cumul,inf_mat_erreur] = Inflation_materiau(nbr_sim, vie_max,
inf_mat_ini, freq_ann)
%Cette fonction génère l'inflation générale sur la période voulue

%Paramètres si la fonction n'est pas appelée
% clear
% clc

% nbr_sim      = 20000;          % Nombre de simulations
% vie_max      = 100;           % Durée de vie maximale
% inf_mat_ini  = 0.032;         % valeur initiale pour le modèle
% freq_ann    = 4;              % Fréquence du modèle (trimestrielle)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Création des matrices pour le modèle
inf_mat_trim      = zeros(nbr_sim,vie_max*freq_ann);
%Matrice pour les taux d'inflation trimestriel annualisés
inf_mat_trim(:,freq_ann+1:vie_max*freq_ann) = inf_mat_ini;
%Le premier trimestre de l'année 1 est indexée au taux initial

inf_mat           = zeros(nbr_sim,vie_max);
%Matrice pour les taux d'inflation annuel
inf_mat(:,2:vie_max) = ((1+inf_mat_ini/freq_ann)^freq_ann)-1;

inf_mat_cumul     = zeros(nbr_sim,vie_max);
%Matrice pour les taux d'inflation cumulatif
for simulation = 1 : nbr_sim
    for colonne = 2:vie_max
        inf_mat_cumul(simulation,colonne) = ((inf_mat(simulation,colonne) + 1)*
(1+inf_mat_cumul(simulation,colonne-1))-1);
        %Inflation cumulée
    end
end
end

```

C.1.4 Inflation des matériaux et de la main-d'œuvre stochastique

```
function [inf_mat,inf_mat_cumul,inf_mat_erreur] = Inflation_materiau(nbr_sim, vie_max,
inf_mat_ini, phi_mat, psy_mat, mu_mat, sigma_mat, inf_erreur, R)
%Cette fonction génère l'inflation générale sur la période voulue

%Paramètres si la fonction n'est pas appelée
% clear
% clc
%
% nbr_sim      = 20000;      % Nombre de simulations
% vie_max      = 100;      % Durée de vie maximale
% inf_mat_ini  = 0.032;     % Valeur initiale pour le modèle
% phi_mat      = 0.1;      % phi
% psy_mat      = 0.032;     % psy
% mu_mat       = 0;        % mu
% sigma_mat    = sqrt(0.08)/100; % sigma
% freq_ann     = 4;        % Fréquence du modèle (trimestrielle)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Création des matrices pour le modèle

inf_mat_trim      = zeros(nbr_sim,vie_max*freq_ann);
%Matrice pour les taux d'inflation trimestriel annualisés
inf_mat_trim(:,freq_ann+1)      = inf_mat_ini;
%Le premier trimestre de l'année 1 est indexée au taux initial

inf_mat           = zeros(nbr_sim,vie_max);
%Matrice pour les taux d'inflation annuel

inf_mat_cumul     = zeros(nbr_sim,vie_max);
%Matrice pour les taux d'inflation cumulatif

inf_mat_erreur    = zeros(nbr_sim,vie_max*freq_ann);
%Matrice du terme d'erreur
inf_mat_erreur    = sigma_mat*randn(nbr_sim, vie_max*freq_ann);
%Création d'une matrice de valeur de loi normale(0, sigma^2)
inf_mat_erreur(:,1:5)      = 0;
%Aucune erreur à ajouter aux 5 premiers trimestres

%Génération des taux d'inflation selon le modèle, un matrice pour les
%taux cumulés est aussi générées pour simplifier
for simulation = 1 : nbr_sim
    for colonne = freq_ann+2 : vie_max*freq_ann
        inf_mat_trim(simulation,colonne) = inf_mat_trim(simulation,colonne-1)+(psy_mat-
inf_mat_trim(simulation,colonne-1))*phi_mat+ R(2,2)*inf_mat_erreur(simulation,colonne) +
R(2,1)*inf_erreur(simulation,colonne);
        %Inflation trimestrielle
    end

    for colonne = 2:vie_max
        inf_mat(simulation, colonne) = ((1+inf_mat_trim(simulation,colonne*freq_ann-
```

```

3)/4)*(1+inf_mat_trim(simulation,colonne*freq_ann-2)/4)
*(1+inf_mat_trim(simulation,colonne*freq_ann-1)/4)
*(1+inf_mat_trim(simulation,colonne*freq_ann)/4))-1;
    %Inflation annuelle
    inf_mat_cumul(simulation,colonne) = ((inf_mat(simulation,colonne) + 1)*
(1+inf_mat_cumul(simulation,colonne-1))-1);
    %Inflation cumulée
end

end

```

C.1.5 Taux d'intérêt ajusté au risque déterministe

```

function [interet,interet_cumul,interet_erreur,interet_sansrisk] = Taux_interet(nbr_sim, vie_max,
interet_sansrisk_ini, prime_risk, freq_ann,)
%Cette fonction génère le taux d'intérêt sur la période voulue

%Paramètres si la fonction n'est pas appelée
% clear
% clc

% nbr_sim      = 20000;      % Nombre de simulations
% vie_max      = 100;       % Durée de vie maximale
% interet_sansrisk_ini = 0.035; % Valeur initiale pour le modèle
% freq_ann     = 4;         % Fréquence des données (Trimestriel)
% prime_risk   = 0.02;      % Prime de risque
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Création des matrices pour le modèle

int_sansrisk_trim = zeros(nbr_sim,vie_max*freq_ann);
%Matrice pour les taux d'intérêt sans risque trimestriel annualisés
int_sansrisk_trim(:,freq_ann+1:vie_max*freq_ann) = interet_sansrisk_ini;
%Le premier trimestre de l'année 1 est actualisé au taux initial

interet = zeros(nbr_sim,vie_max);
%Matrice pour les taux d'intérêt annuel
interet(:,2:vie_max) = ((1+interet_sansrisk_ini/freq_ann)^freq_ann)-1+prime_risk;

interet_cumul = zeros(nbr_sim,vie_max);
%Matrice pour les taux d'intérêt cumulatif
for simulation = 1 : nbr_sim
    for colonne = 2 : vie_max
        interet_cumul(simulation,colonne) = ((interet(simulation,colonne) + 1)*
(1+interet_cumul(simulation,colonne-1))-1);
        %intérêt cumulé avec risque
    end
end
end

```

C.1.6 Taux d'intérêt ajusté au risque stochastique

```
function [interet,interet_cumul,interet_erreur,interet_sansrisk] = Taux_interet(nbr_sim, vie_max,
freq_rep, freq_deg, alpha_int, beta_int, sigma_int, mu_int, gamma_int, R)
%Cette fonction génère le taux d'intérêt sur la période voulue

%Paramètres si la fonction n'est pas appelée
% clear
% clc

% nbr_sim      = 20000;      % Nombre de simulations
% vie_max      = 100;       % Durée de vie maximale
% interet_sansrisk_ini = 0.035; % Valeur initiale pour le modèle
% alpha_int    = 0.00135;   % alpha
% beta_int     = -0.0395;   % beta
% gamma_int    = 0.1946;    % gamma
% mu_int       = 0;         % mu
% sigma_int    = 0.003585;  % sigma
% freq_ann     = 4;         % Fréquence des données (Trimestriel)
% prime_risk   = 0.02;     % Prime de risque
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Création des matrices pour le modèle

int_sansrisk_trim = zeros(nbr_sim,vie_max*freq_ann);
%Matrice pour les taux d'intérêt sans risque trimestriel annualisés
int_sansrisk_trim(:,freq_ann+1) = interet_sansrisk_ini;
%Le premier trimestre de l'année 1 est actualisé au taux initial

interet = zeros(nbr_sim,vie_max);
%Matrice pour les taux d'intérêt annuel

interet_cumul = zeros(nbr_sim,vie_max);
%Matrice pour les taux d'intérêt cumulatif

interet_erreur = zeros(nbr_sim,vie_max*freq_ann);
%Matrice du terme d'erreur
interet_erreur = sigma_int*randn(nbr_sim, vie_max*freq_ann)+mu_int;
%Création d'un Processus Wiener(0,sigma^2)
interet_erreur(:,1:5) = 0;
%Aucune erreur à ajouter au 5 premier trimestre

%Génération des taux d'inflation selon le modèle, un matrice pour les
%taux cumulés est aussi générées pour simplifier
for simulation = 1 : nbr_sim
for colonne = freq_ann+2 : vie_max*freq_ann
int_sansrisk_trim(simulation,colonne) = int_sansrisk_trim(simulation,colonne-
1)+(alpha_int+beta_int*int_sansrisk_trim(simulation,colonne-1)) +
(R(3,3)*((int_sansrisk_trim(simulation,colonne-
1))^(gamma_int))*inf_erreur(simulation,colonne))+R(3,2)*inf_mat_erreur(simulation,colonne))+R(3
,1)*interet_erreur(simulation,colonne));
%Intérêt trimestriel sans risque
```

```

end

    for colonne = 2:vie_max
        interet(simulation, colonne) = ((1+int_sansrisk_trim(simulation,colonne*freq_ann-
3)/4)*(1+int_sansrisk_trim(simulation,colonne*freq_ann-2)/4)
*(1+int_sansrisk_trim(simulation,colonne*freq_ann-1)/4)
*(1+int_sansrisk_trim(simulation,colonne*freq_ann)/4))-1+prime_risk;
        %intérêt annuel avec risque
        interet_cumul(simulation,colonne) = ((interet(simulation,colonne) + 1)*
(1+interet_cumul(simulation,colonne-1))-1);
        %intérêt cumulé avec risque
    end
end
end

```

C.2 Débit journalier moyen annualisé

C.2.1 Débit journalier moyen annualisé déterministe

```

function [djma] = DJMA(nbr_sim, vie_max, djma_ini, mu_djma)
% Cette fonction génère le taux d'intérêt sur la période voulue

% Paramètre si la fonction n'est pas appelée
% clear
% clc

% Valeurs pour l'étude

% nbr_sim      = 20000;          % Nombre de simulations
% vie_max      = 100;           % Durée de vie maximale
% djma_ini     = 10000;         % Utilisation initiale
% mu_djma      = 0.01;          % moyenne d'évolution du djma
% djma_max     = 20000;         % DJMA maximale
% %%%%%%%%%

% Simulation des taux d'augmentation
djma          = zeros(nbr_sim,vie_max);
% Matrice pour les djma
augmentation  = zeros(nbr_sim,vie_max);
augmentation(:,2:vie_max) = mu_djma;
%Matrice des taux d'augmentation N(1%,0.0032)
djma(:,1)     = djma_ini;
% Valeurs initiales

% Calcul des DJMA
for simulation = 1:nbr_sim
    for annee = 2:vie_max
        djma(simulation, annee) = min(djma(simulation, annee-1)*(1+augmentation(simulation, annee)),
djma_max);
        %djma_t = min(djma_t-1 * 1+augmentation; djma_max)
    end
end

```

```

end
end

```

C.2.2 Débit journalier moyen annualisé stochastique

```

function [djma] = DJMA(nbr_sim, vie_max, djma_ini, mu_djma, sigma_djma)
% Cette fonction génère le taux d'intérêt sur la période voulue

% Paramètre si la fonction n'est pas appelée
% clear
% clc

% Valeurs pour l'étude

% nbr_sim      = 20000;          % Nombre de simulations
% vie_max      = 100;           % Durée de vie maximale
% djma_ini     = 10000;         % Utilisation initiale
% mu_djma      = 0.01;          % moyenne d'évolution du djma
% sigma_djma   = 0.0032;        % Ecart type d'évolution du djma
% djma_max     = 20000;         % DJMA maximale
% %%%

% Simulation des taux d'augmentation
djma      = zeros(nbr_sim,vie_max);
% Matrice pour les djma
augmentation = sigma_djma*(randn(nbr_sim,vie_max))+mu_djma;
%Matrice des taux d'augmentation N(1%,0.0032)
djma(:,1) = djma_ini;
% Valeurs initiales
augmentation(:,1) = 0;
% Retirer l'augmentation initiale

% Calcul des DJMA
for simulation = 1:nbr_sim
    for annee = 2:vie_max
        djma(simulation, annee) = min(djma(simulation, annee-1)*(1+augmentation(simulation, annee)),
djma_max);
        %djma_t = min(djma_t-1 * 1+augmentation; djma_max)
    end
end
end

```

C.3 Détérioration des éléments

C.3.1 Détérioration déterministe de la dalle

```

function [val_res,Etat,pen_etat] = degradation_det(nbr_sim, vie_max, freq_rep, freq_deg,
etat_init, etat_rep, transition_matrix, val_residuel, cout_unit, quantite)
% Calcul des états, valeurs résiduels et pénalité d'état

```

```

% selon une dégradation à l'aide d'une matrice de
% transition déterministe

%Paramètres si la fonction n'est pas appelée

% clear
% clc
%
% nbr_sim = 20000; % Nombre de simulations
% vie_max = 100; % Durée de vie maximale
% freq_rep = 5; % fréquence de réparation possible
% freq_deg = 5; % fréquence de dégradation
% etat_init = [1,0,0,0]; % Répartition initiale de l'infrastructure
% etat_rep = [1,0,0,0]; % Répartition dans lequel se retrouve l'infrastructure après la
réparation
%
% transition_matrix = [0.84,0.16,0, 0;... % Matrice de transition (carrée)
% 0,0.71,0.29,0;... % Nbr_etat max = 9
% 0,0,0.5,0.5;...
% 0,0,0,1];
%
% val_residuel = [1,0.3,0.15,0]; % Valeur résiduelle pour chaque état
% dep_etat = [1,0.9,0.8,0]; % Paramètres de pénalité d'état

%Données initiales

nbr_etat = length(transition_matrix);
% Nombre d'états
nbr_scen = floor(vie_max/freq_rep)-1;
% Nombre de scénario de réparation
% (Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg = floor(vie_max/freq_deg);
% Nombre de dégradation
% %%%

Etat = zeros(nbr_sim*nbr_etat*nbr_scen,vie_max);
% Matrice de la répartition des états avec réparation
% (Chaque simulation a nbr_etat (nbr d'états) lignes, 1 aucune réparation)

for simulation = 1:nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen
        for etat = 1:nbr_etat
            Etat((simulation-1)*(nbr_scen*nbr_etat)+(scenario-1)*nbr_etat+etat,1:freq_deg) =
etat_init(etat);
            % État initiaux affectés (Chaque ligne d'un scénario représente le % dans chaque état)
        end
    end
end

val_res = zeros(nbr_sim*nbr_scen,vie_max);
% Matrice de la valeur résiduel en pourcentage

precedent = zeros(nbr_etat,1);
nouveau = zeros(1,nbr_etat);

```

```

% Variables pour stocker le dernier état et le nouvel

% Création des simulations sans réparation (la première ligne de scénario)
% Selon la dernière répartition connue, la nouvelle est créée
for simulation = 1 : nbr_sim
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg : (vie_max - 1)
        precedent = Etat((simulation-1)*(nbr_scen*nbr_etat)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen*nbr_etat)+nbr_etat,annee-1);
        nouveau = transpose(precedent)*transition_matrix;
        for latence = 0:freq_deg-1
            Etat((simulation-1)*(nbr_scen*nbr_etat)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen*nbr_etat)+nbr_etat,annee+latence) = transpose(nouveau);
        end
    end
end

% Scénarios de réparation, pour les lignes 2 jusqu'au nombre de scénario,
% les différents scénarios de détérioration sont évalués. La remise à neuf
% se fait sur le délai de dégradation. Donc si par exemple, les deux
% fréquences sont à 5 ans, un réparation à 10 ans signifie que les coûts
% sont déboursés à 10 ans et que le pont revient à 1 à l'année 15. (Cela
% peut aussi être modifié)
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen
        Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+1:(simulation-
1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+nbr_etat,1:(scenario)*freq_rep) = Etat((simulation-
1)*nbr_scen*nbr_etat+1:(simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+nbr_etat,1:(scenario)*freq_rep);
%Détérioration identique à aucune réparation jusqu'à la réparation
        for latence = 1:freq_deg
            Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+1:(simulation-
1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+nbr_etat,(scenario)*freq_rep+latence) =
transpose(etat_rep); %État initiale la période suivant la réparation
        end
        for annee = (scenario*freq_rep + freq_deg + 1) : freq_deg : vie_max
            precedent = Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+1:(simulation-
1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+nbr_etat,annee-1);
            nouveau = transpose(precedent)*transition_matrix;
            for latence = 0:freq_deg-1
                Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+1:(simulation-
1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+nbr_etat,annee+latence) = transpose(nouveau);
            end
        end
    end
end

% Transformation en valeur résiduelle
% Création de la matrice de pénalité d'état
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen
        for annee = 1 : vie_max
            val_res_tempo = 0;
            pen_etat_tempo = 0;
            for etat = 1:nbr_etat
                val_res_tempo = val_res_tempo + Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-

```

```

1)*nbr_etat+etat,annee) * val_residuel(etat);
    pen_etat_tempo = pen_etat_tempo + Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-
1)*nbr_etat+etat,annee) * dep_etat(etat);
    end
    val_res((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee) = val_res_tempo;
    pen_etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee) = pen_etat_tempo;
    end
end
end
end

```

C.3.2 Détérioration markovienne de la dalle

```

function [Etat,val_res,pen_etat] = Degradation(nbr_sim, vie_max, freq_rep, freq_deg, etat_init,
etat_rep, transition_matrix, val_residuel)
% Fonction qui permet de simuler la dégradation d'une infrastructure à
% l'aide d'un processus de Markov
% Les sortants de cette fonction sont une matrice d'état, une matrice de
% valeurs résiduels et une matrice de pénalité d'état
% ***La colonne des matrices représentent l'année + 1 (car l'année 0 est
% dans la colonne 1, puisque qu'il est physiquement impossible d'avoir une
% colonne 0)

%Paramètres si la fonction n'est pas appelée
% clear
% clc

% nbr_sim    = 20000;    % Nombre de simulations
% vie_max    = 100;     % Durée de vie maximale
% freq_rep   = 5;       % fréquence de réparation possible
% freq_deg   = 5;       % fréquence de dégradation
% etat_init  = 1;       % état initiale de l'infrastructure
% etat_rep   = 1;       % état dans lequel se retrouve l'infrastructure après la réparation

% transition_matrix = [0.84,0.16,0, 0;... % Matrice de transition (carrée)
%                      0,0.71,0.29,0,;... % Nbr_etat max = 9
%                      0,0,0.50,0.50;...
%                      0,0,0,1];

% val_residuel = [1,0.3,0.15,0]; % valeur résiduelle en fonction de l'état
% dep_etat     = [1,0.9,0.8,0];  % Pénalité de revenu en fonction de l'état

% Données initiales

nbr_etat = length(transition_matrix);
% Nombre d'états
nbr_scen = floor(vie_max/freq_rep)-1;
% Nombre de scénario de réparation (Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg  = floor(vie_max/freq_deg);
% Nombre de dégradation
% %%%

```

```

% Création des matrices pour stocker les données

Etat = zeros(nbr_sim*nr_scen,vie_max);
% Matrice des états avec scénarios de réparation (Chaque simulation a Nbr_scen ligne)
Etat(:,1:freq_deg) = etat_init;
% L'état initial est affecté à la première fréquence de réparation
val_res = zeros(nbr_sim*nr_scen,vie_max);
% Matrice de la valeur résiduel en pourcentage
pen_etat = zeros(nbr_sim*nr_scen,vie_max);
% Matrice de la de pénalité en fonction de l'état (pour le revenu)
deg_alea = zeros(nbr_sim,vie_max);
% Matrice de variables aléatoires pour la dégradation entre les fréq, 0, donc reste dans l'état

% Variables aléatoire pour déterminer le chemin dans la matrice
for simulation = 1 : nr_sim
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg :(vie_max - 1)
        deg_alea(simulation, annee) = rand();
        % Matrice de V.A. entre 0 et 1 pour produire la dégradation,
        % ce nombre est le même, qu'il y ait réparation ou non,
        % cela pourrait être changé
    end
end

% Création des simulations sans réparation (la première ligne de scénario)
% Selon le dernier état connu et la variable aléatoire précédente, un
% nouvel état est créé à chaque période. Créer pour un maximum de 9 états
for simulation = 1 : nr_sim
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg :(vie_max - 1)
        precedent = Etat((simulation-1)*nr_scen+1,annee-1);
        for etat = 1:nr_etat
            if precedent == etat
                if deg_alea(simulation,annee) < transition_matrix(etat, 1)
                    Etat((simulation-1)*nr_scen+1,annee:annee+freq_deg -1) = 1;
                elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2))
                    Etat((simulation-1)*nr_scen+1,annee:annee+freq_deg -1) = 2;
                elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3))
                    Etat((simulation-1)*nr_scen+1,annee:annee+freq_deg -1) = 3;
                elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3)+transition_matrix(etat, 4))
                    Etat((simulation-1)*nr_scen+1,annee:annee+freq_deg -1) = 4;
                elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3)+transition_matrix(etat,
4)+transition_matrix(etat, 5))
                    Etat((simulation-1)*nr_scen+1,annee:annee+freq_deg -1) = 5;
                elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3)+transition_matrix(etat,
4)+transition_matrix(etat, 5)+transition_matrix(etat, 6))
                    Etat((simulation-1)*nr_scen+1,annee:annee+freq_deg -1) = 6;
                elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3)+transition_matrix(etat,
4)+transition_matrix(etat, 5)+transition_matrix(etat, 6)+transition_matrix(etat, 7))

```

```

        Etat((simulation-1)*nbr_scen+1,annee:annee+freq_deg -1) = 7;
    elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3)+transition_matrix(etat,
4)+transition_matrix(etat, 5)+transition_matrix(etat, 6)+transition_matrix(etat,
7)+transition_matrix(etat, 8))
        Etat((simulation-1)*nbr_scen+1,annee:annee+freq_deg -1) = 8;
    else
        Etat((simulation-1)*nbr_scen+1,annee:annee+freq_deg -1) = 9;
    end
end
end
end
end

% Scénarios de réparation, pour les lignes 2 jusqu'au nombre de scénario,
% les différents scénarios de détérioration sont évalués. La remise à neuf
% se fait sur le délai de dégradation. Donc si par exemple, les deux
% fréquences sont à 5 ans, un réparation à 10 ans signifie que les coûts
% sont déboursés à 10 ans et que le pont revient à 1 à l'année 15. (Cela
% peut aussi être modifié)
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen
        Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,1:(scenario)*freq_deg) = Etat((simulation-
1)*nbr_scen+1,1:(scenario)*freq_deg);
        if Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,(scenario)*freq_deg) == 1
            Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,(scenario)*freq_deg+1:vie_max) = Etat((simulation-
1)*nbr_scen+1,(scenario)*freq_deg+1:vie_max);
            Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,vie_max+1) = 0;
        else
            Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,(scenario)*freq_deg+1:(scenario)*freq_deg+freq_deg)
= etat_rep;
            % La période de dégradation suivante du scénario est remise à l'état initial
            Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,vie_max+1) = 1;
            for annee = (scenario)*freq_deg+freq_deg+1 : freq_deg :(vie_max - 1)
                precedent = Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee-1);
                for etat = 1:nbr_etat
                    if precedent == etat
                        if deg_alea(simulation,annee) < transition_matrix(etat, 1)
                            Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 1;
                        elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2))
                            Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 2;
                        elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3))
                            Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 3;
                        elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3)+transition_matrix(etat, 4))
                            Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 4;
                        elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3)+transition_matrix(etat,
4)+transition_matrix(etat, 5))
                            Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 5;
                        elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3)+transition_matrix(etat,

```

```

4)+transition_matrix(etat, 5)+transition_matrix(etat, 6))
    Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 6;
    elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3)+transition_matrix(etat,
4)+transition_matrix(etat, 5)+transition_matrix(etat, 6)+transition_matrix(etat, 7))
    Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 7;
    elseif deg_alea(simulation,annee) < (transition_matrix(etat,
1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3)+transition_matrix(etat,
4)+transition_matrix(etat, 5)+transition_matrix(etat, 6)+transition_matrix(etat,
7)+transition_matrix(etat, 8))
    Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 8;
    else
    Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 9;
    end
    end
    end
    end
    end
end

% Transformation en valeur résiduelle et de la pénalité d'état
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen
        for annee = 1 : vie_max
            pen_etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee) = dep_etat(Etat((simulation-
1)*nbr_scen+scenario,annee));
            val_res((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee) = val_residue1(Etat((simulation-
1)*nbr_scen+scenario,annee));
        end
    end
end
end

```

C.3.3 Détérioration markovienne de la dalle avec 2 réparations

```

function [Etat,val_res,pen_etat] = deterioration_mark(nbr_sim, vie_max, freq_rep, freq_deg,
etat_init, etat_rep, transition_matrix, val_residue1)
% Fonction qui permet de simuler la dégradation d'une infrastructure à
% l'aide d'un processus de Markov
% Les sortants de cette fonction sont une matrice d'état, une matrice de
% valeurs résiduels et une matrice de pénalité d'état
% ***La colonne des matrices représentent l'année + 1 (car l'année 0 est
% dans la colonne 1, puisque qu'il est physiquement impossible d'avoir une
% colonne 0)

%Paramètres si la fonction n'est pas appelée
% clear
% clc

% nbr_sim    = 1000;    % Nombre de simulations
% vie_max    = 100;    % Durée de vie maximale

```

```

% freq_rep = 5; % fréquence de réparation possible
% freq_deg = 5; % fréquence de dégradation
% etat_init = 1; % état initiale de l'infrastructure
% etat_rep = 1; % état dans lequel se retrouve l'infrastructure après la réparation
%
% transition_matrix = [0.84,0.16,0, 0;... % Matrice de transition (carrée)
% 0,0.71,0.29,0;... % Nbr_etat max = 9
% 0,0,0.50,0.50;...
% 0,0,0,1];
%
% val_residuel = [1,0.3,0.15,0]; % valeur résiduelle en fonction de l'état
% dep_etat = [1,0.9,0.8,0]; % Pénalité de revenu en fonction de l'état

% Données initiales

nbr_etat = length(transition_matrix);
% Nombre d'états
nbr_scen_1 = 19;
nbr_scen_2 = 155;
% Nombre de scénario de réparation (Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg = floor(vie_max/freq_deg);
% Nombre de dégradation

% %%%%%%%%%%%

% Création des matrices pour stocker les données

Etat_2 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_2,vie_max);
% Matrice des états avec scénarios de réparation (Chaque simulation a Nbr_scen ligne)
Etat_2(:,1:freq_deg) = etat_init;
% L'état initiale est affecté à la première fréquence de réparation
val_res = zeros(nbr_sim*nbr_scen_2,vie_max);
% Matrice de la valeur résiduel en pourcentage
pen_etat = zeros(nbr_sim*nbr_scen_2,vie_max);
% Matrice de la de pénalité en fonction de l'état (pour le revenu)
deg_alea = zeros(nbr_sim*nbr_scen_2,vie_max);
% Matrice de variables aléatoires pour la dégradation entre les fréq, 0, donc reste dans l'état

% Variables aléatoire pour déterminer le chemin dans la matrice
for simulation = 1 : nbr_sim *nbr_scen_2
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg :(vie_max - 1)
        deg_alea(simulation, annee) = rand();
        % Matrice de V.A. entre 0 et 1 pour produire la dégradation,
        % ce nombre est le même, qu'il y ait réparation ou non,
        % cela pourrait être changé
    end
end

%Copie des scénarios à aucune réparation et 1 réparation
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen_1
        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,1:vie_max+1) = Etat((simulation-
1)*nbr_scen_1+scenario,1:vie_max+1);
    end
end

```

```

for cas = 1:16
    Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,1:(cas+3)*freq_deg) = Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+2,1:(cas+3)*freq_deg);

    if Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,(cas+3)*freq_deg) == 1
        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,(cas+3)*freq_deg+1:vie_max) =
Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+2,(cas+3)*freq_deg+1:vie_max);
        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,vie_max+1) = 0;
    else
        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,(cas+3)*freq_deg+1:(cas+3)*freq_deg+freq_deg) = etat_rep;
        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,vie_max+1) = 1;
        for annee = (cas+3)*freq_deg+freq_deg+1 : freq_deg : (vie_max - 1)
            precedent = Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee-1);
            for etat = 1:nbr_etat
                if precedent == etat
                    if deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee) <
transition_matrix(etat, 1)
                        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee:annee+freq_deg -1) = 1;
                    elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2))
                        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee:annee+freq_deg -1) = 2;
                    elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3))
                        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee:annee+freq_deg -1) = 3;
                    elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat,
3)+transition_matrix(etat, 4))
                        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee:annee+freq_deg -1) = 4;
                    elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat,
3)+transition_matrix(etat, 4)+transition_matrix(etat, 5))
                        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee:annee+freq_deg -1) = 5;
                    elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat,
3)+transition_matrix(etat, 4)+transition_matrix(etat, 5)+transition_matrix(etat, 6))
                        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee:annee+freq_deg -1) = 6;
                    elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat,
3)+transition_matrix(etat, 4)+transition_matrix(etat, 5)+transition_matrix(etat,
6)+transition_matrix(etat, 7))
                        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee:annee+freq_deg -1) = 7;
                    elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat,
3)+transition_matrix(etat, 4)+transition_matrix(etat, 5)+transition_matrix(etat,
6)+transition_matrix(etat, 7)+transition_matrix(etat, 8))
                        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee:annee+freq_deg -1) = 8;
                    else
                        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+cas,annee:annee+freq_deg -1) = 9;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end

```

```

end
for scenario = 16:-1:2
    for cas = 1:scenario-1
        n = scenario:16;
        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,1:(cas+(20-
scenario))*freq_deg) = Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+(19-scenario),1:(cas+(20-
scenario))*freq_deg);
        if Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,(cas+(20-scenario))*freq_deg)
== 1
            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,1:vie_max) =
Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+(19-scenario),1:vie_max);
            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,vie_max+1) = 0;
        else
            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,(cas+(20-
scenario))*freq_deg+1:(cas+(20-scenario))*freq_deg+freq_deg) = etat_rep;
            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,vie_max+1) = 1;
            for annee = (cas+(20-scenario))*freq_deg+freq_deg+1 : freq_deg :(vie_max - 1)
                precedent = Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee-1);
                for etat = 1:nbr_etat
                    if precedent == etat
                        if deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee) <
transition_matrix(etat, 1)
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee:annee+freq_deg -1)
= 1;
                        elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee:annee+freq_deg -1)
= 2;
                        elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat, 3))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee:annee+freq_deg -1)
= 3;
                        elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat,
3)+transition_matrix(etat, 4))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee:annee+freq_deg -1)
= 4;
                        elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat,
3)+transition_matrix(etat, 4)+transition_matrix(etat, 5))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee:annee+freq_deg -1)
= 5;
                        elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat,
3)+transition_matrix(etat, 4)+transition_matrix(etat, 5)+transition_matrix(etat, 6))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee:annee+freq_deg -1)
= 6;
                        elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat,
3)+transition_matrix(etat, 4)+transition_matrix(etat, 5)+transition_matrix(etat,
6)+transition_matrix(etat, 7))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee:annee+freq_deg -1)

```

```

= 7;
        elseif deg_alea((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee) <
(transition_matrix(etat, 1)+transition_matrix(etat, 2)+transition_matrix(etat,
3)+transition_matrix(etat, 4)+transition_matrix(etat, 5)+transition_matrix(etat,
6)+transition_matrix(etat, 7)+transition_matrix(etat, 8))
            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee:annee+freq_deg -1)
= 8;
            else
                Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+nbr_scen_1+sum(n)+cas,annee:annee+freq_deg -1)
= 9;
            end
        end
    end
end
end

end
end
end

% Transformation en valeur résiduelle et de la pénalité d'état
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen_2
        for annee = 1 : vie_max
            pen_etat((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee) = dep_etat(Etat_2((simulation-
1)*nbr_scen_2+scenario,annee));
            val_res((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee) = val_residue1(Etat_2((simulation-
1)*nbr_scen_2+scenario,annee));
        end
    end
end
end

```

C.3.4 Détérioration stochastique de la dalle (modèle proposé)

```

function [val_res,Etat,pen_etat] = degradation_det(nbr_sim, vie_max, freq_rep, freq_deg,
etat_init, etat_rep, transition_matrix, val_residue1, cout_unit, quantite, variation)
% Calcul des états, valeurs résiduels et pénalités d'état
% selon une dégradation à l'aide d'une matrice de
% transition déterministe

%Paramètres si la fonction n'est pas appelée

% clear
% clc
% % %
% nbr_sim = 20000; % Nombre de simulations
% vie_max = 100; % Durée de vie maximale
% freq_rep = 5; % fréquence de réparation possible
% freq_deg = 5; % fréquence de dégradation

```

```

% etat_init = [1,0,0,0]; % Répartition initiale de l'infrastructure
% etat_rep = [1,0,0,0]; % Répartition dans lequel se retrouve l'infrastructure après la
réparation
% variation = 5; % Pourcentage de variation maximal de la matrice

transition_matrix = [0.84,0.16,0, 0;... % Matrice de transition (carrée)
                    0,0.71,0.29,0;... % Nbr_etat max = 9
                    0,0,0.5,0.5;...
                    0,0,0,1];

val_residuel = [1,0.3,0.15,0]; % valeur résiduelle pour chaque état
dep_etat = [1,0.9,0.8,0]; % Paramètres de pénalité d'état

%Données initiales

transition_matrix_ini = transition_matrix;
% stocker la matrice initiale pour post-réparation
nbr_etat = length(transition_matrix);
% Nombre d'états
nbr_scen = floor(vie_max/freq_rep)-1;
% Nombre de scénario de réparation
% (Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg = floor(vie_max/freq_deg);
% Nombre de dégradation
matrix_var = zeros(nbr_etat,nbr_etat);
matrix = zeros(nbr_etat,nbr_etat);
for etat = 1 : (nbr_etat-1)
    matrix_var(etat,etat) = (variation/100);
    matrix_var(etat,etat+1) = (-variation/100);
end
% Matrice pour déterminer le min et le max
tolerance = norminv(0.999,0,1);
% Tolérance pour la loi log-normale
% %%%

Etat = zeros(nbr_sim*nbr_etat*nbr_scen,vie_max);
% Matrice de la répartition des états avec réparation
% (Chaque simulation a nbr_etat (nbr d'états) lignes, 1 aucune réparation)

% Variables aléatoire pour déterminer la matrice à utiliser
for simulation = 1 : nbr_sim
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg :(vie_max - 1)
        deg_alea(simulation, annee) = rand();
        % Matrice de V.A. entre 0 et 1 pour produire la dégradation,
        % ce nombre est le même, qu'il y ait réparation ou non,
        % cela pourrait être changé
    end
end

for simulation = 1:nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen
        for etat = 1:nbr_etat
            Etat((simulation-1)*(nbr_scen*nbr_etat)+(scenario-1)*nbr_etat+etat,1:freq_deg) =
            etat_init(etat);

```

```

    % État initiaux affectés (Chaque ligne d'un scénario représente le % dans chaque état)
    end
end
end

val_res = zeros(nbr_sim*nbr_scen,vie_max);
% Matrice de la valeur résiduel en pourcentage

precedent = zeros(nbr_etat,1);
nouveau = zeros(1,nbr_etat);
% Variables pour stocker le dernier état et le nouvel

% Création des simulations sans réparation (la première ligne de scénario)
% Selon la dernière répartition connue, la nouvelle est créée
for simulation = 1 : nbr_sim
transition_matrix = transition_matrix_ini;
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg :(vie_max - 1)

        % valeurs pour faire la détérioration
        transition_matrix_max = transition_matrix + matrix_var;
        transition_matrix_min = transition_matrix - matrix_var;
        precedent = Etat((simulation-1)*(nbr_scen*nbr_etat)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen*nbr_etat)+nbr_etat,annee-1);
        res_prec = val_residuel * precedent;
        res_moy = (transpose(precedent) * transition_matrix) * transpose(val_residuel);
        res_max = (transpose(precedent) * transition_matrix_max) * transpose(val_residuel);
        res_min = (transpose(precedent) * transition_matrix_min) * transpose(val_residuel);

        % Si pont neuf, loi normale
        if precedent(1,1) == 1
            % Calcul des valeurs résiduelles possibles
            mu_det = res_moy;
            sigma_det = (res_moy - res_min)/3;
            % Détérioration réelle avec la valeur aléatoire
            res_reel = norminv(deg_alea(simulation,annee),mu_det,sigma_det);
            % Solveur pour trouver la matrice correspondante
            syms x
            eqn = precedent(1,1) * ((transition_matrix(1,1)+x) * val_residuel(1,1) +
(transition_matrix(1,2)-x) * val_residuel(1,2))+ precedent(2,1) * ((transition_matrix(2,2)+x) *
val_residuel(1,2) + (transition_matrix(2,3)-x) * val_residuel(1,3)) +
precedent(3,1)*((transition_matrix(3,3)+x) * val_residuel(1,3) + (transition_matrix(3,4)-x) *
val_residuel(1,4)) == res_reel;
            modif = vpasolve(eqn, x);
            for etat = 1 : (nbr_etat-1)
                matrix(etat,etat) = modif;
                matrix(etat,etat+1) = -modif;
            end
            transition_matrix = transition_matrix + matrix;
            nouveau = transpose(precedent)*transition_matrix;
            for latence = 0:freq_deg-1
                Etat((simulation-1)*(nbr_scen*nbr_etat)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen*nbr_etat)+nbr_etat,annee+latence) = transpose(nouveau);
            end
        end
    end
end

```

```

else
% Sinon log-normale
% Le *100 permet d'éviter le problème relié à une dégradation de
% moins d'un pourcent
det_moy = (res_prec - res_moy) * 100;
det_max = (res_prec - res_max) * 100;
mu_det_log = log(det_moy*100);
sigma_det_log = (log(det_max*100)-mu_det_log)/(-tolerance) ;
res_reel = res_prec -
(logninv(deg_alea(simulation,annee),mu_det_log,sigma_det_log))/10000;
res_app = res_moy;
% Détermination approx de la matrice car solveur ne marche pas
% toujours en raison de la complexité du modèle
% Précision à 0,0001 ou 0,01%
if (res_reel - res_moy) > 0
    x = 0;
    while abs(res_app - res_reel) > 0.0001
        x = x + 0.000001;
        res_app = precedent(1,1) * ((transition_matrix(1,1)+x) * val_residuel(1,1) +
        (transition_matrix(1,2)-x) * val_residuel(1,2))+ precedent(2,1) * ((transition_matrix(2,2)+x) *
        val_residuel(1,2) + (transition_matrix(2,3)-x) * val_residuel(1,3)) +
        precedent(3,1)*((transition_matrix(3,3)+x) * val_residuel(1,3) + (transition_matrix(3,4)-x) *
        val_residuel(1,4)) ;
    end
    for etat = 1 : (nbr_etat-1)
        matrix(etat,etat) = x;
        matrix(etat,etat+1) = -x;
    end
    transition_matrix = transition_matrix + matrix;
    transition_matrix(1,1) = min(transition_matrix(1,1), (100-variation)/100);
    transition_matrix(1,2) = max(transition_matrix(1,2), variation/100);
    transition_matrix(2,2) = min(transition_matrix(2,2), (100-variation)/100);
    transition_matrix(2,3) = max(transition_matrix(2,3), variation/100);

else
    x = 0;
    while abs(res_app - res_reel) > 0.0001
        x = x + 0.000001;
        res_app = precedent(1,1) * ((transition_matrix(1,1)-x) * val_residuel(1,1) +
        (transition_matrix(1,2)+x) * val_residuel(1,2))+ precedent(2,1) * ((transition_matrix(2,2)-x) *
        val_residuel(1,2) + (transition_matrix(2,3)+x) * val_residuel(1,3)) +
        precedent(3,1)*((transition_matrix(3,3)-x) * val_residuel(1,3) + (transition_matrix(3,4)+x) *
        val_residuel(1,4)) ;
    end
    for etat = 1 : (nbr_etat-1)
        matrix(etat,etat) = -x;
        matrix(etat,etat+1) = x;
    end
    transition_matrix = transition_matrix + matrix;
    transition_matrix(1,1) = min(transition_matrix(1,1), (100-variation)/100);
    transition_matrix(1,2) = max(transition_matrix(1,2), variation/100);
    transition_matrix(2,2) = min(transition_matrix(2,2), (100-variation)/100);
    transition_matrix(2,3) = max(transition_matrix(2,3), variation/100);

```

```

end
end
nouveau = transpose(precedent)*transition_matrix;
for latence = 0:freq_deg-1
Etat((simulation-1)*(nbr_scen*nbr_etat)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen*nbr_etat)+nbr_etat,annee+latence) = transpose(nouveau);
end

end
display(simulation);
end

%% Scénarios de réparation, pour les lignes 2 jusqu'au nombre de scénario,
%% les différents scénarios de détérioration sont évalués. La remise à neuf
%% se fait sur le délai de dégradation. Donc si par exemple, les deux
%% fréquences sont à 5 ans, un réparation à 10 ans signifie que les coûts
%% sont déboursés à 10 ans et que le pont revient à 1 à l'année 15. (Cela
%% peut aussi être modifié)
for simulation = 1 : nbr_sim
for scenario = 2 : nbr_scen
transition_matrix = transition_matrix_ini;
Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+1:(simulation-
1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+nbr_etat,1:(scenario)*freq_rep) = Etat((simulation-
1)*nbr_scen*nbr_etat+1:(simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+nbr_etat,1:(scenario)*freq_rep);
%Dé détérioration identique à aucune réparation jusqu'à la réparation
for latence = 1:freq_deg
Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+1:(simulation-
1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+nbr_etat,(scenario)*freq_rep+latence) =
transpose(etat_rep); %État initiale la période suivant la réparation
end
for annee = (scenario*freq_rep + freq_deg + 1) : freq_deg : vie_max
precedent = Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+1:(simulation-
1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+nbr_etat,annee-1);
transition_matrix_max = transition_matrix + matrix_var;
transition_matrix_min = transition_matrix - matrix_var;
res_prec = val_residuel * precedent;
res_moy = (transpose(precedent) * transition_matrix) * transpose(val_residuel);
res_max = (transpose(precedent) * transition_matrix_max) * transpose(val_residuel);
res_min = (transpose(precedent) * transition_matrix_min) * transpose(val_residuel);
% Si pont neuf, loi normale
if precedent(1,1) == 1
% Calcul des valeurs résiduelles possibles
mu_det = res_moy;
sigma_det = (res_moy - res_min)/3;
res_reel = norminv(deg_alea(simulation,annee),mu_det,sigma_det);
syms y
eqn = precedent(1,1) * ((transition_matrix(1,1)+y) * val_residuel(1,1) +
(transition_matrix(1,2)-y) * val_residuel(1,2))+ precedent(2,1) * ((transition_matrix(2,2)+y) *
val_residuel(1,2) + (transition_matrix(2,3)-y) * val_residuel(1,3)) +
precedent(3,1)*((transition_matrix(3,3)+y) * val_residuel(1,3) + (transition_matrix(3,4)-y) *
val_residuel(1,4)) == res_reel;

```

```

modif = vpasolve(eqn, y);
for etat = 1 : (nbr_etat-1)
    matrix(etat,etat) = modif;
    matrix(etat,etat+1) = -modif;
end
transition_matrix = transition_matrix + matrix;
nouveau = transpose(precedent)*transition_matrix;
for latence = 0:freq_deg-1
    Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+1:(simulation-
1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+nbr_etat,annee+latence) = transpose(nouveau);
end
else
det_moy = (res_prec - res_moy) * 100;
det_max = (res_prec - res_max) * 100;
mu_det_log = log(det_moy*100);
sigma_det_log = (log(det_max*100)-mu_det_log)/(-tolerance) ;
res_reel = res_prec -
(logninv(deg_alea(simulation,annee),mu_det_log,sigma_det_log))/10000;
res_app = res_moy;
% Détermination approx de la matrice car solveur ne marche pas
% toujours en raison de la complexité du modèle
% Précision à 0,0001 ou 0,01%
if (res_reel - res_moy) > 0
    x = 0;
    while abs(res_app - res_reel) > 0.0001
        x = x + 0.000001;
        res_app = precedent(1,1) * ((transition_matrix(1,1)+x) * val_residuel(1,1) +
(transition_matrix(1,2)-x) * val_residuel(1,2))+ precedent(2,1) * ((transition_matrix(2,2)+x) *
val_residuel(1,2) + (transition_matrix(2,3)-x) * val_residuel(1,3)) +
precedent(3,1)*((transition_matrix(3,3)+x) * val_residuel(1,3) + (transition_matrix(3,4)-x) *
val_residuel(1,4)) ;
    end
    for etat = 1 : (nbr_etat-1)
        matrix(etat,etat) = x;
        matrix(etat,etat+1) = -x;
    end
    transition_matrix = transition_matrix + matrix;
    transition_matrix(1,1) = min(transition_matrix(1,1), (100-variation)/100);
    transition_matrix(1,2) = max(transition_matrix(1,2), variation/100);
    transition_matrix(2,2) = min(transition_matrix(2,2), (100-variation)/100);
    transition_matrix(2,3) = max(transition_matrix(2,3), variation/100);

else
    x = 0;
    while abs(res_app - res_reel) > 0.0001
        x = x + 0.000001;
        res_app = precedent(1,1) * ((transition_matrix(1,1)-x) * val_residuel(1,1) +
(transition_matrix(1,2)+x) * val_residuel(1,2))+ precedent(2,1) * ((transition_matrix(2,2)-x) *
val_residuel(1,2) + (transition_matrix(2,3)+x) * val_residuel(1,3)) +
precedent(3,1)*((transition_matrix(3,3)-x) * val_residuel(1,3) + (transition_matrix(3,4)+x) *
val_residuel(1,4)) ;
    end
    for etat = 1 : (nbr_etat-1)
        matrix(etat,etat) = -x;

```

```

        matrix(etat,etat+1) = x;
    end
    transition_matrix = transition_matrix + matrix;
    transition_matrix(1,1) = min(transition_matrix(1,1), (100-variation)/100);
    transition_matrix(1,2) = max(transition_matrix(1,2), variation/100);
    transition_matrix(2,2) = min(transition_matrix(2,2), (100-variation)/100);
    transition_matrix(2,3) = max(transition_matrix(2,3), variation/100);

    end
end

nouveau = transpose(precedent)*transition_matrix;
for latence = 0:freq_deg-1
    Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+1:(simulation-
1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-1)*nbr_etat+nbr_etat,annee+latence) = transpose(nouveau);
end

    end
end
display(simulation);
end

%% Transformation en valeur résiduelle
%% Création de la matrice de pénalité d'état
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen
        for annee = 1 : vie_max
            val_res_tempo = 0;
            pen_etat_tempo = 0;
            for etat = 1:nbr_etat
                val_res_tempo = val_res_tempo + Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-
1)*nbr_etat+etat,annee) * val_residuel(etat);
                pen_etat_tempo = pen_etat_tempo + Etat((simulation-1)*nbr_scen*nbr_etat+(scenario-
1)*nbr_etat+etat,annee) * dep_etat(etat);
            end
            val_res((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee) = val_res_tempo;
            pen_etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee) = pen_etat_tempo;
        end
    end
end
end
end

```

C.3.5 Détérioration déterministe de la dalle et des poutres

```

function [val_res_1, val_res_2, Etat_1, Etat_2, pen_etat] = degradation_det_2ele(nbr_sim,
vie_max, freq_rep_1, freq_rep_2, freq_deg_1, freq_deg_2, etat_init_1, etat_init_2, etat_rep_1,
etat_rep_2, transition_matrix_1, transition_matrix_2, val_residuel_1, val_residuel_2, pen_etat)
% Calcul des états, valeurs résiduels et pénalités d'état
% selon une dégradation à l'aide d'une matrice de
% transition déterministe

%Paramètres si la fonction n'est pas appelée

```

```

% clear
% clc
%
% nbr_sim      = 20000;      % Nombre de simulations
% vie_max      = 100;       % Durée de vie maximale
% freq_rep_1   = 5;         % fréquence de réparation possible
% freq_rep_2   = 5;
% freq_deg_1   = 5;         % fréquence de dégradation
% freq_deg_2   = 5;
% etat_init_1  = [1,0,0,0]; % Répartition initiale de l'infrastructure
% etat_init_2  = [1,0,0,0];
% etat_rep_1   = [1,0,0,0]; % Répartition dans lequel se retrouve l'infrastructure après la
réparation
% etat_rep_2   = [1,0,0,0];
%
% transition_matrix_1 = [0.84,0.16,0, 0;... % Matrice de transition (carrée)
%                        0,0.71,0.29,0;... % Nbr_etat max = 9
%                        0,0,0.5,0.5;...
%                        0,0,0,1];
% transition_matrix_2 = [0.91,0.09,0, 0;... % Matrice de transition (carrée)
%                        0,0.87,0.13,0;... % Nbr_etat max = 9
%                        0,0,0.71,0.29;...
%                        0,0,0,1];
%
% val_residuel_1 = [1,0.3,0.15,0]; % valeur résiduelle pour chaque état
% val_residuel_2 = [1,0.3,0.15,0]; % valeur résiduelle pour chaque état
% dep_etat      = [1,0.9,0.8,0]; % Paramètres de pénalité d'état

%Données initiales

nbr_etat_1 = length(transition_matrix_1);
nbr_etat_2 = length(transition_matrix_2);
% Nombre d'états
nbr_scen_1 = floor(vie_max/freq_rep_1)-1;
nbr_scen_2 = floor(vie_max/freq_rep_2)-1;
% Nombre de scénario de réparation
% (Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg_1 = floor(vie_max/freq_deg_1);
nbr_deg_2 = floor(vie_max/freq_deg_2);
% Nombre de dégradation
val_res_1 = zeros(nbr_sim,vie_max);
val_res_2 = zeros(nbr_sim,vie_max);
% Matrice de la valeur résiduel en pourcentage
pen_etat = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max, nbr_scen_2);
% Matrices des pénalités d'état
% %%%

Etat_1 = zeros(nbr_sim*nbr_etat_1*nbr_scen_1,vie_max);
% Matrice de la répartition des états avec réparation
% (Chaque simulation a nbr_etat (nbr d'états) lignes, 1 aucune réparation)
Etat_2 = zeros(nbr_sim*nbr_etat_2*nbr_scen_2,vie_max);
% Matrice de la répartition des états avec réparation
% (Chaque simulation a nbr_etat (nbr d'états) lignes, 1 aucune réparation)

```

```

for simulation = 1:nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen_1
        for etat = 1:nbr_etat_1
            Etat_1((simulation-1)*(nbr_scen_1*nbr_etat_1)+(scenario-1)*nbr_etat_1+etat,1:freq_deg_1)
= etat_init_1(etat);
            % État initiaux affectés (Chaque ligne d'un scénario représente le % dans chaque état)
            end
        end
        for scenario = 1 : nbr_scen_2
            for etat = 1:nbr_etat_2
                Etat_2((simulation-1)*(nbr_scen_2*nbr_etat_2)+(scenario-1)*nbr_etat_2+etat,1:freq_deg_2)
= etat_init_2(etat);
                % État initiaux affectés (Chaque ligne d'un scénario représente le % dans chaque état)
                end
            end
        end
    end

precedent_1 = zeros(nbr_etat_1,1);
nouveau_1 = zeros(1,nbr_etat_1);
precedent_2 = zeros(nbr_etat_1,1);
nouveau_2 = zeros(1,nbr_etat_1);
% Variables pour stocker le dernier état et le nouvel

% Création des simulations sans réparation (la première ligne de scénario)
% Selon la dernière répartition connue, la nouvelle est créée
for simulation = 1 : nbr_sim
    for annee = (freq_deg_1 + 1) : freq_deg_1 :(vie_max - 1)
        precedent_1 = Etat_1((simulation-1)*(nbr_scen_1*nbr_etat_1)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen_1*nbr_etat_1)+nbr_etat_1,annee-1);
        nouveau_1 = transpose(precedent_1)*transition_matrix_1;
        for latence = 0:freq_deg_1-1
            Etat_1((simulation-1)*(nbr_scen_1*nbr_etat_1)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen_1*nbr_etat_1)+nbr_etat_1,annee+latence) = transpose(nouveau_1);
        end
    end
    for annee = (freq_deg_2 + 1) : freq_deg_2 :(vie_max - 1)
        precedent_2 = Etat_2((simulation-1)*(nbr_scen_2*nbr_etat_2)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen_2*nbr_etat_2)+nbr_etat_2,annee-1);
        nouveau_2 = transpose(precedent_2)*transition_matrix_2;
        for latence = 0:freq_deg_2-1
            Etat_2((simulation-1)*(nbr_scen_2*nbr_etat_2)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen_2*nbr_etat_2)+nbr_etat_2,annee+latence) = transpose(nouveau_2);
        end
    end
end

% Scénarios de réparation, pour les lignes 2 jusqu'au nombre de scénario,
% les différents scénarios de détérioration sont évalués. La remise à neuf
% se fait sur le délai de dégradation. Donc si par exemple, les deux
% fréquences sont à 5 ans, un réparation à 10 ans signifie que les coûts
% sont déboursés à 10 ans et que le pont revient à 1 à l'année 15. (Cela

```

```

% peut aussi être modifié)
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen_1
        Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1*nr_etat_1+(scenario-1)*nr_etat_1+1:(simulation-
1)*nr_scen_1*nr_etat_1+(scenario-1)*nr_etat_1+nr_etat_1,1:(scenario)*freq_rep_1) =
Etat_1((simulation-1)*nr_scen_1*nr_etat_1+1:(simulation-
1)*nr_scen_1*nr_etat_1+nr_etat_1,1:(scenario)*freq_rep_1); %Détérioration identique à aucune
réparation jusqu'à la réparation
        for latence = 1:freq_deg_1
            Etat_1((simulation-1)*nr_scen_1*nr_etat_1+(scenario-1)*nr_etat_1+1:(simulation-
1)*nr_scen_1*nr_etat_1+(scenario-1)*nr_etat_1+nr_etat_1,(scenario)*freq_rep_1+latence) =
transpose(etat_rep_1); %État initiale la période suivant la réparation
        end
        for annee = (scenario*freq_rep_1 + freq_deg_1 + 1) : freq_deg_1 : vie_max
            precedent_1 = Etat_1((simulation-1)*nr_scen_1*nr_etat_1+(scenario-
1)*nr_etat_1+1:(simulation-1)*nr_scen_1*nr_etat_1+(scenario-1)*nr_etat_1+nr_etat_1,annee-1);
            nouveau_1 = transpose(precedent_1)*transition_matrix_1;
            for latence = 0:freq_deg_1-1
                Etat_1((simulation-1)*nr_scen_1*nr_etat_1+(scenario-1)*nr_etat_1+1:(simulation-
1)*nr_scen_1*nr_etat_1+(scenario-1)*nr_etat_1+nr_etat_1,annee+latence) =
transpose(nouveau_1);
            end
        end
    end
    for scenario = 2 : nbr_scen_2
        Etat_2((simulation-1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+1:(simulation-
1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+nr_etat_2,1:(scenario)*freq_rep_2) =
Etat_2((simulation-1)*nr_scen_2*nr_etat_2+1:(simulation-
1)*nr_scen_2*nr_etat_2+nr_etat_2,1:(scenario)*freq_rep_2); %Détérioration identique à aucune
réparation jusqu'à la réparation
        for latence = 1:freq_deg_2
            Etat_2((simulation-1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+1:(simulation-
1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+nr_etat_2,(scenario)*freq_rep_2+latence) =
transpose(etat_rep_2); %État initiale la période suivant la réparation
        end
        for annee = (scenario*freq_rep_2 + freq_deg_2 + 1) : freq_deg_2 : vie_max
            precedent_2 = Etat_2((simulation-1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-
1)*nr_etat_2+1:(simulation-1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+nr_etat_2,annee-1);
            nouveau_2 = transpose(precedent_2)*transition_matrix_2;
            for latence = 0:freq_deg_1-1
                Etat_2((simulation-1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+1:(simulation-
1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+nr_etat_2,annee+latence) =
transpose(nouveau_2);
            end
        end
    end
end

% Transformation en valeur résiduelle
% Création de la matrice de pénalité d'état
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen_1
        for scenario_2 = 1 : nbr_scen_2
            for annee = 1 : vie_max

```

```

val_res_tempo_1 = 0;
val_res_tempo_2 = 0;
pen_etat_tempo_1 = 0;
pen_etat_tempo_2 = 0;
for etat = 1:nbr_etat_1
    val_res_tempo_1 = val_res_tempo_1 + Etat_1((simulation-
1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+etat,annee) * val_residuel_1(etat);
    pen_etat_tempo_1 = pen_etat_tempo_1 + Etat_1((simulation-
1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+etat,annee) * dep_etat(etat);
end
val_res_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) = val_res_tempo_1;
for etat = 1:nbr_etat_2
    val_res_tempo_2 = val_res_tempo_2 + Etat_2((simulation-
1)*nbr_scen_2*nbr_etat_2+(scenario_2-1)*nbr_etat_2+etat,annee) * val_residuel_2(etat);
    pen_etat_tempo_2 = pen_etat_tempo_2 + Etat_2((simulation-
1)*nbr_scen_2*nbr_etat_2+(scenario_2-1)*nbr_etat_2+etat,annee) * dep_etat(etat);
end
val_res_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario_2, annee) = val_res_tempo_2;
pen_etat((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee, scenario_2) = pen_etat_tempo_1 * 0.5 +
pen_etat_tempo_2 * 0.5;
end
end
end
display(simulation);
end

```

C.3.6 Détérioration markovienne de la dalle et des poutres

```

function [val_res_1, val_res_2, Etat_1, Etat_2, pen_etat] = deterioration_mark_alea_2ele(nbr_sim,
vie_max, freq_rep, freq_deg, etat_init_1, etat_init_2, etat_rep_1, etat_rep_2,
transition_matrix_1, transition_matrix_2, val_residuel_1, val_residuel_2, pen_etat)
% Fonction qui permet de simuler la dégradation d'une infrastructure à
% l'aide d'un processus de Markov
% Les sortants de cette fonction sont une matrice d'état, une matrice de
% valeurs résiduels et une matrice de pénalité d'état
% ***La colonne des matrices représentent l'année + 1 (car l'année 0 est
% dans la colonne 1, puisque qu'il est physiquement impossible d'avoir une
% colonne 0)

%Paramètres si la fonction n'est pas appelée
% clear
% clc

% nbr_sim    = 10000;    % Nombre de simulations
% vie_max    = 100;      % Durée de vie maximale
% vie_max    = 100;      % Durée de vie maximale
% freq_rep   = 5;        % fréquence de réparation possible
%
% freq_deg   = 5;        % fréquence de dégradation
%
% etat_init_1 = 1; % Répartition initiale de l'infrastructure

```

```

% etat_init_2 = 1;
% etat_rep_1 = 1; % Répartition dans lequel se retrouve l'infrastructure après la réparation
% etat_rep_2 = 1;
%
%
% transition_matrix_1 = [0.84,0.16,0, 0;... % Matrice de transition (carrée)
%                       0,0.71,0.29,0;... % Nbr_etat max = 9
%                       0,0,0.5,0.5;...
%                       0,0,0,1];
% transition_matrix_2 = [0.91,0.09,0, 0;... % Matrice de transition (carrée)
%                       0,0.87,0.13,0;... % Nbr_etat max = 9
%                       0,0,0.71,0.29;...
%                       0,0,0,1];
%
% val_residuel_1 = [1,0.3,0.15,0]; % valeur résiduelle pour chaque état
% val_residuel_2 = [1,0.3,0.15,0]; % valeur résiduelle pour chaque état
% dep_etat = [1,0.9,0.8,0]; % Paramètres de pénalité d'état
% Données initiales

nbr_etat_1 = length(transition_matrix_1);
nbr_etat_2 = length(transition_matrix_2);
% Nombre d'états
nbr_scen_1 = floor(vie_max/freq_rep)-1;
nbr_scen_2 = floor(vie_max/freq_rep)-1;
% Nombre de scénario de réparation
% (Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg_1 = floor(vie_max/freq_deg);
nbr_deg_2 = floor(vie_max/freq_deg);
% Nombre de dégradation
val_res_1 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max);
val_res_2 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_2,vie_max);
% Matrice de la valeur résiduel en pourcentage
pen_etat = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max, nbr_scen_2);
pen_etat_1 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max);
pen_etat_2 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_2,vie_max);
% Matrice des pénalités d'état
% %%%

% Création des matrices pour stocker les données

Etat_1 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max);
Etat_2 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_2,vie_max);
% Matrice des états avec scénarios de réparation (Chaque simulation a Nbr_scen ligne)
Etat_1(:,1:freq_deg) = etat_init_1;
Etat_2(:,1:freq_deg) = etat_init_2;
% L'état initiale est affecté à la première fréquence de réparation

deg_alea_1 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max);
deg_alea_2 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_2,vie_max);
% Matrice de variables aléatoires pour la dégradation entre les fréq, 0, donc reste dans l'état

% Variables aléatoire pour déterminer le chemin dans la matrice
for simulation = 1 : nbr_sim *nbr_scen_1
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg :(vie_max - 1)

```

```

deg_alea_1(simulation, annee) = rand();
    % Matrice de V.A. entre 0 et 1 pour produire la dégradation,
    % ce nombre est le même, qu'il y ait réparation ou non,
    % cela pourrait être changé
end
end
for simulation = 1 : nbr_sim * nbr_scen_2
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg :(vie_max - 1)
        deg_alea_2(simulation, annee) = rand();
        % Matrice de V.A. entre 0 et 1 pour produire la dégradation,
        % ce nombre est le même, qu'il y ait réparation ou non,
        % cela pourrait être changé
    end
end

% Création des simulations sans réparation (la première ligne de scénario)
% selon le dernier état connu et la variable aléatoire précédente, un
% nouvel état est créé à chaque période. Créer pour un maximum de 9 états
for simulation = 1 : nbr_sim
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg :(vie_max - 1)
        precedent = Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee-1);
        for etat = 1:nbr_etat_2
            if precedent == etat
                if deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee) < transition_matrix_2(etat, 1)
                    Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee:annee+freq_deg -1) = 1;
                elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee) < (transition_matrix_2(etat,
1)+transition_matrix_2(etat, 2))
                    Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee:annee+freq_deg -1) = 2;
                elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee) < (transition_matrix_2(etat,
1)+transition_matrix_2(etat, 2)+transition_matrix_2(etat, 3))
                    Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee:annee+freq_deg -1) = 3;
                elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee) < (transition_matrix_2(etat,
1)+transition_matrix_2(etat, 2)+transition_matrix_2(etat, 3)+transition_matrix_2(etat, 4))
                    Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee:annee+freq_deg -1) = 4;
                elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee) < (transition_matrix_2(etat,
1)+transition_matrix_2(etat, 2)+transition_matrix_2(etat, 3)+transition_matrix_2(etat,
4)+transition_matrix_2(etat, 5))
                    Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee:annee+freq_deg -1) = 5;
                elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee) < (transition_matrix_2(etat,
1)+transition_matrix_2(etat, 2)+transition_matrix_2(etat, 3)+transition_matrix_2(etat,
4)+transition_matrix_2(etat, 5)+transition_matrix_2(etat, 6))
                    Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee:annee+freq_deg -1) = 6;
                elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee) < (transition_matrix_2(etat,
1)+transition_matrix_2(etat, 2)+transition_matrix_2(etat, 3)+transition_matrix_2(etat,
4)+transition_matrix_2(etat, 5)+transition_matrix_2(etat, 6)+transition_matrix_2(etat, 7))
                    Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee:annee+freq_deg -1) = 7;
                elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee) < (transition_matrix_2(etat,
1)+transition_matrix_2(etat, 2)+transition_matrix_2(etat, 3)+transition_matrix_2(etat,
4)+transition_matrix_2(etat, 5)+transition_matrix_2(etat, 6)+transition_matrix_2(etat,
7)+transition_matrix_2(etat, 8))
                    Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee:annee+freq_deg -1) = 8;
                else
                    Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,annee:annee+freq_deg -1) = 9;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end
Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,vie_max+1) = 1;
end

for simulation = 1 : nbr_sim
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg :(vie_max - 1)
        precedent = Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee-1);
        for etat = 1:nbr_etat_1
            if precedent == etat
                if deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee) < transition_matrix_1(etat, 1)
                    Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee:annee+freq_deg -1) = 1;
                elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee) < (transition_matrix_1(etat,
1)+transition_matrix_1(etat, 2))
                    Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee:annee+freq_deg -1) = 2;
                elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee) < (transition_matrix_1(etat,
1)+transition_matrix_1(etat, 2)+transition_matrix_1(etat, 3))
                    Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee:annee+freq_deg -1) = 3;
                elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee) < (transition_matrix_1(etat,
1)+transition_matrix_1(etat, 2)+transition_matrix_1(etat, 3)+transition_matrix_1(etat, 4))
                    Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee:annee+freq_deg -1) = 4;
                elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee) < (transition_matrix_1(etat,
1)+transition_matrix_1(etat, 2)+transition_matrix_1(etat, 3)+transition_matrix_1(etat,
4)+transition_matrix_1(etat, 5))
                    Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee:annee+freq_deg -1) = 5;
                elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee) < (transition_matrix_1(etat,
1)+transition_matrix_1(etat, 2)+transition_matrix_1(etat, 3)+transition_matrix_1(etat,
4)+transition_matrix_1(etat, 5)+transition_matrix_1(etat, 6))
                    Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee:annee+freq_deg -1) = 6;
                elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee) < (transition_matrix_1(etat,
1)+transition_matrix_1(etat, 2)+transition_matrix_1(etat, 3)+transition_matrix_1(etat,
4)+transition_matrix_1(etat, 5)+transition_matrix_1(etat, 6)+transition_matrix_1(etat, 7))
                    Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee:annee+freq_deg -1) = 7;
                elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee) < (transition_matrix_1(etat,
1)+transition_matrix_1(etat, 2)+transition_matrix_1(etat, 3)+transition_matrix_1(etat,
4)+transition_matrix_1(etat, 5)+transition_matrix_1(etat, 6)+transition_matrix_1(etat,
7)+transition_matrix_1(etat, 8))
                    Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee:annee+freq_deg -1) = 8;
                else
                    Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,annee:annee+freq_deg -1) = 9;
                end
            end
        end
    end
end
Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,vie_max+1) = 1;
end

```

```

% scénarios de réparation, pour les lignes 2 jusqu'au nombre de scénario,
% les différents scénarios de détérioration sont évalués. La remise à neuf
% se fait sur le délai de dégradation. Donc si par exemple, les deux
% fréquences sont à 5 ans, un réparation à 10 ans signifie que les coûts

```

```

% sont déboursés à 10 ans et que le pont revient à 1 à l'année 15. (Cela
% peut aussi être modifié)
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen_1
        Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,1:(scenario)*freq_deg) = Etat_1((simulation-
1)*nbr_scen_1+1,1:(scenario)*freq_deg);
        if Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,(scenario)*freq_deg) == 1
            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,(scenario)*freq_deg+1:vie_max) =
Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1,(scenario)*freq_deg+1:vie_max);
            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,vie_max+1) = 0;
        else
            Etat_1((simulation-
1)*nbr_scen_1+scenario,(scenario)*freq_deg+1:(scenario)*freq_deg+freq_deg) = etat_rep_1;
            % La période de dégradation suivante du scénario est remise à l'état initial
            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,vie_max+1) = 1;
            for annee = (scenario)*freq_deg+freq_deg+1 : freq_deg : (vie_max - 1)
                precedent = Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee-1);
                for etat = 1:nbr_etat_1
                    if precedent == etat
                        if deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) < transition_matrix_1(etat,
1)
                            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 1;
                        elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) <
(transition_matrix_1(etat, 1)+transition_matrix_1(etat, 2))
                            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 2;
                        elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) <
(transition_matrix_1(etat, 1)+transition_matrix_1(etat, 2)+transition_matrix_1(etat, 3))
                            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 3;
                        elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) <
(transition_matrix_1(etat, 1)+transition_matrix_1(etat, 2)+transition_matrix_1(etat,
3)+transition_matrix_1(etat, 4))
                            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 4;
                        elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) <
(transition_matrix_1(etat, 1)+transition_matrix_1(etat, 2)+transition_matrix_1(etat,
3)+transition_matrix_1(etat, 4)+transition_matrix_1(etat, 5))
                            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 5;
                        elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) <
(transition_matrix_1(etat, 1)+transition_matrix_1(etat, 2)+transition_matrix_1(etat,
3)+transition_matrix_1(etat, 4)+transition_matrix_1(etat, 5)+transition_matrix_1(etat, 6))
                            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 6;
                        elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) <
(transition_matrix_1(etat, 1)+transition_matrix_1(etat, 2)+transition_matrix_1(etat,
3)+transition_matrix_1(etat, 4)+transition_matrix_1(etat, 5)+transition_matrix_1(etat,
6)+transition_matrix_1(etat, 7))
                            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 7;
                        elseif deg_alea_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) <
(transition_matrix_1(etat, 1)+transition_matrix_1(etat, 2)+transition_matrix_1(etat,
3)+transition_matrix_1(etat, 4)+transition_matrix_1(etat, 5)+transition_matrix_1(etat,
6)+transition_matrix_1(etat, 7)+transition_matrix_1(etat, 8))
                            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 8;
                        else
                            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 9;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
        end
        end
    end
end
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen_2
        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,1:(scenario)*freq_deg) = Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,1:(scenario)*freq_deg);
        if Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,(scenario)*freq_deg) == 1
            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,(scenario)*freq_deg+1:vie_max) =
Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,(scenario)*freq_deg+1:vie_max);
            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,vie_max+1) = 0;
        else
            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,(scenario)*freq_deg+1:(scenario)*freq_deg+freq_deg) = etat_rep_2;
            % La période de dégradation suivante du scénario est remise à l'état initial
            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,vie_max+1) = 1;
            for annee = (scenario)*freq_deg+freq_deg+1 : freq_deg : (vie_max - 1)
                precedent = Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee-1);
                for etat = 1:nbr_etat_2
                    if precedent == etat
                        if deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee) < transition_matrix_2(etat,
1)
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 1;
                        elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee) <
(transition_matrix_2(etat, 1)+transition_matrix_2(etat, 2))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 2;
                        elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee) <
(transition_matrix_2(etat, 1)+transition_matrix_2(etat, 2)+transition_matrix_2(etat, 3))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 3;
                        elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee) <
(transition_matrix_2(etat, 1)+transition_matrix_2(etat, 2)+transition_matrix_2(etat,
3)+transition_matrix_2(etat, 4))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 4;
                        elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee) <
(transition_matrix_2(etat, 1)+transition_matrix_2(etat, 2)+transition_matrix_2(etat,
3)+transition_matrix_2(etat, 4)+transition_matrix_2(etat, 5))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 5;
                        elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee) <
(transition_matrix_2(etat, 1)+transition_matrix_2(etat, 2)+transition_matrix_2(etat,
3)+transition_matrix_2(etat, 4)+transition_matrix_2(etat, 5)+transition_matrix_2(etat, 6))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 6;
                        elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee) <
(transition_matrix_2(etat, 1)+transition_matrix_2(etat, 2)+transition_matrix_2(etat,
3)+transition_matrix_2(etat, 4)+transition_matrix_2(etat, 5)+transition_matrix_2(etat,
6)+transition_matrix_2(etat, 7))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 7;
                        elseif deg_alea_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee) <
(transition_matrix_2(etat, 1)+transition_matrix_2(etat, 2)+transition_matrix_2(etat,
3)+transition_matrix_2(etat, 4)+transition_matrix_2(etat, 5)+transition_matrix_2(etat,
6)+transition_matrix_2(etat, 7)+transition_matrix_2(etat, 8))
                            Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 8;
                        else
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee:annee+freq_deg -1) = 9;
    end
end
end
end
end
end
end

% Transformation en valeur résiduelle et de la pénalité d'état
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen_1
        for annee = 1 : vie_max
            pen_etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) = dep_etat(Etat_1((simulation-
1)*nbr_scen_1+scenario,annee));
            val_res_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) = val_residuel_1(Etat_1((simulation-
1)*nbr_scen_1+scenario,annee));
        end
    end
    for scenario = 1 : nbr_scen_2
        for annee = 1 : vie_max
            pen_etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee) = dep_etat(Etat_2((simulation-
1)*nbr_scen_2+scenario,annee));
            val_res_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,annee) = val_residuel_2(Etat_2((simulation-
1)*nbr_scen_2+scenario,annee));
        end
    end
    display(simulation);
end

for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen_1
        for scenario_2 = 1 : nbr_scen_2
            for annee = 1 : vie_max
                pen_etat((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee,scenario_2) =
pen_etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) * 0.5 + pen_etat_2((simulation-
1)*nbr_scen_2+scenario_2,annee) * 0.5;
            end
        end
    end
end
end
end

```

C.3.7 Détérioration stochastique de la dalle et des poutres

```

function[val_res_1, val_res_2, Etat_1, Etat_2, pen_etat] = degradation_stoch_2ele(nbr_sim,
vie_max, variation, freq_rep_1, freq_rep_2, freq_deg, etat_init_1, etat_init_2, etat_rep_1,
etat_rep_2, transition_matrix_1, transition_matrix_2, val_residuel_1, val_residuel_2, pen_etat)
% Calcul des états, valeurs résiduels et pénalités d'état
% selon une dégradation à l'aide d'une matrice de

```

```

% transition déterministe

%Paramètres si la fonction n'est pas appelée

% clear
% clc
% %%
% nbr_sim = 20000; % Nombre de simulations
% vie_max = 100; % Durée de vie maximale
% freq_rep_1 = 5; % fréquence de réparation possible
% freq_rep_2 = 5;
% freq_deg = 5; % fréquence de dégradation
%
% etat_init_1 = [1,0,0,0]; % Répartition initiale de l'infrastructure
% etat_init_2 = [1,0,0,0];
% etat_rep_1 = [1,0,0,0]; % Répartition dans lequel se retrouve l'infrastructure après la
réparation
% etat_rep_2 = [1,0,0,0];
% variation = 5; % Pourcentage de variation maximal de la matrice
%
% transition_matrix_1 = [0.84,0.16,0, 0;... % Matrice de transition (carrée)
% 0,0.71,0.29,0;... % Nbr_etat max = 9
% 0,0,0.5,0.5;...
% 0,0,0,1];
% transition_matrix_2 = [0.91,0.09,0, 0;... % Matrice de transition (carrée)
% 0,0.87,0.13,0;... % Nbr_etat max = 9
% 0,0,0.71,0.29;...
% 0,0,0,1];
%
% val_residuel_1 = [1,0.3,0.15,0]; % valeur résiduelle pour chaque état
% val_residuel_2 = [1,0.3,0.15,0]; % valeur résiduelle pour chaque état
% dep_etat = [1,0.9,0.8,0]; % Paramètres de pénalité d'état

%Données initiales

transition_matrix_ini_1 = transition_matrix_1;
transition_matrix_ini_2 = transition_matrix_2;
% stocker la matrice initiale pour post-réparation
nbr_etat_1 = length(transition_matrix_1);
nbr_etat_2 = length(transition_matrix_2);
% Nombre d'états
nbr_scen_1 = floor(vie_max/freq_rep_1)-1;
nbr_scen_2 = floor(vie_max/freq_rep_2)-1;
% Nombre de scénario de réparation
% (Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg_1 = floor(vie_max/freq_deg);
nbr_deg_2 = floor(vie_max/freq_deg);
% Nombre de dégradation
val_res_1 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max);
val_res_2 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_2,vie_max);
% Matrice de la valeur résiduel en pourcentage
pen_etat = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max, nbr_scen_2);
pen_etat_1 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max);
pen_etat_2 = zeros(nbr_sim*nbr_scen_2,vie_max);

```

```

% Matrice des pénalités d'état

matrix_var_1 = zeros(nbr_etat_1,nbr_etat_1);
matrix_1 = zeros(nbr_etat_1,nbr_etat_1);
for etat = 1 : (nbr_etat_1-1)
    matrix_var_1(etat,etat) = (variation/100);
    matrix_var_1(etat,etat+1) = (-variation/100);
end
matrix_var_2 = zeros(nbr_etat_2,nbr_etat_2);
matrix_2 = zeros(nbr_etat_2,nbr_etat_2);
for etat = 1 : (nbr_etat_2-1)
    matrix_var_2(etat,etat) = (variation/100);
    matrix_var_2(etat,etat+1) = (-variation/100);
end
% Matrice pour déterminer le min et le max
tolerance = norminv(0.999,0,1);
% Tolérance pour la loi log-normale
% %%%%%%%%%%%

Etat_1 = zeros(nbr_sim*nbr_etat_1*nbr_scen_1,vie_max);
Etat_2 = zeros(nbr_sim*nbr_etat_2*nbr_scen_2,vie_max);
deg_alea_1 = zeros(simulation, annee);
deg_alea_2 = zeros(simulation, annee);
% Matrice de la répartition des états avec réparation
% (Chaque simulation a nbr_etat (nbr d'états) lignes, 1 aucune réparation)

% Variables aléatoire pour déterminer la matrice à utiliser
for simulation = 1 : nbr_sim
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg :(vie_max - 1)
        deg_alea_1(simulation, annee) = rand();
        deg_alea_2(simulation, annee) = rand();
        % Matrice de V.A. entre 0 et 1 pour produire la dégradation,
        % ce nombre est le même, qu'il y ait réparation ou non,
        % cela pourrait être changé
    end
end

for simulation = 1:nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen_1
        for etat = 1:nbr_etat_1
            Etat_1((simulation-1)*(nbr_scen_1*nbr_etat_1)+(scenario-1)*nbr_etat_1+etat,1:freq_deg) =
            etat_init_1(etat);
            % État initiaux affectés (Chaque ligne d'un scénario représente le % dans chaque état)
        end
    end
end

for simulation = 1:nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen_2
        for etat = 1:nbr_etat_2
            Etat_2((simulation-1)*(nbr_scen_2*nbr_etat_2)+(scenario-1)*nbr_etat_2+etat,1:freq_deg) =
            etat_init_2(etat);
            % État initiaux affectés (Chaque ligne d'un scénario représente le % dans chaque état)
        end
    end
end

```

```

end

precedent_1 = zeros(nbr_etat_1,1);
nouveau_1 = zeros(1,nbr_etat_1);
% Variables pour stocker le dernier état et le nouvel

% Création des simulations sans réparation (la première ligne de scénario)
% Selon la dernière répartition connue, la nouvelle est créée
for simulation = 1 : nbr_sim
transition_matrix_1 = transition_matrix_ini_1;
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg : (vie_max - 1)

% Valeurs pour faire la détérioration
transition_matrix_max_1 = transition_matrix_1 + matrix_var_1;
transition_matrix_min_1 = transition_matrix_1 - matrix_var_1;
precedent_1 = Etat_1((simulation-1)*(nbr_scen_1*nbr_etat_1)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen_1*nbr_etat_1)+nbr_etat_1,annee-1);
res_prec_1 = val_residuel_1 * precedent_1;
res_moy_1 = (transpose(precedent_1) * transition_matrix_1) * transpose(val_residuel_1);
res_max_1 = (transpose(precedent_1) * transition_matrix_max_1) * transpose(val_residuel_1);
res_min_1 = (transpose(precedent_1) * transition_matrix_min_1) * transpose(val_residuel_1);

% Si pont neuf, loi normale
    if precedent_1(1,1) == 1
% Calcul des valeurs résiduelles possibles
mu_det_1 = res_moy_1;
sigma_det_1 = (res_moy_1 - res_min_1)/3;
% Détérioration réelle avec la valeur aléatoire
res_reel_1 = norminv(deg_alea_1(simulation,annee),mu_det_1,sigma_det_1);
% Solveur pour trouver la matrice correspondante
syms x
    eqn = precedent_1(1,1) * ((transition_matrix_1(1,1)+x) * val_residuel_1(1,1) +
(transition_matrix_1(1,2)-x) * val_residuel_1(1,2))+ precedent_1(2,1) *
((transition_matrix_1(2,2)+x) * val_residuel_1(1,2) + (transition_matrix_1(2,3)-x) *
val_residuel_1(1,3)) + precedent_1(3,1)*((transition_matrix_1(3,3)+x) * val_residuel_1(1,3) +
(transition_matrix_1(3,4)-x) * val_residuel_1(1,4)) == res_reel_1;
    modif = vpasolve(eqn, x);
    for etat = 1 : (nbr_etat_1-1)
matrix_1(etat,etat) = modif;
matrix_1(etat,etat+1) = -modif;
    end

transition_matrix_1 = transition_matrix_1 + matrix_1;
transition_matrix_1(1,1) = max(transition_matrix_1(1,1), (variation)/100);
transition_matrix_1(1,1) = min(transition_matrix_1(1,1), (100-variation)/100);
transition_matrix_1(1,2) = max(transition_matrix_1(1,2), variation/100);
transition_matrix_1(1,2) = min(transition_matrix_1(1,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_1(2,2) = min(transition_matrix_1(2,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_1(2,2) = max(transition_matrix_1(2,2), variation/100);
transition_matrix_1(2,3) = max(transition_matrix_1(2,3), variation/100);
transition_matrix_1(2,3) = min(transition_matrix_1(2,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_1(3,3) = min(transition_matrix_1(3,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_1(3,3) = max(transition_matrix_1(3,3), variation/100);
transition_matrix_1(3,4) = max(transition_matrix_1(3,4), variation/100);

```

```

transition_matrix_1(3,4) = min(transition_matrix_1(3,4), (100-variation)/100);
nouveau_1 = transpose(precedent_1)*transition_matrix_1;

    for latence = 0:freq_deg-1
        Etat_1((simulation-1)*(nbr_scen_1*nr_etat_1)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen_1*nr_etat_1)+nr_etat_1,annee+latence) = transpose(nouveau_1);
        end

    else
        % Sinon log-normale
        % Le *100 permet d'éviter le problème relié à une dégradation de
        % moins d'un pourcent
        det_moy_1 = (res_prec_1 - res_moy_1) * 100;
        det_max_1 = (res_prec_1 - res_max_1) * 100;
        mu_det_log_1 = log(det_moy_1*100);
        sigma_det_log_1 = (log(det_max_1*100)-mu_det_log_1)/(-tolerance) ;
        res_reel_1 = res_prec_1 -
(logninv(deg_alea_1(simulation,annee),mu_det_log_1,sigma_det_log_1))/10000;
        res_app_1 = res_moy_1;
        % Détermination approx de la matrice car solveur ne marche pas
        % toujours en raison de la complexité du modèle
        % Précision à 0,0001 ou 0,01%
        if (res_reel_1 - res_moy_1) > 0
            x = 0;
            while abs(res_app_1 - res_reel_1) > 0.01
                x = x + 0.000001;
                res_app_1 = precedent_1(1,1) * ((transition_matrix_1(1,1)+x) * val_residuel_1(1,1)
+ (transition_matrix_1(1,2)-x) * val_residuel_1(1,2))+ precedent_1(2,1) *
((transition_matrix_1(2,2)+x) * val_residuel_1(1,2) + (transition_matrix_1(2,3)-x) *
val_residuel_1(1,3)) + precedent_1(3,1)*((transition_matrix_1(3,3)+x) * val_residuel_1(1,3) +
(transition_matrix_1(3,4)-x) * val_residuel_1(1,4)) ;
            end
            for etat = 1 : (nr_etat_1-1)
                matrix_1(etat,etat) = x;
                matrix_1(etat,etat+1) = -x;
            end
            transition_matrix_1 = transition_matrix_1 + matrix_1;
            transition_matrix_1(1,1) = max(transition_matrix_1(1,1), (variation)/100);
            transition_matrix_1(1,1) = min(transition_matrix_1(1,1), (100-variation)/100);
            transition_matrix_1(1,2) = max(transition_matrix_1(1,2), variation/100);
            transition_matrix_1(1,2) = min(transition_matrix_1(1,2), (100-variation)/100);
            transition_matrix_1(2,2) = min(transition_matrix_1(2,2), (100-variation)/100);
            transition_matrix_1(2,2) = max(transition_matrix_1(2,2), variation/100);
            transition_matrix_1(2,3) = max(transition_matrix_1(2,3), variation/100);
            transition_matrix_1(2,3) = min(transition_matrix_1(2,3), (100-variation)/100);
            transition_matrix_1(3,3) = min(transition_matrix_1(3,3), (100-variation)/100);
            transition_matrix_1(3,3) = max(transition_matrix_1(3,3), variation/100);
            transition_matrix_1(3,4) = max(transition_matrix_1(3,4), variation/100);
            transition_matrix_1(3,4) = min(transition_matrix_1(3,4), (100-variation)/100);

        else
            x = 0;
            while abs(res_app_1 - res_reel_1) > 0.01
                x = x + 0.000001;

```

```

        res_app_1 = precedent_1(1,1) * ((transition_matrix_1(1,1)-x) * val_residuel_1(1,1)
+ (transition_matrix_1(1,2)+x) * val_residuel_1(1,2))+ precedent_1(2,1) *
((transition_matrix_1(2,2)-x) * val_residuel_1(1,2) + (transition_matrix_1(2,3)+x) *
val_residuel_1(1,3)) + precedent_1(3,1)*((transition_matrix_1(3,3)-x) * val_residuel_1(1,3) +
(transition_matrix_1(3,4)+x) * val_residuel_1(1,4)) ;
    end
    for etat = 1 : (nbr_etat_1-1)
        matrix_1(etat,etat) = -x;
        matrix_1(etat,etat+1) = x;
    end
    transition_matrix_1 = transition_matrix_1 + matrix_1;
    transition_matrix_1(1,1) = max(transition_matrix_1(1,1), (variation)/100);
    transition_matrix_1(1,1) = min(transition_matrix_1(1,1), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(1,2) = max(transition_matrix_1(1,2), variation/100);
    transition_matrix_1(1,2) = min(transition_matrix_1(1,2), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(2,2) = min(transition_matrix_1(2,2), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(2,2) = max(transition_matrix_1(2,2), variation/100);
    transition_matrix_1(2,3) = max(transition_matrix_1(2,3), variation/100);
    transition_matrix_1(2,3) = min(transition_matrix_1(2,3), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(3,3) = min(transition_matrix_1(3,3), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(3,3) = max(transition_matrix_1(3,3), variation/100);
    transition_matrix_1(3,4) = max(transition_matrix_1(3,4), variation/100);
    transition_matrix_1(3,4) = min(transition_matrix_1(3,4), (100-variation)/100);

    end
    end
    nouveau_1 = transpose(precedent_1)*transition_matrix_1;
    for latence = 0:freq_deg-1
        Etat_1((simulation-1)*(nbr_scen_1*nbr_etat_1)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen_1*nbr_etat_1)+nbr_etat_1,annee+latence) = transpose(nouveau_1);
    end

    end
    display(simulation);
end

%% Scénarios de réparation, pour les lignes 2 jusqu'au nombre de scénario,
%% les différents scénarios de détérioration sont évalués. La remise à neuf
%% se fait sur le délai de dégradation. Donc si par exemple, les deux
%% fréquences sont à 5 ans, un réparation à 10 ans signifie que les coûts
%% sont déboursés à 10 ans et que le pont revient à 1 à l'année 15. (Cela
%% peut aussi être modifié)
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen_1
        transition_matrix_1 = transition_matrix_ini_1;
        Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+1:(simulation-
1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+nbr_etat_1,1:(scenario)*freq_rep_1) =
Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+1:(simulation-
1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+nbr_etat_1,1:(scenario)*freq_rep_1); %Détérioration identique à aucune
réparation jusqu'à la réparation
        for latence = 1:freq_deg
            Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+1:(simulation-
1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+nbr_etat_1,(scenario)*freq_rep_1+latence) =
transpose(etat_rep_1); %État initiale la période suivant la réparation
        end
    end
end

```

```

end
for annee = (scenario*freq_rep_1 + freq_deg + 1) : freq_deg : vie_max
precedent_1 = Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-
1)*nbr_etat_1+1:(simulation-1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+nbr_etat_1,annee-1);
transition_matrix_max_1 = transition_matrix_1 + matrix_var_1;
transition_matrix_min_1 = transition_matrix_1 - matrix_var_1;
res_prec_1 = val_residuel * precedent_1;
res_moy_1 = (transpose(precedent_1) * transition_matrix_1) * transpose(val_residuel_1);
res_max_1 = (transpose(precedent_1) * transition_matrix_max_1) *
transpose(val_residuel_1);
res_min_1 = (transpose(precedent_1) * transition_matrix_min_1) *
transpose(val_residuel_1);
% Si pont neuf, loi normale
if precedent_1(1,1) == 1
% Calcul des valeurs résiduelles possibles
mu_det_1 = res_moy_1;
sigma_det_1 = (res_moy_1 - res_min_1)/3;
res_reel_1 = norminv(deg_alea_1(simulation,annee),mu_det_1,sigma_det_1);
syms y
eqn = precedent_1(1,1) * ((transition_matrix_1(1,1)+y) * val_residuel_1(1,1) +
(transition_matrix_1(1,2)-y) * val_residuel_1(1,2))+ precedent_1(2,1) *
((transition_matrix_1(2,2)+y) * val_residuel_1(1,2) + (transition_matrix_1(2,3)-y) *
val_residuel_1(1,3)) + precedent_1(3,1)*((transition_matrix_1(3,3)+y) * val_residuel_1(1,3) +
(transition_matrix_1(3,4)-y) * val_residuel_1(1,4)) == res_reel_1;
modif = vpasolve(eqn, y);
for etat = 1 : (nbr_etat_1-1)
matrix_1(etat,etat) = modif;
matrix_1(etat,etat+1) = -modif;
end
transition_matrix_1 = transition_matrix_1 + matrix_1;
transition_matrix_1(1,1) = max(transition_matrix_1(1,1), (variation)/100);
transition_matrix_1(1,1) = min(transition_matrix_1(1,1), (100-variation)/100);
transition_matrix_1(1,2) = max(transition_matrix_1(1,2), variation/100);
transition_matrix_1(1,2) = min(transition_matrix_1(1,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_1(2,2) = min(transition_matrix_1(2,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_1(2,2) = max(transition_matrix_1(2,2), variation/100);
transition_matrix_1(2,3) = max(transition_matrix_1(2,3), variation/100);
transition_matrix_1(2,3) = min(transition_matrix_1(2,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_1(3,3) = min(transition_matrix_1(3,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_1(3,3) = max(transition_matrix_1(3,3), variation/100);
transition_matrix_1(3,4) = max(transition_matrix_1(3,4), variation/100);
transition_matrix_1(3,4) = min(transition_matrix_1(3,4), (100-variation)/100);
nouveau_1 = transpose(precedent_1)*transition_matrix_1;
for latence = 0:freq_deg-1
Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+1:(simulation-
1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+nbr_etat_1,annee+latence) =
transpose(nouveau_1);
end
else
det_moy_1 = (res_prec_1 - res_moy_1) * 100;
det_max_1 = (res_prec_1 - res_max_1) * 100;
mu_det_log_1 = log(det_moy_1*100);
sigma_det_log_1 = (log(det_max_1*100)-mu_det_log_1)/(-tolerance) ;
res_reel_1 = res_prec_1 -

```

```

(logninv(deg_alea_1(simulation,annee),mu_det_log_1,sigma_det_log_1))/10000;
res_app_1 = res_moy_1;
% Détermination approx de la matrice car solveur ne marche pas
% toujours en raison de la complexité du modèle
% Précision à 0,0001 ou 0,01%
if (res_reel_1 - res_moy_1) > 0
    x = 0;
    while abs(res_app_1 - res_reel_1) > 0.01
        x = x + 0.000001;
        res_app_1 = precedent_1(1,1) * ((transition_matrix_1(1,1)+x) * val_residuel_1(1,1)
+ (transition_matrix_1(1,2)-x) * val_residuel_1(1,2))+ precedent_1(2,1) *
((transition_matrix_1(2,2)+x) * val_residuel_1(1,2) + (transition_matrix_1(2,3)-x) *
val_residuel_1(1,3)) + precedent_1(3,1)*((transition_matrix_1(3,3)+x) * val_residuel_1(1,3) +
(transition_matrix_1(3,4)-x) * val_residuel_1(1,4)) ;
    end
    for etat = 1 : (nbr_etat_1-1)
        matrix_1(etat,etat) = x;
        matrix_1(etat,etat+1) = -x;
    end
    transition_matrix_1 = transition_matrix_1 + matrix_1;
    transition_matrix_1(1,1) = max(transition_matrix_1(1,1), (variation)/100);
    transition_matrix_1(1,1) = min(transition_matrix_1(1,1), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(1,2) = max(transition_matrix_1(1,2), variation/100);
    transition_matrix_1(1,2) = min(transition_matrix_1(1,2), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(2,2) = min(transition_matrix_1(2,2), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(2,2) = max(transition_matrix_1(2,2), variation/100);
    transition_matrix_1(2,3) = max(transition_matrix_1(2,3), variation/100);
    transition_matrix_1(2,3) = min(transition_matrix_1(2,3), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(3,3) = min(transition_matrix_1(3,3), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(3,3) = max(transition_matrix_1(3,3), variation/100);
    transition_matrix_1(3,4) = max(transition_matrix_1(3,4), variation/100);
    transition_matrix_1(3,4) = min(transition_matrix_1(3,4), (100-variation)/100);

else
    x = 0;
    while abs(res_app_1 - res_reel_1) > 0.01
        x = x + 0.000001;
        res_app_1 = precedent_1(1,1) * ((transition_matrix_1(1,1)-x) * val_residuel_1(1,1)
+ (transition_matrix_1(1,2)+x) * val_residuel_1(1,2))+ precedent_1(2,1) *
((transition_matrix_1(2,2)-x) * val_residuel_1(1,2) + (transition_matrix_1(2,3)+x) *
val_residuel_1(1,3)) + precedent_1(3,1)*((transition_matrix_1(3,3)-x) * val_residuel_1(1,3) +
(transition_matrix_1(3,4)+x) * val_residuel_1(1,4)) ;
    end
    for etat = 1 : (nbr_etat_1-1)
        matrix_1(etat,etat) = -x;
        matrix_1(etat,etat+1) = x;
    end
    transition_matrix_1 = transition_matrix_1 + matrix_1;
    transition_matrix_1(1,1) = max(transition_matrix_1(1,1), (variation)/100);
    transition_matrix_1(1,1) = min(transition_matrix_1(1,1), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(1,2) = max(transition_matrix_1(1,2), variation/100);
    transition_matrix_1(1,2) = min(transition_matrix_1(1,2), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(2,2) = min(transition_matrix_1(2,2), (100-variation)/100);
    transition_matrix_1(2,2) = max(transition_matrix_1(2,2), variation/100);

```

```

transition_matrix_1(2,3) = max(transition_matrix_1(2,3), variation/100);
transition_matrix_1(2,3) = min(transition_matrix_1(2,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_1(3,3) = min(transition_matrix_1(3,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_1(3,3) = max(transition_matrix_1(3,3), variation/100);
transition_matrix_1(3,4) = max(transition_matrix_1(3,4), variation/100);
transition_matrix_1(3,4) = min(transition_matrix_1(3,4), (100-variation)/100);

end
end

nouveau_1 = transpose(precedent_1)*transition_matrix_1;
for latence = 0:freq_deg-1
    Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+1:(simulation-
1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+1,annee+latence) =
transpose(nouveau_1);
end

end
end
display(simulation);
end

precedent_2 = zeros(nbr_etat_2,1);
nouveau_2 = zeros(1,nbr_etat_2);
% Variables pour stocker le dernier état et le nouvel

% Création des simulations sans réparation (la première ligne de scénario)
% Selon la dernière répartition connue, la nouvelle est créée
for simulation = 1 : nbr_sim
    transition_matrix_2 = transition_matrix_ini_2;
    for annee = (freq_deg + 1) : freq_deg : (vie_max - 1)

        % Valeurs pour faire la détérioration
        transition_matrix_max_2 = transition_matrix_2 + matrix_var_2;
        transition_matrix_min_2 = transition_matrix_2 - matrix_var_2;
        precedent_2 = Etat_2((simulation-1)*(nbr_scen_2*nbr_etat_2)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen_2*nbr_etat_2)+nbr_etat_2,annee-1);
        res_prec_2 = val_residuel_2 * precedent_2;
        res_moy_2 = (transpose(precedent_2) * transition_matrix_2) * transpose(val_residuel_2);
        res_max_2 = (transpose(precedent_2) * transition_matrix_max_2) * transpose(val_residuel_2);
        res_min_2 = (transpose(precedent_2) * transition_matrix_min_2) * transpose(val_residuel_2);

        % Si pont neuf, loi normale
        if precedent_2(1,1) == 1
            % Calcul des valeurs résiduelles possibles
            mu_det_2 = res_moy_2;
            sigma_det_2 = (res_moy_2 - res_min_2)/3;
            % Détérioration réelle avec la valeur aléatoire
            res_reel_2 = norminv(deg_alea_2(simulation,annee),mu_det_2,sigma_det_2);
            % Solveur pour trouver la matrice correspondante
            syms x
            eqn = precedent_2(1,1) * ((transition_matrix_2(1,1)+x) * val_residuel_2(1,1) +
(transition_matrix_2(1,2)-x) * val_residuel_2(1,2))+ precedent_2(2,1) *
((transition_matrix_2(2,2)+x) * val_residuel_2(1,2) + (transition_matrix_2(2,3)-x) *
val_residuel_2(1,3)) + precedent_2(3,1)*((transition_matrix_2(3,3)+x) * val_residuel_2(1,3) +

```

```

(transition_matrix_2(3,4)-x) * val_residuel_2(1,4)) == res_reel_2;
    modif = vpsolve(eqn, x);
    for etat = 1 : (nbr_etat_2-1)
        matrix_2(etat,etat) = modif;
        matrix_2(etat,etat+1) = -modif;
    end
transition_matrix_2 = transition_matrix_2 + matrix_2;
transition_matrix_2(1,1) = max(transition_matrix_2(1,1), (variation)/100);
transition_matrix_2(1,1) = min(transition_matrix_2(1,1), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(1,2) = max(transition_matrix_2(1,2), variation/100);
transition_matrix_2(1,2) = min(transition_matrix_2(1,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(2,2) = min(transition_matrix_2(2,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(2,2) = max(transition_matrix_2(2,2), variation/100);
transition_matrix_2(2,3) = max(transition_matrix_2(2,3), variation/100);
transition_matrix_2(2,3) = min(transition_matrix_2(2,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(3,3) = min(transition_matrix_2(3,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(3,3) = max(transition_matrix_2(3,3), variation/100);
transition_matrix_2(3,4) = max(transition_matrix_2(3,4), variation/100);
transition_matrix_2(3,4) = min(transition_matrix_2(3,4), (100-variation)/100);
nouveau_2 = transpose(precedent_2)*transition_matrix_2;

    for latence = 0:freq_deg-1
        Etat_2((simulation-1)*(nbr_scen_2*nbr_etat_2)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen_2*nbr_etat_2)+nbr_etat_2,annee+latence) = transpose(nouveau_2);
    end

else
% Sinon log-normale
% Le *100 permet d'éviter le problème relié à une dégradation de
% moins d'un pourcent
det_moy_2 = (res_prec_2 - res_moy_2) * 100;
det_max_2 = (res_prec_2 - res_max_2) * 100;
mu_det_log_2 = log(det_moy_2*100);
sigma_det_log_2 = (log(det_max_2*100)-mu_det_log_2)/(-tolerance) ;
res_reel_2 = res_prec_2 -
(logninv(deg_alea_2(simulation,annee),mu_det_log_2,sigma_det_log_2))/10000;
res_app_2 = res_moy_2;
% Détermination approx de la matrice car solveur ne marche pas
% toujours en raison de la complexité du modèle
% Précision à 0,0001 ou 0,01%
if (res_reel_2 - res_moy_2) > 0
    x = 0;
    while abs(res_app_2 - res_reel_2) > 0.01
        x = x + 0.000001;
        res_app_2 = precedent_2(1,1) * ((transition_matrix_2(1,1)+x) * val_residuel_2(1,1)
+ (transition_matrix_2(1,2)-x) * val_residuel_2(1,2))+ precedent_2(2,1) *
((transition_matrix_2(2,2)+x) * val_residuel_2(1,2) + (transition_matrix_2(2,3)-x) *
val_residuel_2(1,3)) + precedent_2(3,1)*((transition_matrix_2(3,3)+x) * val_residuel_2(1,3) +
(transition_matrix_2(3,4)-x) * val_residuel_2(1,4)) ;
    end
    for etat = 1 : (nbr_etat_2-1)
        matrix_2(etat,etat) = x;
        matrix_2(etat,etat+1) = -x;
    end
end

```

```

        transition_matrix_2 = transition_matrix_2 + matrix_2;
transition_matrix_2(1,1) = max(transition_matrix_2(1,1), (variation)/100);
transition_matrix_2(1,1) = min(transition_matrix_2(1,1), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(1,2) = max(transition_matrix_2(1,2), variation/100);
transition_matrix_2(1,2) = min(transition_matrix_2(1,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(2,2) = min(transition_matrix_2(2,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(2,2) = max(transition_matrix_2(2,2), variation/100);
transition_matrix_2(2,3) = max(transition_matrix_2(2,3), variation/100);
transition_matrix_2(2,3) = min(transition_matrix_2(2,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(3,3) = min(transition_matrix_2(3,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(3,3) = max(transition_matrix_2(3,3), variation/100);
transition_matrix_2(3,4) = max(transition_matrix_2(3,4), variation/100);
transition_matrix_2(3,4) = min(transition_matrix_2(3,4), (100-variation)/100);

else
    x = 0;
    while abs(res_app_2 - res_reel_2) > 0.01
        x = x + 0.000001;
        res_app_2 = precedent_2(1,1) * ((transition_matrix_2(1,1)-x) * val_residuel_2(1,1)
+ (transition_matrix_2(1,2)+x) * val_residuel_2(1,2))+ precedent_2(2,1) *
((transition_matrix_2(2,2)-x) * val_residuel_2(1,2) + (transition_matrix_2(2,3)+x) *
val_residuel_2(1,3)) + precedent_2(3,1)*((transition_matrix_2(3,3)-x) * val_residuel_2(1,3) +
(transition_matrix_2(3,4)+x) * val_residuel_2(1,4)) ;
        end
        for etat = 1 : (nbr_etat_2-1)
            matrix_2(etat,etat) = -x;
            matrix_2(etat,etat+1) = x;
        end
        transition_matrix_2 = transition_matrix_2 + matrix_2;
transition_matrix_2(1,1) = max(transition_matrix_2(1,1), (variation)/100);
transition_matrix_2(1,1) = min(transition_matrix_2(1,1), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(1,2) = max(transition_matrix_2(1,2), variation/100);
transition_matrix_2(1,2) = min(transition_matrix_2(1,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(2,2) = min(transition_matrix_2(2,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(2,2) = max(transition_matrix_2(2,2), variation/100);
transition_matrix_2(2,3) = max(transition_matrix_2(2,3), variation/100);
transition_matrix_2(2,3) = min(transition_matrix_2(2,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(3,3) = min(transition_matrix_2(3,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(3,3) = max(transition_matrix_2(3,3), variation/100);
transition_matrix_2(3,4) = max(transition_matrix_2(3,4), variation/100);
transition_matrix_2(3,4) = min(transition_matrix_2(3,4), (100-variation)/100);

end
end
nouveau_2 = transpose(precedent_2)*transition_matrix_2;
for latence = 0:freq_deg-1
    Etat_2((simulation-1)*(nbr_scen_2*nr_etat_2)+1:(simulation-
1)*(nbr_scen_2*nr_etat_2)+nr_etat_2,annee+latence) = transpose(nouveau_2);
end

end
display(simulation);
end

```

```

%% Scénarios de réparation, pour les lignes 2 jusqu'au nombre de scénario,
%% les différents scénarios de détérioration sont évalués. La remise à neuf
%% se fait sur le délai de dégradation. Donc si par exemple, les deux
%% fréquences sont à 5 ans, un réparation à 10 ans signifie que les coûts
%% sont déboursés à 10 ans et que le pont revient à 1 à l'année 15. (Cela
%% peut aussi être modifié)
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen_2
        transition_matrix_2 = transition_matrix_ini_2;
        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+1:(simulation-
1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+nr_etat_2,1:(scenario)*freq_rep_2) =
Etat_2((simulation-1)*nr_scen_2*nr_etat_2+1:(simulation-
1)*nr_scen_2*nr_etat_2+nr_etat_2,1:(scenario)*freq_rep_2); %Détérioration identique à aucune
réparation jusqu'à la réparation
        for latence = 1:freq_deg
            Etat_2((simulation-1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+1:(simulation-
1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+nr_etat_2,(scenario)*freq_rep_2+latence) =
transpose(etat_rep_1); %État initiale la période suivant la réparation
        end
        for annee = (scenario*freq_rep_2 + freq_deg + 1) : freq_deg : vie_max
            precedent_2 = Etat_2((simulation-1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-
1)*nr_etat_2+1:(simulation-1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+nr_etat_2,annee-1);
            transition_matrix_max_2 = transition_matrix_2 + matrix_var_2;
            transition_matrix_min_2 = transition_matrix_2 - matrix_var_2;
            res_prec_2 = val_residuel * precedent_2;
            res_moy_2 = (transpose(precedent_2) * transition_matrix_2) * transpose(val_residuel_2);
            res_max_2 = (transpose(precedent_2) * transition_matrix_max_2) *
transpose(val_residuel_2);
            res_min_2 = (transpose(precedent_2) * transition_matrix_min_2) *
transpose(val_residuel_2);
            % Si pont neuf, loi normale
            if precedent_2(1,1) == 1
            % Calcul des valeurs résiduelles possibles
                mu_det_2 = res_moy_2;
                sigma_det_2 = (res_moy_2 - res_min_2)/3;
                res_reel_2 = norminv(deg_alea_2(simulation,annee),mu_det_2,sigma_det_2);
                syms y
                eqn = precedent_2(1,1) * ((transition_matrix_2(1,1)+y) * val_residuel_2(1,1) +
(transition_matrix_2(1,2)-y) * val_residuel_2(1,2))+ precedent_2(2,1) *
((transition_matrix_2(2,2)+y) * val_residuel_2(1,2) + (transition_matrix_2(2,3)-y) *
val_residuel_2(1,3)) + precedent_2(3,1)*((transition_matrix_2(3,3)+y) * val_residuel_2(1,3) +
(transition_matrix_2(3,4)-y) * val_residuel_2(1,4)) == res_reel_2;
                modif = vpsolve(eqn, y);
                for etat = 1 : (nr_etat_2-1)
                    matrix_2(etat,etat) = modif;
                    matrix_2(etat,etat+1) = -modif;
                end
            transition_matrix_2 = transition_matrix_2 + matrix_2;
            transition_matrix_2(1,1) = max(transition_matrix_2(1,1), (variation)/100);
            transition_matrix_2(1,1) = min(transition_matrix_2(1,1), (100-variation)/100);
            transition_matrix_2(1,2) = max(transition_matrix_2(1,2), variation/100);
            transition_matrix_2(1,2) = min(transition_matrix_2(1,2), (100-variation)/100);
        end
    end
end

```

```

transition_matrix_2(2,2) = min(transition_matrix_2(2,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(2,2) = max(transition_matrix_2(2,2), variation/100);
transition_matrix_2(2,3) = max(transition_matrix_2(2,3), variation/100);
transition_matrix_2(2,3) = min(transition_matrix_2(2,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(3,3) = min(transition_matrix_2(3,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(3,3) = max(transition_matrix_2(3,3), variation/100);
transition_matrix_2(3,4) = max(transition_matrix_2(3,4), variation/100);
transition_matrix_2(3,4) = min(transition_matrix_2(3,4), (100-variation)/100);
nouveau_2 = transpose(precedent_2)*transition_matrix_2;
    for latence = 0:freq_deg-1
        Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+1:(simulation-
1)*nr_scen_2*nr_etat_2+(scenario-1)*nr_etat_2+nr_etat_2,annee+latence) =
transpose(nouveau_2);
    end
else
det_moy_2 = (res_prec_2 - res_moy_2) * 100;
det_max_2 = (res_prec_2 - res_max_2) * 100;
mu_det_log_2 = log(det_moy_2*100);
sigma_det_log_2 = (log(det_max_2*100)-mu_det_log_2)/(-tolerance) ;
res_reel_2 = res_prec_2 -
(logninv(deg_alea_2(simulation,annee),mu_det_log_2,sigma_det_log_2))/10000;
res_app_2 = res_moy_2;
% Détermination approx de la matrice car solveur ne marche pas
% toujours en raison de la complexité du modèle
% Précision à 0,0001 ou 0,01%
if (res_reel_2 - res_moy_2) > 0
    x = 0;
    while abs(res_app_2 - res_reel_2) > 0.01
        x = x + 0.000001;
        res_app_2 = precedent_2(1,1) * ((transition_matrix_2(1,1)+x) * val_residuel_2(1,1)
+ (transition_matrix_2(1,2)-x) * val_residuel_2(1,2))+ precedent_2(2,1) *
((transition_matrix_2(2,2)+x) * val_residuel_2(1,2) + (transition_matrix_2(2,3)-x) *
val_residuel_2(1,3)) + precedent_2(3,1)*((transition_matrix_2(3,3)+x) * val_residuel_2(1,3) +
(transition_matrix_2(3,4)-x) * val_residuel_2(1,4)) ;
    end
    for etat = 1 : (nr_etat_2-1)
        matrix_2(etat,etat) = x;
        matrix_2(etat,etat+1) = -x;
    end
    transition_matrix_2 = transition_matrix_2 + matrix_2;
transition_matrix_2(1,1) = max(transition_matrix_2(1,1), (variation)/100);
transition_matrix_2(1,1) = min(transition_matrix_2(1,1), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(1,2) = max(transition_matrix_2(1,2), variation/100);
transition_matrix_2(1,2) = min(transition_matrix_2(1,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(2,2) = min(transition_matrix_2(2,2), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(2,2) = max(transition_matrix_2(2,2), variation/100);
transition_matrix_2(2,3) = max(transition_matrix_2(2,3), variation/100);
transition_matrix_2(2,3) = min(transition_matrix_2(2,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(3,3) = min(transition_matrix_2(3,3), (100-variation)/100);
transition_matrix_2(3,3) = max(transition_matrix_2(3,3), variation/100);
transition_matrix_2(3,4) = max(transition_matrix_2(3,4), variation/100);
transition_matrix_2(3,4) = min(transition_matrix_2(3,4), (100-variation)/100);

else

```

```

x = 0;
while abs(res_app_2 - res_reel_2) > 0.01
    x = x + 0.000001;
    res_app_2 = precedent_2(1,1) * ((transition_matrix_2(1,1)-x) * val_residuel_2(1,1)
+ (transition_matrix_2(1,2)+x) * val_residuel_2(1,2))+ precedent_2(2,1) *
((transition_matrix_2(2,2)-x) * val_residuel_2(1,2) + (transition_matrix_2(2,3)+x) *
val_residuel_2(1,3)) + precedent_2(3,1)*((transition_matrix_2(3,3)-x) * val_residuel_2(1,3) +
(transition_matrix_2(3,4)+x) * val_residuel_2(1,4)) ;
    end
    for etat = 1 : (nbr_etat_2-1)
        matrix_2(etat,etat) = -x;
        matrix_2(etat,etat+1) = x;
    end
    transition_matrix_2 = transition_matrix_2 + matrix_2;
    transition_matrix_2(1,1) = max(transition_matrix_2(1,1), (variation)/100);
    transition_matrix_2(1,1) = min(transition_matrix_2(1,1), (100-variation)/100);
    transition_matrix_2(1,2) = max(transition_matrix_2(1,2), variation/100);
    transition_matrix_2(1,2) = min(transition_matrix_2(1,2), (100-variation)/100);
    transition_matrix_2(2,2) = min(transition_matrix_2(2,2), (100-variation)/100);
    transition_matrix_2(2,2) = max(transition_matrix_2(2,2), variation/100);
    transition_matrix_2(2,3) = max(transition_matrix_2(2,3), variation/100);
    transition_matrix_2(2,3) = min(transition_matrix_2(2,3), (100-variation)/100);
    transition_matrix_2(3,3) = min(transition_matrix_2(3,3), (100-variation)/100);
    transition_matrix_2(3,3) = max(transition_matrix_2(3,3), variation/100);
    transition_matrix_2(3,4) = max(transition_matrix_2(3,4), variation/100);
    transition_matrix_2(3,4) = min(transition_matrix_2(3,4), (100-variation)/100);

end
end
nouveau_2 = transpose(precedent_2)*transition_matrix_2;
for latence = 0:freq_deg-1
    Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2*nbr_etat_2+(scenario-1)*nbr_etat_2+1:(simulation-
1)*nbr_scen_2*nbr_etat_2+(scenario-1)*nbr_etat_2+nbr_etat_2,annee+latence) =
transpose(nouveau_2);
end

end
end
display(simulation);
end

% Transformation en valeur résiduelle
% Création de la matrice de pénalité d'état
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen_1
        for scenario_2 = 1 : nbr_scen_2
            for annee = 1 : vie_max
                val_res_tempo_1 = 0;
                val_res_tempo_2 = 0;
                pen_etat_tempo_1 = 0;
                pen_etat_tempo_2 = 0;
                for etat = 1:nbr_etat_1
                    val_res_tempo_1 = val_res_tempo_1 + Etat_1((simulation-

```

```

1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+etat,annee) * val_residuel_1(etat);
    pen_etat_tempo_1 = pen_etat_tempo_1 + Etat_1((simulation-
1)*nbr_scen_1*nbr_etat_1+(scenario-1)*nbr_etat_1+etat,annee) * dep_etat(etat);
    end
    val_res_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee) = val_res_tempo_1;
    for etat = 1:nbr_etat_2
        val_res_tempo_2 = val_res_tempo_2 + Etat_2((simulation-
1)*nbr_scen_2*nbr_etat_2+(scenario_2-1)*nbr_etat_2+etat,annee) * val_residuel_2(etat);
        pen_etat_tempo_2 = pen_etat_tempo_2 + Etat_2((simulation-
1)*nbr_scen_2*nbr_etat_2+(scenario_2-1)*nbr_etat_2+etat,annee) * dep_etat(etat);
        end
        val_res_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario_2, annee) = val_res_tempo_2;
        pen_etat((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,annee, scenario_2) = pen_etat_tempo_1 * 0.5 +
pen_etat_tempo_2 * 0.5;
        end
        end
        end
    display(simulation);
end

```

C.4 Calcul des coûts

C.4.1 Un seul élément

```

function [cout_net,cout_brut] = couts(Inf_mat_cumul, interet_cumul,val_res, nbr_sim, nbr_scen,
freq_deg, freq_rep, cout_unit, quantite)
% Calcul des coûts de réparation actualisés et inflationnés

% Paramètres si la fonction n'est pas appelée

% nbr_sim           = 10000;           % Nombre de simulations
% vie_max           = 100;              % Durée de vie maximale
% freq_rep          = 5;                % fréquence de réparation possible
% freq_deg          = 5;                % fréquence de dégradation
% cout_unit         = 1000;             % Coût unitaire du matériau (1000$/m^2) ici
% quantite          = 1000;            % Superficie en m^2 ici

% Données initiales
nbr_scen            = floor(vie_max/freq_rep)-1;
% Nombre de scénario de réparation (Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg             = floor(vie_max/freq_deg);
% Nombre de dégradation
% %%%%%%%%%%%

cout_brut           = zeros(nbr_sim*nbr_scen,vie_max);
% Matrice de coûts non actualisés
cout_net            = zeros(nbr_sim*nbr_scen,vie_max);
% Matrice de coûts actualisés et indexés

```

```

%Calcul des coûts non actualisés, non inflationnés, coût selon aug. de
%valeur résiduelle
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen
        if Etat(2,1) == 1
            %Si détérioration stochastique seulement
            possible = Etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,vie_max+1);
        else
            possible = 1;
        end
        cout_brut((simulation-1)*nbr_scen+scenario,(scenario-1)*freq_deg+1) = quantite *
        cout_unit * (val_res((simulation-1)*nbr_scen+scenario,(scenario-1)*freq_deg+freq_deg+1)-
        val_res((simulation-1)*nbr_scen+scenario,(scenario-1)*freq_deg+1))*possible;
    end
end

%Calcul des coûts actualisés et indexés
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen
        cout_net((simulation-1)*nbr_scen+scenario,(scenario-1)*freq_deg+1) =
        cout_brut((simulation-1)*nbr_scen+scenario,(scenario-1)*freq_deg+1) *
        (1+inf_mat_cumul(simulation,(scenario-1)*freq_deg+1))/(1+interet_cumul(simulation,(scenario-
        1)*freq_deg+1));
    end
end
end

```

C.4.2 Un seul élément et deux réparations possibles

```

function [cout_net,cout_brut] = couts(inf_mat_cumul, interet_cumul,val_res, nbr_sim, nbr_scen,
freq_deg, freq_rep, cout_unit, quantite)
% Calcul des coûts de réparation actualisés et inflationnés

% Paramètres si la fonction n'est pas appelée

% nbr_sim          = 20000;          % Nombre de simulations
% vie_max          = 100;            % Durée de vie maximale
% freq_rep         = 5;              % fréquence de réparation possible
% freq_deg         = 5;              % fréquence de dégradation
% cout_unit        = 4150;           % Coût unitaire du matériau (1000$/m^2) ici
% quantite         = 1000;           % Superficie en m^2 ici
%
%
% Données initiales
nbr_scen           = 155;
% Nombre de scénario de réparation (Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg            = floor(vie_max/freq_deg);
% Nombre de dégradation

% %%%%%%%%%%%

cout_brut          = zeros(nbr_sim*nbr_scen,vie_max);

```

```

% Matrice de coûts non actualisés
cout_net          = zeros(nbr_sim*nr_scen,vie_max);
% Matrice de coûts actualisés et indexés

%Calcul des coûts non actualisés, non inflationnés, coût selon aug. de
%valeur résiduelle
for simulation = 1 : nr_sim
    for scenario = 2 : nr_scen
        if Etat_2(2,1) == 1
            %Si détérioration stochastique seulement
            possible = Etat_2((simulation-1)*nr_scen+scenario,vie_max+1);
        else
            possible = 1;
        end
        for annee = 11 : vie_max
            if Etat_2((simulation-1)*nr_scen+scenario, annee) - Etat_2((simulation-
1)*nr_scen+scenario, annee-1) < 0
                cout_brut((simulation-1)*nr_scen+scenario,annee-5) = quantite * cout_unit *
(val_res((simulation-1)*nr_scen+scenario,annee)-val_res((simulation-1)*nr_scen+scenario,annee-
1))*possible;
            end
        end
    end
end

%Calcul des coûts actualisés et indexés
for simulation = 1 : nr_sim
    for scenario = 2 : nr_scen
        for annee = 1 : vie_max
            cout_net((simulation-1)*nr_scen+scenario,annee) = cout_brut((simulation-
1)*nr_scen+scenario,annee) *
(1+inf_mat_cumul(simulation,annee))/(1+interet_cumul(simulation,annee));
        end
    end
end

```

C.4.3 Deux éléments

```

function [cout_net,cout_brut] = couts2ele(inf_mat_cumul, interet_cumul, val_res_1, val_res_2,
nr_sim, freq_deg, freq_rep, cout_unit_1, cout_unit_2, quantite_1, quantite_2)
% Calcul des coûts de réparation actualisés et inflationnés

% Paramètres si la fonction n'est pas appelée

% nr_sim          = 10000;          % Nombre de simulations
% vie_max         = 100;           % Durée de vie maximale
% freq_rep        = 5;             % fréquence de réparation possible
% freq_deg        = 5;             % fréquence de dégradation
% cout_unit_1     = 1557.95;       % Coût unitaire du matériau (1000$/m^2) ici
% quantite_1      = 1000;          % Superficie en m^2 ici
% cout_unit_2     = 1012.67;       % Coût unitaire du matériau (1000$/m^2) ici

```

```

% quantite_2           = 2609;           % Superficie en m^2 ici
% avantage            = 0.5;           % Avantage réparation simultanée

% Données initiales
nbr_scen_1           = floor(vie_max/freq_rep)-1;
nbr_scen_2           = floor(vie_max/freq_rep)-1;
% Nombre de scénario de réparation (Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg_1            = floor(vie_max/freq_deg);
nbr_deg_2            = floor(vie_max/freq_deg);
% Nombre de dégradation
% %%%%%%%%%%%

cout_brut_1          = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max);
cout_brut_2          = zeros(nbr_sim*nbr_scen_2,vie_max);
% Matrice de coûts non actualisés
cout_net_1           = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max);
cout_net_2           = zeros(nbr_sim*nbr_scen_2,vie_max);
cout_net             = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1, vie_max, nbr_scen_2);
% Matrice de coûts actualisés et indexés

%Calcul des coûts non actualisés, non inflationnés, coût selon aug. de
%valeur résiduelle
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen_1
        if Etat_1(2,1) == 1
            %Si détérioration stochastique seulement
            possible = Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,vie_max+1);
            else
                possible = 1;
            end
            cout_brut_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,(scenario-1)*freq_deg+1) = quantite_1 *
            cout_unit_1 * (val_res_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,(scenario-1)*freq_deg+freq_deg+1)-
            val_res_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,(scenario-1)*freq_deg+1))*possible;
        end
    end
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen_2
        if Etat_2(2,1) == 1
            %Si détérioration stochastique seulement
            possible = Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,vie_max+1);
            else
                possible = 1;
            end
            cout_brut_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,(scenario-1)*freq_deg+1) = quantite_2 *
            cout_unit_2 * (val_res_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,(scenario-1)*freq_deg+freq_deg+1)-
            val_res_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,(scenario-1)*freq_deg+1))*possible;
        end
    end
end

%Calcul des coûts actualisés et indexés
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen_1
        cout_net_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,(scenario-1)*freq_deg+1) =
        cout_brut_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,(scenario-1)*freq_deg+1) *

```

```

(1+inf_mat_cumul(simulation,(scenario-1)*freq_deg+1))/(1+interet_cumul(simulation,(scenario-1)*freq_deg+1));
    end
end
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 2 : nbr_scen_2
        cout_net_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,(scenario-1)*freq_deg+1) =
cout_brut_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario,(scenario-1)*freq_deg+1) *
(1+inf_mat_cumul(simulation,(scenario-1)*freq_deg+1))/(1+interet_cumul(simulation,(scenario-1)*freq_deg+1));
    end
end

for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen_1
        for scenario_2 = 1 : nbr_scen_2
            if scenario == scenario_2
                for annee = 1 : vie_max
                    cout_net((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario, annee, scenario_2) =
(cout_net_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario, annee) + cout_net_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario_2, annee)) * (1-avantage);
                end
            else
                for annee = 1 : vie_max
                    cout_net((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario, annee, scenario_2) =
(cout_net_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario, annee) + cout_net_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario_2, annee));
                end
            end
        end
    end
end
end

```

C.5 Calcul des revenus

C.5.1 Un seul élément

```

function [rev_net,rev_brut] = Revenues(nbr_sim, vie_max, freq_rep, freq_deg, inf_gen_cumul,
interet_cumul, djma, shadow_price, temps_eco, pen_etat)
% Cette fonction génère les revenus à partir des autres fonctions

% Paramètres si la fonction n'est pas appelée

% nbr_sim           = 10000;           % Nombre de simulations
% vie_max           = 100;             % Durée de vie maximale
% freq_rep          = 5;               % fréquence de réparation possible
% freq_deg          = 5;               % fréquence de dégradation
% cout_unit         = 1000;            % Coût unitaire du matériau (1000$/m^2) ici
% quantite          = 1000;            % Superficie en m^2 ici
% shadow_price      = 23.88;           % Prix virtuel en $/h

```

```

% temps_eco          = 0.09;          % Temps économisé par passage (en h)

% Données initiales
nbr_scen            = floor(vie_max/freq_rep)-1;
% Nombre de scénario de réparation (Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg             = floor(vie_max/freq_deg);
% Nombre de dégradation
% %%%%%%%%%%%

rev_brut            = zeros(nbr_sim*nbr_scen,vie_max);
% Matrice de revenus non actualisés
rev_net             = zeros(nbr_sim*nbr_scen,vie_max);
% Matrice de revenus indexés et actualisés

%Calcul des revenus non actualisés, non inflationnés, coût selon aug. de
%valeur résiduelle
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen
        for annee = 1:vie_max
            rev_brut((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee) = 365 * djma(simulation,annee) *
shadow_price * temps_eco * pen_etat((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee);
        end
    end
end

%Calcul des coûts actualisés et indexés
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario = 1 : nbr_scen
        for annee = 1:vie_max
            rev_net((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee) = rev_brut((simulation-
1)*nbr_scen+scenario,
annee)*(1+inf_gen_cumul(simulation,annee))/(1+interet_cumul(simulation,annee));
        end
    end
end
end

```

C.5.2 Deux éléments

```

function [rev_net,rev_brut] = Revenues2ele(nbr_sim, vie_max, freq_rep, freq_deg, inf_gen_cumul,
interet_cumul, djma, shadow_price, temps_eco, pen_etat)
% Cette fonction génère les revenus à partir des autres fonctions

% Paramètres si la fonction n'est pas appelée

% nbr_sim          = 10000;          % Nombre de simulations
% vie_max          = 100;            % Durée de vie maximale
% freq_rep         = 5;              % fréquence de réparation possible
% freq_deg         = 5;              % fréquence de dégradation
% shadow_price     = 23.88;          % Prix virtuel en $/h
% temps_eco        = 0.09;          % Temps économisé par passage (en h)

```

```

% Données initiales
nbr_scen_1 = floor(vie_max/freq_rep)-1;
nbr_scen_2 = floor(vie_max/freq_rep)-1;
% Nombre de scénario de réparation (Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg      = floor(vie_max/freq_deg);
% Nombre de dégradation
% %%%%%%%%%%

rev_brut      = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max,nbr_scen_2);
% Matrice de revenus non actualisés
rev_net       = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,vie_max, nbr_scen_2);
% Matrice de revenus indexés et actualisés

%Calcul des revenus non actualisés, non inflationnés, coût selon aug. de
%valeur résiduelle

for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario_1 = 1 : nbr_scen_1
        for scenario_2 = 1:nbr_scen_2
            if Etat_1(2,1) == 1
                %Si détérioration stochastique seulement
                possible = min(Etat_1((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario_1,
vie_max+1),Etat_2((simulation-1)*nbr_scen_2+scenario_2,vie_max+1));
            else
                possible = 1;
            end
            for annee = 1:vie_max
                rev_brut((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario_1,annee, scenario_2) = 365 *
djma(simulation,annee) * shadow_price * temps_eco * pen_etat((simulation-
1)*nbr_scen_1+scenario_1,annee,scenario_2) * possible;
            end
            end
            display(simulation)
        end
    end

%Calcul des coûts actualisés et indexés
for simulation = 1 : nbr_sim
    for scenario_1 = 1 : nbr_scen_1
        for scenario_2 = 1:nbr_scen_2
            for annee = 1:vie_max
                rev_net((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario_1,annee, scenario_2) = rev_brut((simulation-
1)*nbr_scen_1+scenario_1, annee,
scenario_2)*(1+inf_gen_cumul(simulation,annee))/(1+interet_cumul(simulation,annee));
            end
            end
            end
        end
    end
end

```

C.6 Valeur actualisée nette et analyse

C.6.1 Un seul élément

```
function [npv, npv_total] = NPV(cout_net, rev_net, nbr_sim, vie_max, freq_rep, freq_deg)

% Cette fonction génère les NPV à partir des revenus et des coûts nets

% nbr_sim           = 100;           % Nombre de simulations
% vie_max           = 100;           % Durée de vie maximale
% freq_rep          = 5;             % fréquence de réparation possible
% freq_deg          = 5;             % fréquence de dégradation

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

nbr_scen           = floor(vie_max/freq_rep)-1;           % Nombre de scénario de réparation
(Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_deg            = floor(vie_max/freq_deg);           % Nombre de dégradation
npv_total          = zeros(nbr_sim*nbr_scen,3);         % Matrice d'analyse avec les VAN totales
pour chaque scénario
nbr_etat           = length(transition_matrix);        % Nombre d'états
analyse            = zeros(nbr_sim,5);                 % Matrice d'analyse
rev                = zeros(nbr_sim, vie_max);
cout               = zeros(nbr_sim, vie_max);

npv = rev_net - cout_net;                               % Le NPV est simplement la différence entre
les revenus et les coûts nets

for simulation = 1 : nbr_sim                             % Une matrice avec la somme des NPV pour
chaque scénario de chaque simulation est créée
    for scenario = 1 : nbr_scen
        npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,1) = (scenario - 1)*freq_rep; %année de réparation
pour chaque scénario
        npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,2) = sum(npv((simulation-1)*nbr_scen+scenario,:));
%NPV total pour chaque scénario
        npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,3) = val_res((simulation-1)*nbr_scen+scenario,
(scenario - 1)*freq_rep +1); %Valeur résiduelle lors de la réparation
    end

        analyse(simulation,2) = max(npv_total((simulation-1)*nbr_scen+1:(simulation-
1)*nbr_scen+nbr_scen,2)); % NPV max pour chaque simulation
        analyse(simulation,3) = analyse(simulation,2) - npv_total((simulation-1)*nbr_scen+1,2);
% Gain par rapport à aucune réparation
        analyse(simulation,12) = sum(val_res((simulation-1)*nbr_scen+1,1:vie_max));
% Somme des VR pour le scénario 0 pour savoir le chemin
        for scenario = 1 : nbr_scen
% Année de réparation du scénario optimal
            if analyse(simulation,2) == npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,2)
                analyse(simulation,1) = npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,1);
% Année de réparation
                analyse(simulation,4) = npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,3);
% État lors de la réparation
            end
        end
    end
end
```

```

end
analyse(simulation,13) = inf_gen_cumul(simulation,100);
analyse(simulation,14) = inf_mat_cumul(simulation,100);
analyse(simulation,15) = interet_cumul(simulation,100);
analyse(simulation,16) = sum(djma(simulation,:));
for annee = 1 : vie_max
    rev(simulation,annee) =
((1+inf_gen(simulation,annee))*(1+augmentation(simulation,annee))/(1+interet(simulation,annee)));
    cout(simulation,annee)= (1+inf_mat(simulation,annee))/(1+interet(simulation,annee));
end
end
for simulation = 1 : nbr_sim
    if analyse(simulation,3)==0
        analyse(simulation,1)=0;
    end
end
for scenario = 1 : nbr_scen
analyse(scenario,7) = sum(analyse(:,1)==((scenario-1)*freq_rep));           %Cumul de chacun des
scénario optimaux (répartition des dates optimales)
end
if Etat(2,1) == 1                                                         %Si détérioration
    stochastique seulement
    for etat = 1:nbr_etat
analyse(etat,8) = sum(analyse(:,4)== val_residuel(etat));                 %Cumul des états
(Répartition des états lors de la réparation)
end
for simulation = 1:nbr_sim
    analyse(simulation,5) = sum( val_res((simulation-
1)*nbr_scen+(analyse(simulation,1)/freq_rep)+1,1:analyse(simulation,1))== analyse(simulation,4));
    %Temps dans l'état de réparation avant réparation
end
for simulation = 1:nbr_sim
    analyse(simulation,6) = sum( val_res((simulation-1)*nbr_scen+1,1:vie_max)==
analyse(simulation,4)); %Temps total dans cet état sans répartition (attention 5 ans de transition
en tout temps)
end
for scenario = 1 : nbr_scen
analyse(scenario,9) = sum(analyse(:,5)==((scenario-1)*freq_rep));           % Répartition de
l'attente dans l'état avant réparation
end
analyse(:,10) = analyse(:,6) - analyse(:,5) - 5 ;                         % Temps restant dans l'état
après réparation (si n'a pas lieu)
for scenario = 1 : nbr_scen
analyse(scenario,11) = sum(analyse(:,10)==((scenario-1)*freq_rep));         % Répartition de
temps restant dans l'état après réparation
end
end
for simulation = 1 : nbr_sim
    for annee = 1 : freq_deg : vie_max - freq_deg +1
        degradation(simulation, (annee-1)/freq_deg + 1) = val_res((simulation-1)*nbr_scen+1,
annee);
    end
end
end

```

C.6.2 Un seul élément et deux réparations possibles

```

function [npv, npv_total] = NPV(cout_net, rev_net, nbr_sim, vie_max, freq_rep, freq_deg)

% Cette fonction génère les NPV à partir des revenus et des coûts nets

% nbr_sim           = 100;           % Nombre de simulations
% vie_max           = 100;           % Durée de vie maximale
% freq_rep          = 5;             % fréquence de réparation possible
% freq_deg          = 5;             % fréquence de dégradation

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

nbr_scen           = 155;           % Nombre de scénario de réparation (Réparation à une période
avant la fin est exclus)
nbr_deg            = floor(vie_max/freq_deg);           % Nombre de dégradation
npv_total          = zeros(nbr_sim*nbr_scen,5);       % Matrice d'analyse avec les VAN totales
pour chaque scénario
nbr_etat           = length(transition_matrix);      % Nombre d'états
analyse           = zeros(nbr_sim,5);               % Matrice d'analyse
rev               = zeros(nbr_sim, vie_max);
cout              = zeros(nbr_sim, vie_max);

npv = rev_net - cout_net;                    % Le NPV est simplement la différence entre
les revenus et les coûts nets

for simulation = 1 : nbr_sim                    % Une matrice avec la somme des NPV pour
chaque scénario de chaque simulation est créée
    for scenario = 1 : nbr_scen
        rep = 1;
        state = 4;
        for annee = 1: freq_deg : vie_max
            if cout_brut((simulation-1)*nbr_scen+scenario,annee) ~= 0
                npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,rep) = annee-1; %année de réparation
pour chaque scénario
                npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,state) = val_res((simulation-
1)*nbr_scen+scenario, annee); %Valeur résiduelle lors de la réparation
                rep = rep + 1;
                state = state + 1;
            end
        end
        if scenario > 19
            if npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,2) == 0
                npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,3) = 0;
            else
                npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,3) = sum(npv((simulation-
1)*nbr_scen+scenario,:));
            end
        else
            npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,3) = sum(npv((simulation-
1)*nbr_scen+scenario,:));
        end
    end
end

```

```

        npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,5) = 1;%NPV total pour chaque scénario
    end

    end
end
for simulation = 1 : nbr_sim
analyse(simulation,3) = max(npv_total((simulation-1)*nbr_scen+1:(simulation-1)*nbr_scen+nbr_scen,3)); % NPV max pour chaque simulation
for scenario = 1 : nbr_scen
% Année de réparation du scénario optimal
if analyse(simulation,3) == npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,3)
analyse(simulation,1) = npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,1);
analyse(simulation,2) = npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,2);
analyse(simulation,4) = npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,4);
analyse(simulation,5) = npv_total((simulation-1)*nbr_scen+scenario,5);
if analyse(simulation,1) == 0
    analyse(simulation,4) = 1;
end
end
end
end
end

```

C.6.3 Deux éléments

```

function [npv, npv_total] = NPV2ele(cout_net, rev_net, nbr_sim, vie_max, freq_rep, freq_deg)

% Cette fonction génère les NPV à partir des revenus et des coûts nets

% nbr_sim           = 100;           % Nombre de simulations
% vie_max           = 100;           % Durée de vie maximale
% freq_rep          = 5;             % fréquence de réparation possible
% freq_deg          = 5;             % fréquence de dégradation

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

nbr_scen_1          = floor(vie_max/freq_rep)-1;           % Nombre de scénario de réparation
(Réparation à une période avant la fin est exclus)
nbr_scen_2          = floor(vie_max/freq_rep)-1;
nbr_deg_1           = floor(vie_max/freq_deg);           % Nombre de dégradation
nbr_deg_2           = floor(vie_max/freq_deg);           % Nombre de dégradation
npv_total           = zeros(nbr_sim*nbr_scen_1,10,nbr_scen_2); % Matrice d'analyse avec les
VAN totales pour chaque scénario
nbr_etat            = length(transition_matrix);         % Nombre d'états
analyse             = zeros(nbr_sim,5);                  % Matrice d'analyse

npv = rev_net - cout_net;                                % Le NPV est simplement la différence entre
les revenus et les coûts nets

for simulation = 1 : nbr_sim                               % Une matrice avec la somme des NPV pour
chaque scenario de chaque simulation est créée

```

```

for scenario = 1 : nbr_scen_1
    for scenario_2 = 1 : nbr_scen_2
        npv_total((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,1, scenario_2) = (scenario - 1)*freq_rep; %année
de réparation pour chaque scénario
        npv_total((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,2, scenario_2) = (scenario_2 - 1)*freq_rep;
%année de réparation pour chaque scénario
        npv_total((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,3,scenario_2) = sum(npv((simulation-
1)*nbr_scen_1+scenario,:,scenario_2)); %NPV total pour chaque scénario
    end
end

analyse(simulation,3,1) = max(max(npv_total((simulation-1)*nbr_scen_1+1:(simulation-
1)*nbr_scen_1+3,:))); % NPV max pour chaque simulation
analyse(simulation,4,1) = analyse(simulation,3) - npv_total((simulation-1)*nbr_scen_1+1,3,1);
% Gain par rapport à aucune réparation

for scenario = 1 : nbr_scen_1 % Année de réparation
du scénario optimal
    for scenario_2 = 1 : nbr_scen_2
        if analyse(simulation,3,1) == npv_total((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,3, scenario_2)
            analyse(simulation,1,1) = npv_total((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,1,scenario_2)
% Année de réparation
            analyse(simulation,2,1) = npv_total((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,2,scenario_2);
            analyse(simulation,9,1) = val_res_1((simulation-1)*nbr_scen_1+1, analyse(simulation,1,1)+1);
            analyse(simulation,10,1) = val_res_2((simulation-1)*nbr_scen_2+1,analyse(simulation,2,1)+1);
            revenus(simulation,1:100) = rev_brut((simulation-1)*nbr_scen_1+scenario,1:100,scenario_2);

        end
    end

    analyse(simulation,5,1) = inf_gen_cumul(simulation, 100);
    analyse(simulation,6,1) = inf_mat_cumul(simulation, 100);
    analyse(simulation,7,1) = sum(djma(simulation,:));
    analyse(simulation,8) = interet_cumul(simulation, 100);
end

end

```