

Durée de vie des tabliers de ponts exposés aux sels de déglçage

Rétrospective sur les structures de PJCCI

Par : **Glen Patrick Carlin**, ing Premier dirigeant,
Les Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée
Soufyane Loubar, ing., M.ing., ingénieur senior,
Les Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée

1 Introduction

1.1 Avant-propos

Les enjeux de durabilité relatifs à l'usage de sels de déglçage sur les infrastructures de transport sont énormes et divers notamment sur le plan des coûts d'entretien des structures et sur le plan socio-économique. Les propriétaires des structures dans le nord-est de l'Amérique font face à des défis importants en termes de développement de solutions viables pour les usagers de la route, ainsi qu'en termes de durabilité.

Les tabliers de ponts représentent un des éléments sur lequel ces enjeux se matérialisent pleinement. À cet effet, à travers cette étude, nous avons réalisé un bilan et une analyse comparative de notre expérience en construction et en réfection des tabliers de ponts.

Pour ce faire, nous nous sommes penchés sur la synthétisation et l'analyse de l'ensemble des cas de tabliers historiquement et actuellement présents sur les structures et les tabliers existant actuellement. Cette analyse est basée principalement sur une comparaison de plusieurs types de tabliers selon les conditions de protection et les divers matériaux. Ainsi, l'étude réalisée a permis de déterminer les coûts de cycle de vie pour chacun des cas d'étude sélectionnés. Les coûts de cycle de vie retenus sont annualisés et reportés par mètre carré de surface de tablier. Cet exercice a mis en évidence les écarts importants entre les différents types et différentes configurations des tabliers étudiés, en termes de coût et de durabilité.

En matière d'optimisation des coûts d'investissement et de développement des nouvelles techniques de construction des structures, ce bilan analytique constitue un constat important sur l'évolution de la durabilité des tabliers de ponts ainsi qu'un éclaircissement sur la situation actuelle et sur le besoin criant de soutenir le développement technologique et l'innovation.

Cette étude analytique basée sur des structures, des projets réels et des cycles de vie complétés, permettra sûrement de définir de meilleures orientations en termes de pratiques innovantes dans la gestion des infrastructures, orientées vers la construction durable.

Le problème de manque de durabilité et de dégradation prématurée des structures a forcé les ingénieurs civils à trouver des solutions inusuelles, innovatrices et viables, pour atténuer les conséquences et optimiser les dépenses colossales des projets de réfection des structures.

Jadis, la conception des structures était axée uniquement sur les aspects structuraux de la résistance aux charges, sans accorder suffisamment d'importance à la durabilité permettant d'assurer la durée de vie visée. À cet effet, nous proposons de faire un survol des nouvelles approches de conception axée sur les notions de la durabilité et de la durée de vie utile, car des normes et des outils ont été développés et utilisés durant la dernière décennie sur des projets remarquables et précurseurs, principalement en Europe. Les principes de ces approches sont actuellement en cours d'implantation en Amérique du nord.

1.2 Localisation des structures

À l'exception du tunnel de Melocheville qui constitue un segment de la route 132 et qui se situe à proximité de la centrale de Beauharnois, les structures du réseau de Les Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée (PJCCI) sont situées dans la région métropolitaine de Montréal. Elles permettent le franchissement du fleuve Saint-Laurent entre les villes de Longueuil, Brossard et Châteauguay d'un côté et l'Île de Montréal de l'autre côté. Ces structures sont caractérisées par un fort débit de circulation et par la nature névralgique de leur rôle dans le réseau métropolitain de transport. La Figure 1 ci-dessous illustre la localisation de ces structures.



Figure 1 : Réseau des structures PJCCI

2 Inventaire et spécifications des tabliers

2.1 Les cas d'étude

Dans le but d'en retirer un maximum d'expérience en termes de gestion d'actifs, nous avons trouvé intéressant de réaliser une étude comparative sur l'ensemble des tabliers existants ou déjà remplacés sur les structures du réseau de PJCCI. Cette étude permettra de réaliser une évaluation sur les différents types de tabliers de ponts et sur le système de protection et d'armatures utilisées.

Les écarts importants au niveau de la durée de vie observée sur les différents tabliers de ponts du réseau nous ont poussés à faire une analyse multicritère pour tenter de mieux comprendre les raisons de ces écarts, notamment par l'étude des coûts de cycle de vie. La totalité des tabliers de ponts existants ou déjà remplacés est considérée dans l'étude. Le Tableau 1 indique l'ensemble des tabliers des structures (12 cas d'étude).

Tableau 1 : Les cas d'étude

Réf. Cas	Structures	Type du tablier
1	Pont Champlain : Section 6	Tablier en béton
2	Pont de l'île des Sœurs	Tablier en béton armé
3	Pont H-Mercier (fédéral)	Tablier (6.5 in) en béton armé
4	Pont Clément	Tablier en béton armé
5	Autoroute Bonaventure	Tablier en béton armé
6	Pont Jacques-Cartier (sans sels)	Tablier en béton armé
7	Pont Jacques-Cartier (avec sels)	Tablier en béton armé
8	Pont Champlain : Sections 5 et 7	Tablier à poutres, dalles intercalaires, tablier post-tension transversale
9	Pont Clément	Tablier en béton armé, coulé en place, acier avec revêtement époxydique et membrane
10	Pont Jacques-Cartier	Tablier en béton armé, armatures galvanisées, préfabriqué, BHP pré-tension, et post-tension longitudinale et transversale
11	Pont Champlain : Section 6 (2)	Tablier orthotrope préfabriqué
12	Estacade du Pont Champlain	Tablier (5 et 7 pouces) en béton armé

2.2 Spécifications techniques des tabliers

Les douze (12) cas d'étude ci-haut représentent divers types de tabliers et une multitude de configurations en termes de protection et de type d'armatures. Étant donné que l'ensemble des structures est situé dans une localisation géométrique assez limitée et soumise aux mêmes conditions météorologiques, il est très intéressant d'analyser l'évolution historique de ces différentes configurations de tabliers dans le temps, afin d'en tirer des conclusions sur des expériences à échelle réelle, ainsi que sur les meilleures pratiques en termes de durabilité des tabliers de structures. Le Tableau 2 ci-dessous résume l'ensemble des données techniques des 12 tabliers considérés dans notre étude.

Tableau 2 : Spécifications techniques des tabliers étudiés

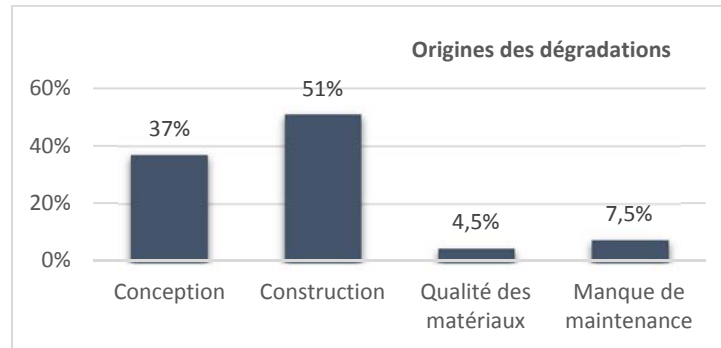
Réf. (cas)	Structures	Type du tablier	Protection	Type d'armatures	Enrobage (mm)	Année de construction / mise en service	Constat de fin de vie	Usage de sels (à partir)	Durée de vie / âge	Notes
1	Pont Champlain : Section 6	tablier en béton	Aucune	Acier noir	50mm	1962	1987	1962	25	
2	Pont l'île des Sœurs	Tablier en béton armé	Pavage de 50 mm	Acier noir	32 mm au-dessus / 25mm au-dessous	1960/1962	2007	1962	47	45 ans avec sels
3	Pont H-Mercier (fédéral)	Tablier (6.5 in) en béton armé	Pavage de 50 mm	Acier noir	50mm	1959	2005	1959	46	45 ans avec sels
4	Pont Clément	Tablier en béton armé	Pavage de 50 mm	Acier noir	50 mm au-dessus / 35 au-dessous	1967	1997	1967	30	30 ans avec sels
5	Autoroute Bonaventure	Tablier en béton armé	Pavage de 50 mm	Acier noir	50mm (min.)	1966	2011	1967	45	45 ans avec sels
6	Pont Jacques-Cartier	Tablier en béton armé	Pavage de 50 mm	Acier noir	25 mm	1930	1954	Sans sels	24	Sans sels
7							1998	1955	68	43 ans avec sels
8	Pont Champlain : Sections 5 et 7	Tablier à poutres, dalles intercalaires, tablier post tension transversale	Imperméabilisé et pavage de 50 mm	Acier noir	25 à 32 mm	1962	2022(*)	1962	60	(*) Projection
9	Pont Clément	tablier en béton armé, coulé en place, acier avec revêtement époxydique et membrane	Imperméabilisé et pavage de 50 mm	Acier avec revêtement époxydique et membrane	50 mm	1997	En service (2016)	1997	19	En bon état
10	Pont Jacques-Cartier	tablier en béton armé, préfabriqué, BHP pré tension, et post tension longitudinale et transversale	Membrane et pavage de 50 mm	Acier galvanisé	50 mm	2001/2002	En service (2016)	2001	15	En très bon état
11	Pont Champlain : section 6 (2)	Tablier orthotrope préfabriqué	Pavage de 50 mm	-	S.O	1991/1992	En service (2016)	1991	25	En bon état
12	Estacade du Pont Champlain	tablier (5 et 7 pouces) en béton armé,	Pavage de 38 mm	Acier noir	25 mm	1965	En service - moins de 1% de détérioration en 2014	Sans sels	51	Sans sels de déglacage et circulation limitée

2.3 Courbes de vie des tabliers

La dégradation d'une structure en béton se développe de manière très différente en fonction des conditions climatiques et du type d'exposition face aux agents agressifs. Dans un climat nordique tel que celui du Québec, les structures en béton soumises aux sels de déglacage subissent les phénomènes suivants : la fissuration interne due au gel-dégel, l'écaillage dû aux sels fondants, la corrosion prématurée des armatures et les réactions alcalis-granulats.

En plus des conditions climatiques et du type d'exposition face aux agents agressifs, les dégradations qui affectent les ouvrages en béton peuvent provenir de quatre autres origines.

Figure 2 : Les origines principales des problèmes de durabilité (Mailvaganam, CRC Press, 1991)



Dans le cadre de notre étude, nous avons décidé de tracer les courbe de vie (de dégradation) de chacun des 12 cas d'étude dans le but de mieux illustrer l'évolution de leur état dans le temps et de pouvoir effectuer des comparaisons technico-économiques.

Le traçage de ces courbes est guidé principalement par la courbe de dégradation typique des éléments en béton armé (indiquée à la Figure 3 ci-dessous). L'évolution de l'état global des tabliers à travers leur durée de vie est basée sur les différentes études d'inspection réalisées périodiquement et dont les données sont disponibles aux archives de PJCCI.

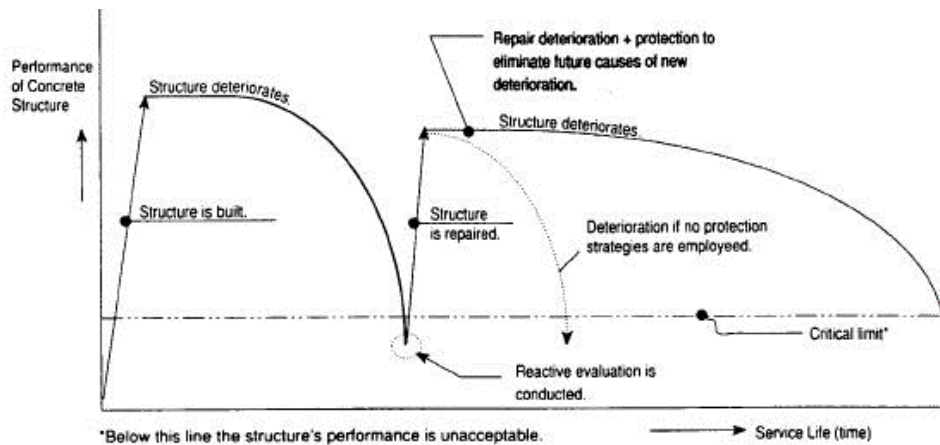


Figure 3 : Courbe de dégradation typique d'une structure en béton

Les courbes de vie (de dégradation) de l'état des tabliers, objet de l'étude sont représentées sur la Figure 4 et sur la Figure 5 sous forme chronologique.

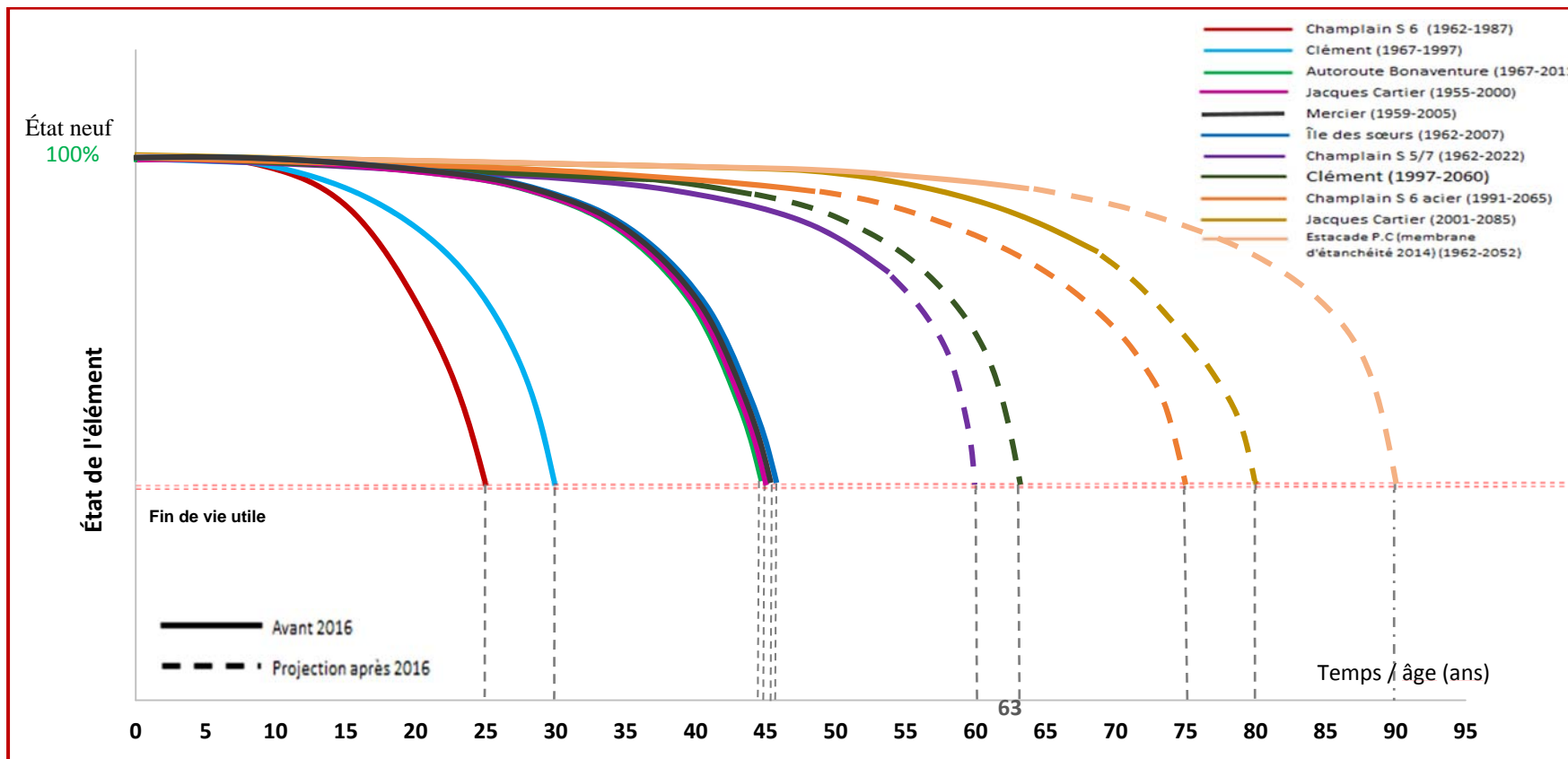


Figure 4 : Courbes de vie (de dégradation) des structures

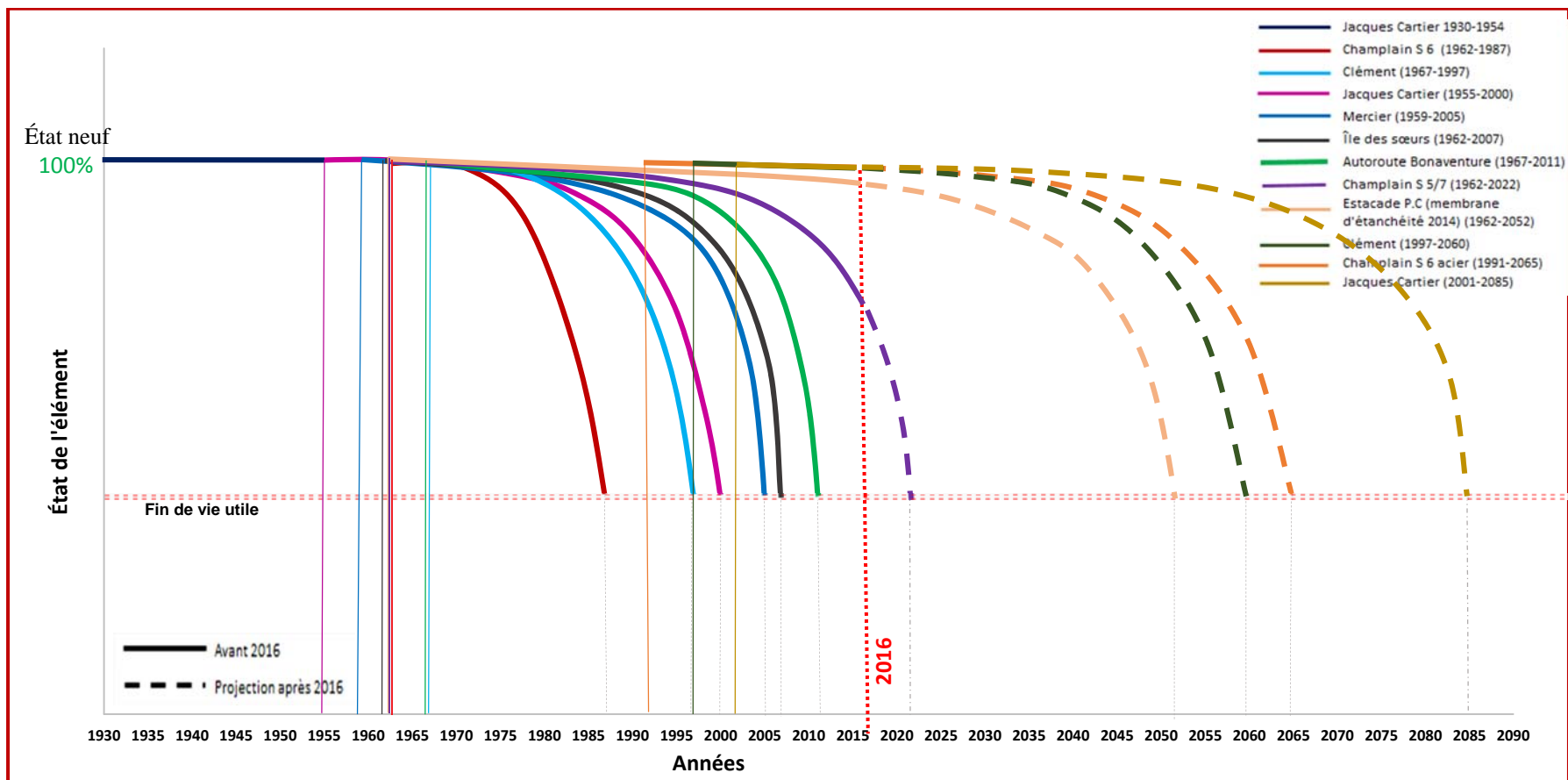


Figure 5 : Courbes de vie (de dégradation) des structures par chronologie

2.4 Bilan des résultats

Les durées de vie observées et projetées présentent des écarts importants variant de 25 ans pour le tablier initial de la Section 6 du pont Champlain à 80 ans pour le tablier préfabriqué actuel du pont Jacques-Cartier (90 ans pour le cas de base de l'estacade du pont Champlain), aussi, on remarque une valeur d'âge récurrente de 45 ans pour un groupe considérable de tabliers, soit le pont de l'Île des Sœurs, le tablier de voies élevées de l'autoroute Bonaventure, le tablier initial du pont Jacques-Cartier (seulement après l'usage des sels de déglacage) et le tablier initial du pont Honoré-Mercier (section fédéral).

L'analyse de l'écart entre la durée de vie de 25 ans de la Section 6 du pont Champlain (cas 1) et le groupe des tabliers indiqué au paragraphe ci-haut (cas 2, 3, 5 et 7 indiqués au Tableau 2 : Spécifications techniques des tabliers étudiés) ayant des durées de vie de l'ordre de 45 ans, nous a mené à considérer que la mise en place d'un revêtement de 50 mm a permis d'allonger les durées de vie de ces derniers tabliers de l'ordre de 20 ans.

Le cas du tablier initial du pont Clément, remplacé à sa trentième année de service, présente les mêmes caractéristiques que le groupe des quatre tabliers indiqués ci-haut. Par contre, sa durée de vie totale est de 30 ans seulement. Le remplacement du tablier du pont Clément en 1997 a fait l'objet d'une étude d'opportunités technique et financière, permettant d'obtenir sur le marché (un coût de remplacement semblable à celui nécessaire à son entretien). L'exécution d'un programme d'entretien semblable à ceux réalisés sur les autres tabliers du groupe de 45 ans, aura donc fort probablement permis de prolonger la durée de vie du tablier du pont Clément de l'ordre de 15 ans.

Deux cas de tabliers présentent une durée de vie totale de l'ordre de 60 ans, il s'agit respectivement des tabliers en béton armé des Sections 5 et 7 du pont Champlain et du nouveau tablier du pont Clément (cas 8 et 9 indiqués au Tableau 2 : Spécifications techniques des tabliers étudiés). Pour le cas du tablier des Sections 5 et 7 du pont Champlain, nous sommes en présence d'un système de précontrainte transversale et d'une imperméabilisation de la dalle, en comparaison au groupe des tabliers de 45 ans (cas 2, 3, 5 et 7), nous pouvons considérer que ces deux éléments ont permis de prolonger leur durée de vie de 15 ans, car la précontrainte contribue grandement à limiter la fissuration de la dalle et l'imperméabilisation minimise l'infiltration des ions chlorure. Pour le cas du nouveau tablier du pont Clément, nous sommes en présence d'armatures en acier avec revêtement époxydique et d'une membrane, nous permettent d'estimer la durée de vie totale de ce tablier de l'ordre de 60 ans grâce aux courbes de dégradations indiquées ci-haut. Dans ce cas, et en comparaison avec le groupe référentiel de 45 ans, nous pouvons considérer que l'intégration de ces deux éléments de protection, soit le revêtement époxydique et la membrane d'étanchéité, permettent une augmentation de la durée de vie de l'ordre de 15 ans.

Les cas de tabliers incluant le nouveau tablier orthotrope actuel de la Section 6 du pont Champlain construit en 1991-1992 et le tablier préfabriqué actuel du pont Jacques-Cartier construit en 2001-2002 présentent respectivement une durée de vie de 75 ans et de 80 ans. Pour le tablier orthotrope de Champlain, une étude commandée par PJCCI, estime, selon un calcul de la fatigue, une durée de vie totale de 75 ans. Suivant l'état actuel de ce tablier métallique et suivant la courbe de dégradation tracée plus haut, nous sommes confiants que la durée de 75 ans sera minimalement atteinte. Donc, nous constatons que le recours à un tablier orthotrope en acier s'avère un choix judicieux en termes de durabilité et par sa légèreté il a permis de soulager la structure métallique du pont, ce qui a permis d'éviter des renforcements onéreux de la structure. L'exercice de courbe de vie réalisée sur le tablier préfabriqué du pont Jacques-Cartier nous indique une durée de vie totale projetée de 80 ans. Il y a lieu de noter pour ce dernier cas, que suivant les différentes inspections réalisées au cours des 15 dernières années, l'évolution et l'état actuel de ce tablier est entièrement satisfaisant et aucun signe de dégradation n'est notable. La technologie utilisée pour la construction de ce tablier est avant-gardiste. Le tablier est en béton armé préfabriqué, avec un

béton haute performance (BHP), les panneaux des dalles sont dotés d'une précontrainte par pré-tension ainsi que d'une post-tension longitudinale et transversale pour l'assemblage. Le tablier du pont Jacques-Cartier (cas 10 du Tableau 2) est armé avec de l'acier galvanisé et couvert par une membrane d'étanchéité et par un pavage de 50 mm. En comparant avec le groupe référentiel de 45 ans cités plus haut (tabliers avec pavage et acier noir), nous estimons que l'intégration de la précontrainte dans le tablier, les armatures galvanisées et la mise en place d'une membrane d'étanchéité sont en voie de nous permettre de prolonger la durée de vie du tablier de l'ordre de 35 ans par rapport à l'ancien tablier notamment (cas 7 du Tableau 2) où une durée de vie de 45 ans est observée à partir du début de l'usage des sels de déglacage sur le pont en 1955.

Il y a lieu de noter que sur l'ensemble des cas d'étude, seulement les deux derniers cas ci-haut, (cas 8 et 9 du Tableau 2), ont atteint la durée de vie de conception indiquée au code de conception des ponts routiers CSA-S6-14.

Le tablier de l'estacade du pont Champlain (cas 12 du Tableau 2) représente un cas référentiel et particulier de notre analyse, où un tablier d'une structure n'est pas soumis aux sels de déglacage et avec un trafic de circulation quasiment nul. À noter que malgré que le tablier est soumis aux rudes conditions hivernales de la région de Montréal, le remplacement du pavage a été réalisé récemment en 2014, après 50 ans de service. Ce cas a permis de mettre en évidence encore une fois l'impact colossal de l'usage de sels de déglacage sur la durabilité des tabliers des structures. Le tablier de cette structure atteindra selon notre estimation une durée de vie totale de 90 ans. La valeur monétaire de cet impact est illustrée par le calcul de cycle de vie présenté dans la section suivante de ce document.

3 Analyse des coûts de cycle de vie (CCV)

Pour illustrer les écarts importants entre les durées de vie observées et pour chiffrer les coûts monétaires des carences importantes en durabilité, nous avons réalisé une étude de coûts de cycle de vie pour l'ensemble des 12 cas représentant la totalité des tabliers du réseau de PJCCI. L'année de référence considérée pour le calcul des coûts est 2016.

Le coût de cycle de vie (CCV) est calculé comme la valeur actualisée des coûts de construction initiaux et des coûts de réparation de la structure.

Des données réelles des coûts de construction et d'entretien de ces tabliers sont utilisées. Les coûts sont actualisés en dollars canadiens (2016) suivant le taux d'inflation et l'outil de calcul fourni par la Banque du Canada. Pour les tabliers toujours en service, nous avons basé le calcul des coûts futurs d'entretien sur la planification des travaux projetés et sur les recommandations d'intervention fournies par les rapports d'inspection réalisés par les firmes de génie-conseil, mandatés par la Société, donc, les coûts des travaux d'entretien futurs sont exprimés en dollar canadien (2016).

Pour obtenir une meilleure comparaison des CCV, nous avons tenu compte de la superficie des tabliers et nous avons annualisé la valeur des CCV, dont la valeur est exprimée en dollars canadien par mètre carré annualisé.

Pour chacun des cas d'étude, un tableau récapitulatif des données de cycle de vie est réalisé, selon le modèle suivant :

Tableau 3 : tableau typique de calcul des CCV

Cas 3 : Pont Honoré Mercier	
Année de construction	1959
Fin de vie	2005
Durée de vie (ans)	46
Coût de construction (en K \$2016)	5 830
Coût d'entretien (en K \$2016)	6 800
Coût de cycle de vie total	12 630
Coût de cycle de vie annualisé (en K \$2016)	280
Coût de cycle de vie annualisé (en \$2016) \$/m²	9.35

Le Tableau 4 et les graphiques de la Figure 6 présentent l'ensemble des résultats de calcul de CCV réalisés pour les 12 cas de l'étude.

Tableau 4 : résultats de calcul des CCV (coûts de cycle de vie)

	Âge	Durée de vie	Coût de construction (\$ 2016)	Coût d'entretien (\$ 2016)	CCV (\$ / an / m ²)	% Construction	% Entretien
Estacade du Pont Champlain	51	87	2 279 000	2 200 000	3,80	53,17	46,83
Pont H-Mercier (fédéral)	46	46	6 703 350	3 000 000	7,03	34,27	65,73
Autoroute Bonaventure	45	45	5 676 400	5 000 000	7,59	85,66	14,34
Pont Jacques-Cartier	68	68	4 800 000	9 207 000	7,79	30,92	69,08
Pont de l'Île des Sœurs	47	47	4 479 793	750 000	8,38	53,17	46,83
Pont Champlain : Sections 5 et 7	60	75	11 503 000	7 581 512	10,13	60,27	39,73
Pont Clément 1997	19	63	1 500 000	2 400 000	9,17	38,46	61,54
Pont Jacques-Cartier 2001	15	84	57 432 332	6 100 000	14,31	90,40	9,60
Pont Clément	30	30	1 800 000	1 500 000	16,30	54,55	45,45
Pont Champlain : section 6 (2)	25	25	34 990 000	1 650 000	26,38	95,50	4,50
Pont Champlain : Section 6	25	25	5 400 000	11 483 150	36,76	31,98	68,02

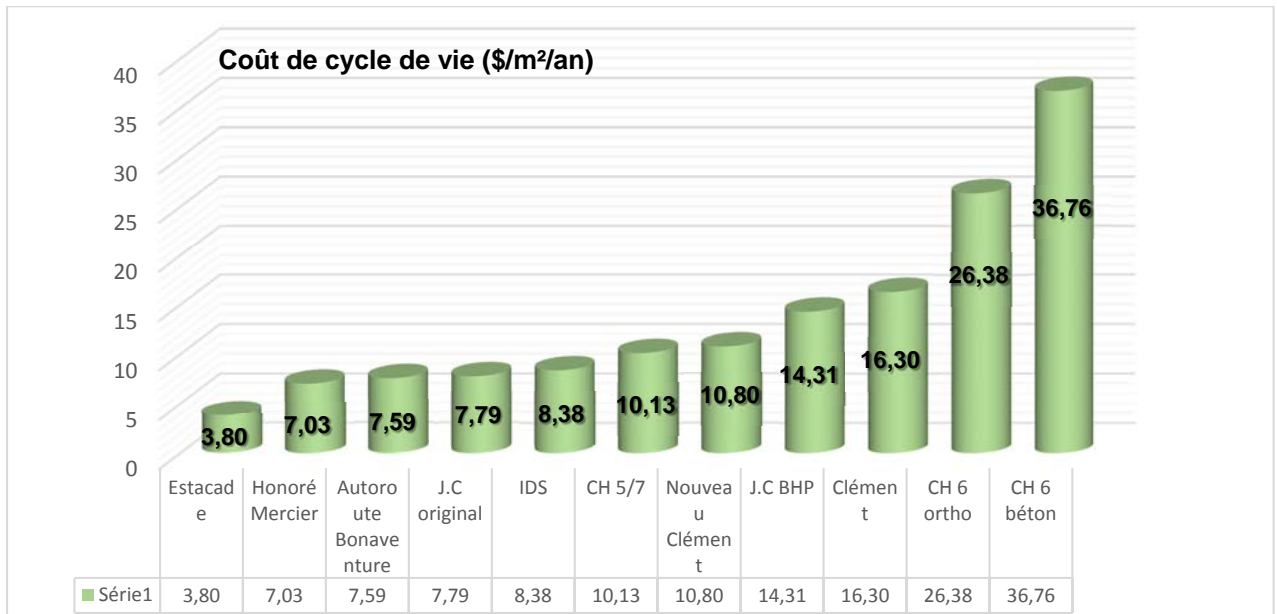
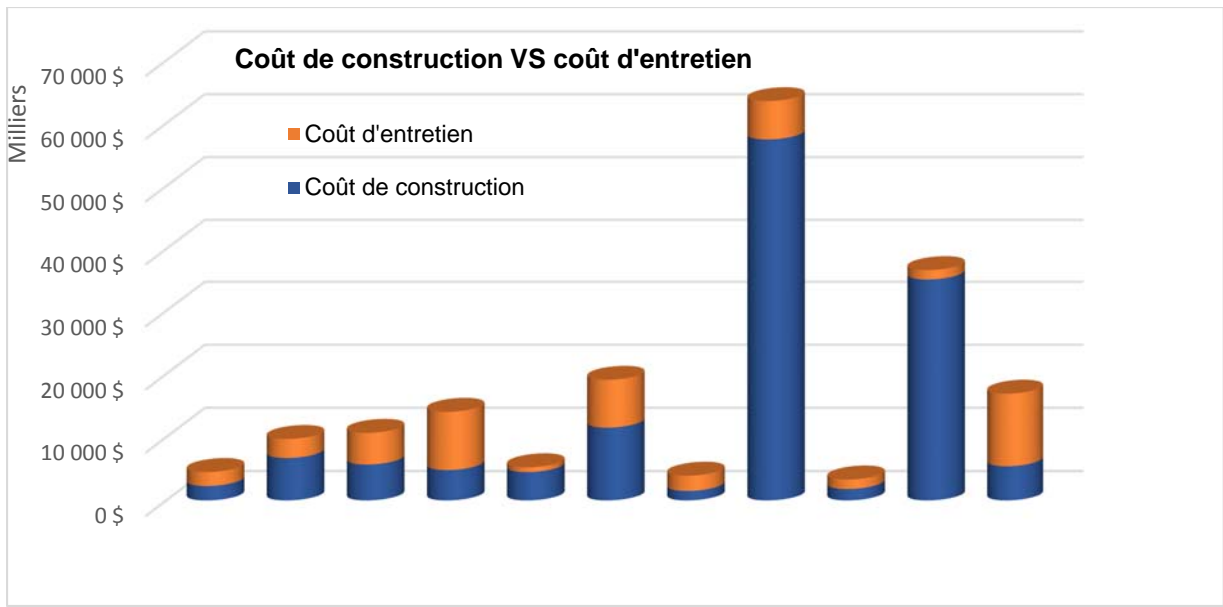


Figure 6 : CCV (construction Vs entretien) et CCV en \$/m²/an

Le constat global sur les résultats des valeurs de CCV indiqués à la Figure 6 ci-haut, peut être résumé comme suit :

- Les écarts entres les valeurs de CCV sont très importants entre les différents types et configurations des tabliers;
- Les tabliers les plus récents qui intègrent des techniques plus avancées de construction présentent des valeurs de CCV de l'ordre de 10 à 15. Par contre, le pourcentage de coût d'entretien est beaucoup plus faible que celui du coût de construction avec moins d'interventions sur les voies de circulation. Le niveau de service de ces tabliers est le plus élevé de l'ensemble des cas considérés.
- Le tablier orthotrope présente un coût de cycle de vie sensiblement plus élevé par rapport au tablier en béton armé, par contre, il offre aussi un niveau de service exceptionnel étant donné que le coût d'entretien est quasiment nul.

- Le tablier actuel du pont Jacques-Cartier en dalles préfabriquées présente une valeur de CCV très appréciable par rapport au niveau de service qu'il offre et constitue sur l'ensemble des tabliers, objet de l'étude, le choix le plus judicieux en termes de durabilité et de niveau de service aux usagers.

4 Perspectives de durabilité

4.1 Avant-propos

Historiquement, la conception des structures était axée uniquement sur les aspects techniques structurels, soit le choix des matériaux par leurs propriétés de résistance (f'_c , f_y) et le dimensionnement des composants pour résister aux charges. Ces éléments sont extrêmement importants, mais ils ne contribuent pas à s'assurer qu'une structure restera en service pour une période de temps donnée ou souhaitée.

Le processus de vieillissement et de la détérioration doit être connu et contrôlé. En résumé, la conception d'un système pour une durée de vie définie se traduira par la robustesse du système et la redondance des composants sélectionnés et par la prévoyance axée sur les coûts et le rendement du cycle de vie.

Donc, nous proposons de faire un survol des nouvelles approches de conception axées sur les notions de la durabilité et la durée de vie utile.

Des normes et des outils ont été développés et utilisés durant les deux dernières décennies sur des projets remarquables et précurseurs, principalement en Europe.

4.2 Service Life Design (SLD)

Service Life design est une approche de conception pour résister à la détérioration causée par les actions environnementales, aussi appelée conception pour la durabilité.

Pour les besoins de la conception axée sur la durabilité, des recherches importantes ont été réalisées au cours des 25 dernières années sur le processus de détérioration des matériaux avec le temps (en particulier pour le béton) et des modèles mathématiques ont été développés pour modéliser ces détériorations.

Ces modèles sont basés sur le principe que tous les matériaux se détériorent avec le temps et ce, à un rythme unique qui dépend de l'environnement auquel le matériau est exposé et du système de protection mis en place.

La Figure 7 présente un des modèles de base de la détérioration selon l'âge de la structure, basé sur l'ampleur des actions environnementales et des propriétés de résistance des matériaux. Ce modèle est basé sur la 2^{ème} loi de Fick (Figure 7 8) qui permet de modéliser le temps pour l'initiation de la corrosion dans un béton non fissuré (fissures < 0.3 mm ou 0.012").

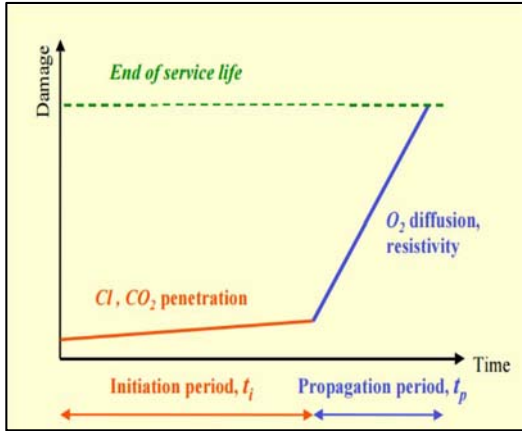


Figure 7 : modèle de détérioration de structure

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{app} \cdot c \cdot t}} \right) \right) \leq C_{crit}$$

$C(x, t)$	Chloride concentration at depth & time	kg/m ³
x, t	Depth from surface / time	mm, yr
erf	Mathematical error function	-
C_{crit}	Critical chloride content (to initiate corrosion)	kg/m ³
C_0	Initial chloride content of the concrete	kg/m ³
C_s	Chloride concentration at surface	kg/m ³
$D_{app} \cdot c$	Apparent coefficient of chloride diffusion in concrete	mm ² /yr

La loi de Fick décrit le flux d'une espèce et sa concentration en fonction du temps t et de la distance x .

Figure 8 : la 2^{ème} loi de Fick

4.3 Documents normatifs de la conception pour la durée de vie

4.3.1 FIB Bulletin 34 : Code de conception pour la vie utile

Publié en 2006 par la fédération internationale du béton (FIB), le FIB bulletin 34 a été développé par le projet de recherche européen DuraCrete. L'approche a depuis été intégrée dans le FIB Bulletin 34 et la norme ISO 16204.

L'idée fondamentale du document FIB Bulletin 34 est d'établir les bases de la conception pour la durée de vie et d'établir une approche de conception de façon à éviter la détérioration causée par l'action environnementale comparable aux charges de la conception que nous avons l'habitude d'avoir dans nos codes de conception.

Suivant le modèle Code FIB Bulletin 34, les étapes de la conception sont comme suit (Schiesl & all., 2006) :

Tableau 5: les étapes de la conception pour la durabilité

Stratégies	Étapes	Objectifs
STRATÉGIE A - Approche probabiliste - basée sur la même philosophie de conception qui est à la base des codes de conception structurale moderne. STRATÉGIE B – Évitement de la détérioration - éviter la dégradation causée par l'exposition à des environnements agressifs grâce à la sélection de matériaux non réactifs pour éviter le mécanisme de dégradation.	1	Quantifier le mécanisme de détérioration avec des modèles réalistes décrivant le processus physique ou chimique avec une précision suffisante (Ex : la pénétration de la carbonatation dans le béton)
	2	Définir les états limites pour lesquels la structure doit être conçue. Les états limites appropriés sont : la perte de la passivation de l'armature, la fissuration, l'écaillage du béton et finalement l'effondrement causé par la perte de sections des armatures.
	3	Calculer la probabilité que les états limites définis ci-dessus se réalisent (détermination de la probabilité d'occurrence).
	4	Définir le type des états limites (SLS, ULS). Normalement, les pertes de la passivation seront considérées comme une SLS, car il n'y a aucune conséquence immédiate sur la sécurité des structures. L'approche intègre deux stratégies possibles de durabilité (A et B) qui sont choisies sur la base du niveau de fiabilité requis et en tenant compte des modèles disponibles.

Analyse et définition des paramètres

La pénétration des ions de chlorure est modélisée selon la 2^{ème} loi de Fick pour déterminer la concentration des ions de chlorure au niveau de l'armature.

Le coefficient de migration des chlorures est mesuré en utilisant le test NTBuild 492-Test de migration rapide des chlorures (Figure 9). Ce test est effectué à 28 jours sur un échantillon découpé à partir d'un cylindre standard. Ces données sont utilisées pour calculer la vitesse à laquelle les chlorures pénètrent dans le béton; ce taux est appelé le coefficient de migration des chlorures et est un paramètre d'entrée dans l'analyse de la durée de vie.

Les deux premières applications en Amérique du Nord ont été faites sur les ponts Tappan Zee Hudson River et Ohio River Bridges aux États-Unis. Au Québec et au Canada, la première application de cette méthode sera fort probablement effectuée sur le nouveau pont Champlain, car une durée de vie de 125 ans est exigée et tel que spécifié dans le devis technique, elle devrait être basée sur la méthode FIB (bulletin 34).

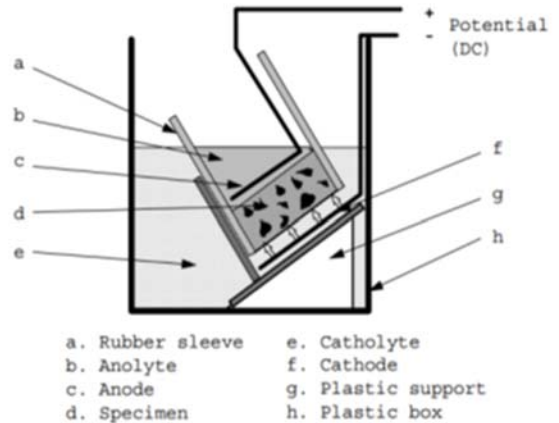


Figure 9 : NTBuild 492 Test de migration rapide des chlorures (Nordtest, 2015)

4.3.2 La norme ISO 16204

La norme ISO 16204 (Service life design of concrete structures) est basée sur les principes donnés dans la norme ISO 2394, sur les principes généraux sur la fiabilité des structures et la norme ISO 13823 et sur les principes généraux relatifs à la conception de structures pour la durabilité.

Cette norme internationale éditée en 2012 est le premier document qui donne un cadre normatif à la conception pour la durée de vie.

Deux (2) stratégies ont été adoptées dans la norme; dans la première, on distingue trois (3) niveaux de sophistication. Au total, quatre (4) options sont disponibles :

Stratégie 1: Conception pour résister à la détérioration

Niveau 1 - Méthode entièrement probabiliste (option 1)

Niveau 2 - Méthode du facteur partiel (option 2)

Niveau 3 - Méthode Deemed-to-satisfy (option 3)

Stratégie 2: Méthode évitement de détérioration (option 4)

4.4 Les outils d'analyse de la durabilité du béton

Des outils d'analyse de la durée de vie ont été développés pour répondre aux besoins grandissants en durabilité. Pour considérer cet aspect dans la conception des structures et la gestion des actifs, ces outils intègrent les données de l'environnement dans lequel la structure est appelée à servir. Ils représentent des outils puissants pour l'aide à la décision. Dans le présent chapitre, nous présentons à titre d'exemple et non pas à titre limitatif les deux outils les plus connus à notre connaissance, d'autres outils comparables existent fort probablement.

4.4.1 STADIUM® analyse de la durabilité

STADIUM® est un outil d'analyse de la durabilité du béton développé pour répondre aux besoins des propriétaires d'infrastructures en béton, qui cherchent à mesurer la durabilité à long terme pour les structures nouvelles et existantes.

Cet outil simule les modifications physiques et chimiques dans le béton, car il réagit avec son environnement, en tenant compte des variables dans le béton tels que la composition chimique, la perméabilité, les coefficients de diffusion d'ions, les coefficients de transport de l'humidité, la tortuosité, et de nombreux autres facteurs, ainsi que des conditions d'exposition telles que l'humidité ambiante, la température, et l'agressivité chimique. Il est utilisé pour sélectionner des mélanges de béton pour les applications marines, basées sur certains objectifs de rendement (Samson, 2014).

Il nécessite normalement une analyse approfondie en laboratoire du béton utilisé afin de fournir des valeurs précises pour les paramètres concrets qui ont une influence sur la durabilité du béton. Pour ce faire, le seul test de laboratoire nécessaire est l'ASTM C 642 (Méthode d'essai standard pour la densité, absorption, et les vides dans le béton durci). Tous les autres paramètres nécessaires seront fournis dans l'EPD STADIUM® transposé la grille de propriétés en fonction de la pâte de ciment. Ces valeurs sont prises à partir des extrapolations de la base de données STADIUM®, et ne sont donc que des approximations et des estimations et ne seraient pas utilisées dans des situations typiques de modélisation (Samson, 2014).

Le département américain de la défense reconnaît que STADIUM® est l'unique outil numérique précis pour la prédiction du comportement à long terme des structures en béton armé exposées à des environnements marins (Samson, 2014).

Le programme permet, suite à une analyse paramétrique des données, de définir la courbe d'initiation et de propagation de la corrosion dans le béton (Figure 10) et propose les différents scénarios d'intervention, soit pour la réfection et pour la protection initiale du béton (Figure 11).

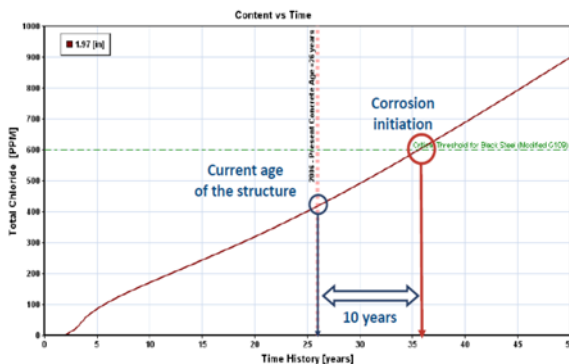


Figure 10 : La courbe d'initiation et de propagation de la corrosion (Samson, 2014)

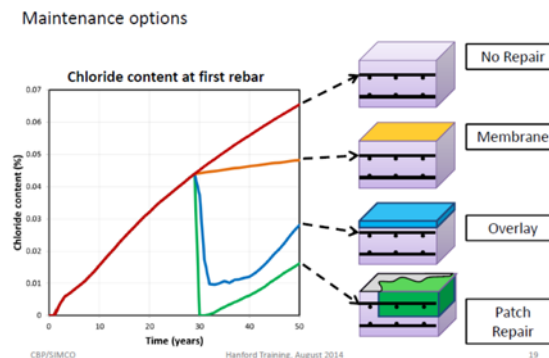


Figure 11 : Scenarios de réfection - Protection (Samson, 2014)

4.4.2 Life-365™ Service Life Prediction Model™

Un autre modèle d'analyse récent pour la conception axée sur la durée de vie est le modèle d'analyse Life-365™.

Life-365™ a été produit comme modèle complet pour prédire le coût de cycle de vie associé aux structures en béton armé exposées aux chlorures. Basé sur le modèle de Tuutti (1982), la structure de Life-365™ peut être divisée en quatre étapes successives:

1. Prévoir le temps de l'apparition de la corrosion de l'acier d'armature, appelé communément la période d'initiation, t_i ;
2. Prévoir le temps pour la corrosion de parvenir à un niveau inacceptable, communément appelé la période de propagation, t_p ; (À noter que le premier temps de réparation, t_r , est la somme des deux (2) périodes: à savoir $t_r = t_i + t_p$);

3. Déterminer le calendrier des réparations après la première réparation; et
4. Estimer le coût du cycle de vie basé sur le béton initial (et autres), la protection, les coûts et les futurs coûts de réparation.

La période d'initiation, T_i , définit le temps qu'il faut pour que les chlorures pénètrent dans la couverture de béton en quantité suffisante pour initier la corrosion de l'acier. Plus précisément, il représente le temps pris pour atteindre le seuil de la concentration critique de chlorures, **C_t** , pour atteindre la profondeur de la couverture, **x_d** . Life-365™ utilise une approche simplifiée, basée sur la diffusion de Fick qui ne nécessite que de simples entrées de l'utilisateur.

Les conditions d'exposition de chlorure (par exemple, le taux de chlorure à la surface et la teneur maximale de chlorure) sont fixées par le modèle basé sur l'une des trois alternatives suivantes :

- Life-365™ fournit une base de données de valeurs en fonction du type de structure (par exemple, pont, structure de stationnement), le type d'exposition (par exemple, au transport maritime ou des sels de déglçage), et la situation géographique;
- L'utilisateur peut entrer ses propres données pour ces paramètres;
- L'utilisateur peut calculer une concentration maximale de surface en fonction des niveaux de chlorure mesurés en utilisant la norme ASTM c1556 (et entrer ses propres données sur les temps d'accumulation).

Le calendrier des réparations

Le temps de la première réparation, **t_r** , est prédit par Life-365™ à partir d'une prise en compte des propriétés du béton, la stratégie de protection contre la corrosion, et l'exposition de l'environnement. L'utilisateur doit estimer le coût et l'ampleur de cette première réparation (à savoir le pourcentage de zone à réparer) et l'intervalle fixe sur laquelle les futures réparations sont effectuées.

Le coût de cycle de vie

Life-365™ suit la direction et la terminologie de la norme ASTM E 917 pratique standard pour estimer le coût du cycle de vie des systèmes de construction. Cela inclut le processus suivant :

5 Conclusion

L'analyse rétrospective réalisée sur la durabilité des 12 cas concrets de tabliers soumis aux sels de déglacage, situés dans le même environnement et soumis aux mêmes méthodes de déneigement et d'entretien, constitue une expérience à échelle réelle très intéressante.

L'étude de cycle de vie a permis de mettre en évidence des écarts importants en termes de durabilité entre les différents types et différentes configurations des tabliers. Une carence en durabilité qui se traduit par un manque à gagner important en investissement. L'impact de l'usage des sels est mis en évidence par le calcul de coût du cycle de vie, où la valeur du CCV par mètre carré est multipliée de 3 à 6 fois pour les structures soumises aux sels de déglacage. Le cas de la Section 6 du pont Champlain démontre que la valeur du CCV a atteint un niveau extrême, soit trois fois supérieur à la valeur moyenne observée sur la majeure partie des tabliers étudiés.

Le revêtement en béton bitumineux d'une épaisseur de 50 mm a permis de prolonger la durée de vie d'environ 20 ans et l'intégration de la précontrainte dans un tablier est bénéfique pour limiter la fissuration du béton et prolonger la durée de vie d'un tablier de 15 ans.

Un tablier orthotrope en acier peut s'avérer une solution intéressante pour alléger une structure, fournir une durée de vie prolongée et offrir un niveau de service élevé aux usagers de la route.

Il existe aujourd'hui des moyens pour prolonger la vie d'un tablier en béton tels que l'utilisation de l'acier galvanisé ou l'acier inoxydable, l'utilisation du béton à haute performance, la membrane d'étanchéité ainsi que l'application de la précontrainte.

Les coûts initiaux additionnels relatifs à l'usage des systèmes de protection des armatures, l'intégration des nouveaux bétons et de la précontrainte sont totalement justifiés par des coûts de cycle de vie plus adéquats d'un part et par le niveau de service observé sur ces tabliers, tel que le tablier actuel du pont Jacques-Cartier et le tablier orthotrope de la section 6 du pont Champlain.

L'introduction et le développement de nouvelles façons de faire en termes de conception durable sont nécessaires pour optimiser les coûts et améliorer le niveau de service aux usagers.

Les opportunités d'amélioration offertes par la nouvelle approche de conception pour la durée de vie (SLD : Service Life Design) sont réelles et les retombées économiques de l'innovation dans le domaine de la conception pour la durabilité sont prometteuses.

Références :

- Noel P. Mailvaganam. (1991). Repair and protection of concrete structures. CRC Press.
- Emmons. (1992). P-H concrete repair and maintenance illustrated,
- Banque du Canada. (2016). Feuille de calcul de l'inflation : <http://www.banqueducanada.ca/taux/renseignements-complementaires/feuille-de-calcul-de-linflation/>
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete.*, Stockholm: Swedish Cement and Concrete Institute.
- Nordtest. (2015, 05 15). *Nordtest*. Récupéré sur Nordtest: <http://210.42.35.80/G2S/eWebEditor/uploadfile/20110819235419966.pdf>
- Eric Samson. (August 2014) STADIUM Software Overview. Durability and Service Life of Concrete Structures (Cementitious Barriers Partnership ,SIMCO Technologies Inc)
- Schiessl, P., & all., e. (2006). *fib 34 - Model code for service life design of concrete structures*. fib (fédération internationale du béton).
- ISO 16204 Durability — Service life design of concrete structures / Durabilité — Conception de la durée de vie des structures en béton , First edition 2012-09-01
- Fib 34 :Model Code for Service Life Design , fédération internationale du béton (fib), 2006