

Évaluation de la condition d'état d'un pont en béton combinant l'inspection visuelle avec un modèle de prévision non linéaire de la détérioration

Abdoul Salam Bah

Email: abdoul-salam.bah.1@ulaval.ca

Thomas Sanchez, Kotaro Sasai, Yan Zhang,
David Conciatori, Luc Chouinard, Gabriel John Power, Nicolas Zufferey

Université Laval, McGill, Université de Genève

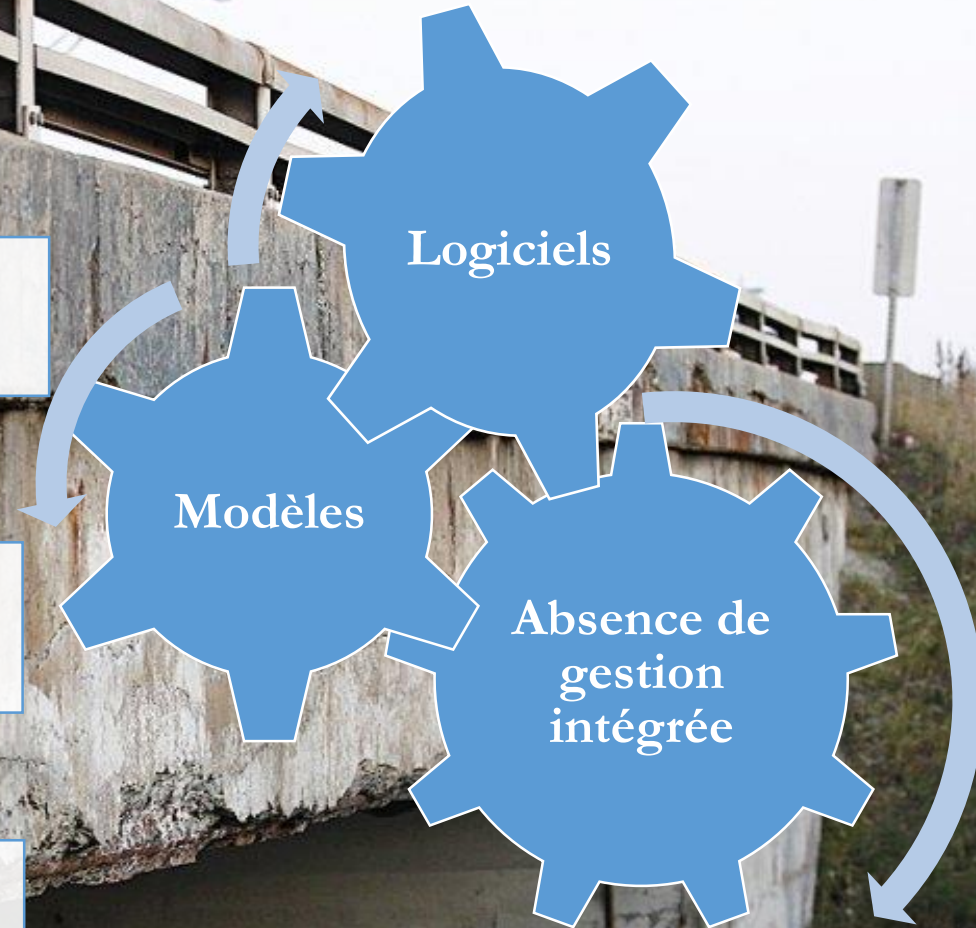
Projet SGOMI: Système de Gestion Optimisée de la Maintenance des Infrastructures

Contexte

Vieillesse & détérioration

Forts investissements pour la gestion des ouvrages

Surveiller, ausculter, maintenir & remplacer.



© lapresse.ca

Contexte

2014/2015

64 ouvrages à tonnages réduit

88 interdits aux surcharges

8 affichés fermés.

2017/2027

17,9 milliards de dollars

Plan Québécois des infrastructures

Maintien & remplacement

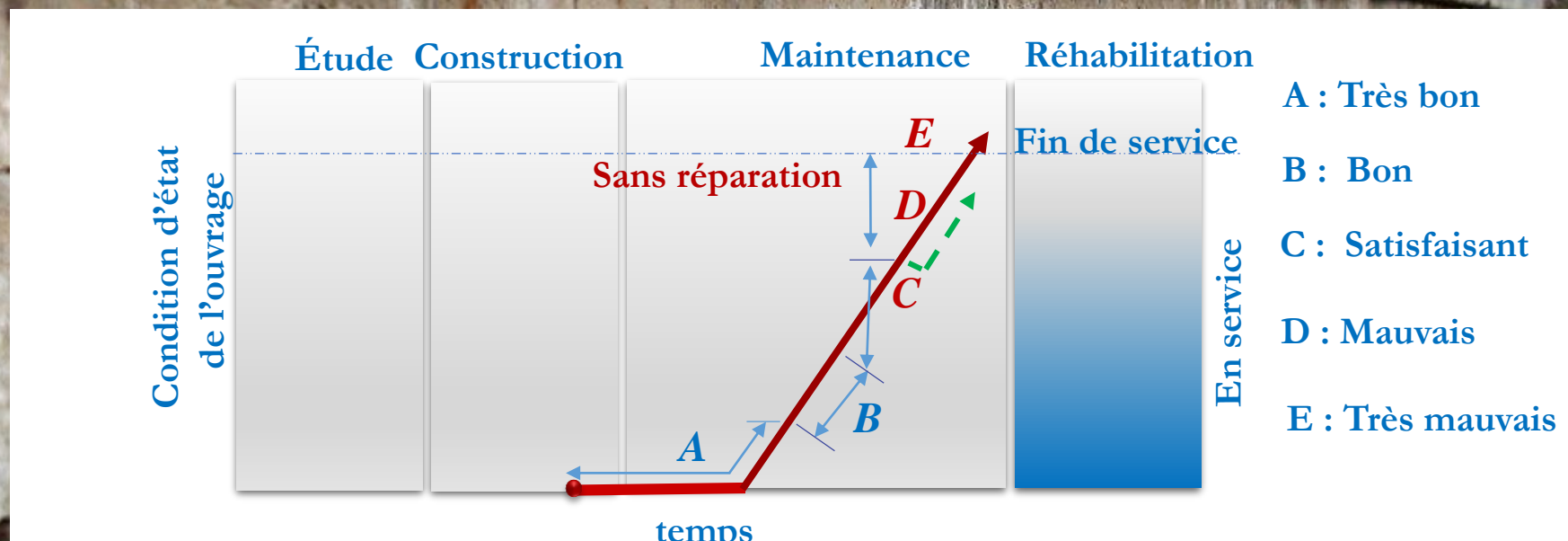
Plan Québécois des Infrastructures 2017-2027

@Cieufm

Contexte

Bilan de l'état des structures 2018

	Quantité	Dimension	Âge moyen (ans)	% Inspection	Indice d'état (%)			Indice d'état moyen	Déficit de maintien d'actifs (M\$)
					ABC	D	E		
Ouvrages de génie civil									
Structures Réseau supérieur	5454	5 019 122 m ²	39	100	Selon le nombre			C	8 651,8
					76	7	17		
					Selon la valeur				
					53	8	39	C	



© lapresse.ca

Contexte



©Eurochem

Inspection visuelle

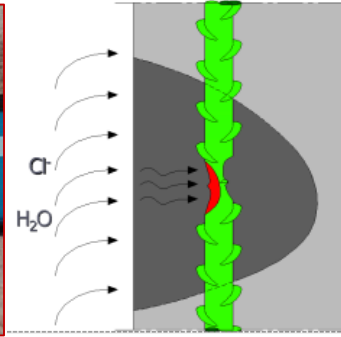


©Adorama

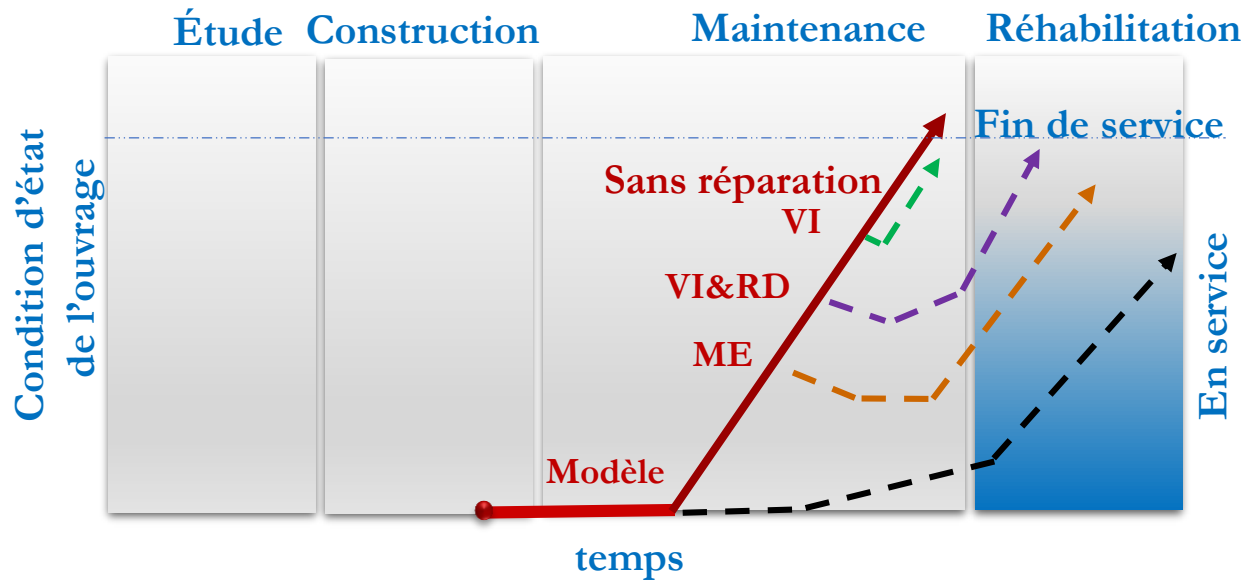
Inspection & Robot/Drone



Mesures électrochimiques



Modèles



Contexte

➤ Actuels systèmes de gestion des ouvrages

<i>Logiciels</i>	<i>Modèles de gestion</i>
PONTIS	Optimisation par ouvrage <i>↪ FHWA, 1989</i>
BRIGITE	Assez peu employé par les états américains et son avenir est de plus incertain <i>↪ NCHRP 12-28(2), 1994</i>

<i>KUBA</i>	<i>DANBRO</i>	<i>FINNRA</i>
<ul style="list-style-type: none">• Suisse <i>↪</i> <i>Hajdin, R., Grob, J., 1995</i>	<ul style="list-style-type: none">• Danemark <i>↪</i> <i>Henriksen A, et Danbro BMS 1999</i>	<ul style="list-style-type: none">• Finlande <i>↪</i> <i>Soderqvist M.-K., and Veijola, M., 1999</i>

↪ Plan Québécois des Infrastructures 2017-2027

©Cieufm

➤ Actuels systèmes de gestion des ouvrages

- Différentes approches

Jugement de l'ingénieur

BRIME 2001

- Belgique; France; Allemagne; Irlande

Systèmes conçus à l'interne

ATC, Canada 2016

- Canada

❖ 2014, l'ISO a publié la norme ISO 55000:2014

(Gestion d'actifs – Aperçu général, principes et terminologie)

➤ Modèles de prédiction d'endommagement

Phreeqc

Sanchez et al., 2018

Stadium

Samson et al., 1999

Ms Diff

Truc et al., 2000

Masi

Masi et al., 1997

TransChlor[®]

Conciatori et al., 2010

Conditions de bord spécifiques :

- chlorures et sulfates
- Na⁺, K⁺, Cl⁻ et OH⁻
- champ électrique
- ions chlorures par diffusion
- réactions chimiques
- diffusion thermique
- carbonatation
- exposition & microclimat

Shin

Shin et al., 2001

Ishida

Ishida et al., 2000

Schmidt-Döhl

Schmidt Dohl et al., 1999

Saetta

Saetta et al., 1993

Meijers

Meijers et al., 2003

ClincConc

Tang et al., 1996

Très peu de gestionnaires utilisent ces logiciels

↪ *Garvin, M.J. et al 2004*

Contexte

➤ Projet de recherche équipe SGOMI

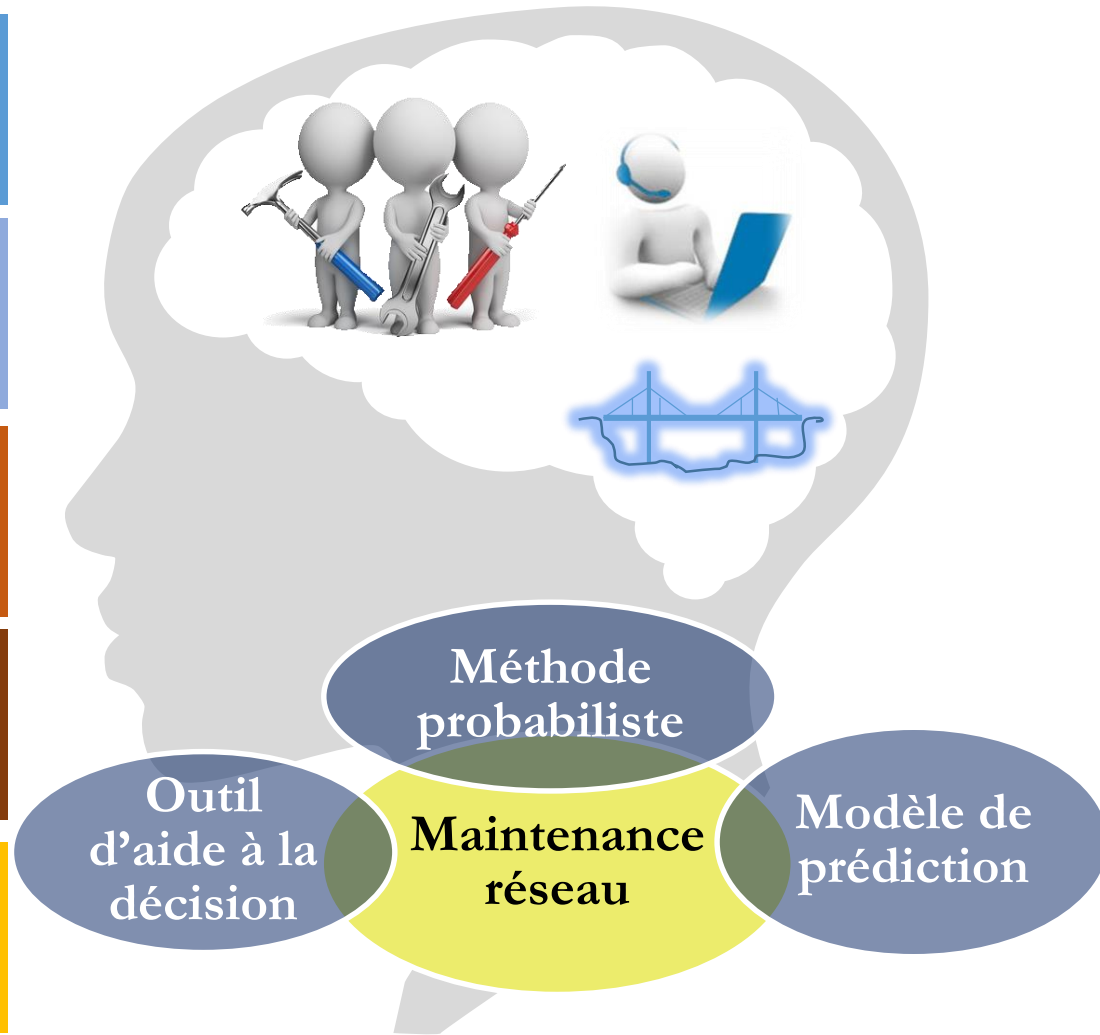
S SYSTÈME
Outils

G GESTION
Des ouvrages du réseau routier

O OPTIMISÉ
L'ensemble des activités

M MAINTENANCE
Preventive & Quantitative

I INFRASTRUCTURE
D'une entreprise, ville ou province.



Contexte

➤ Équipe de recherche SGOMI

Pluridisciplinaire (Laval,
McGill, Genève)

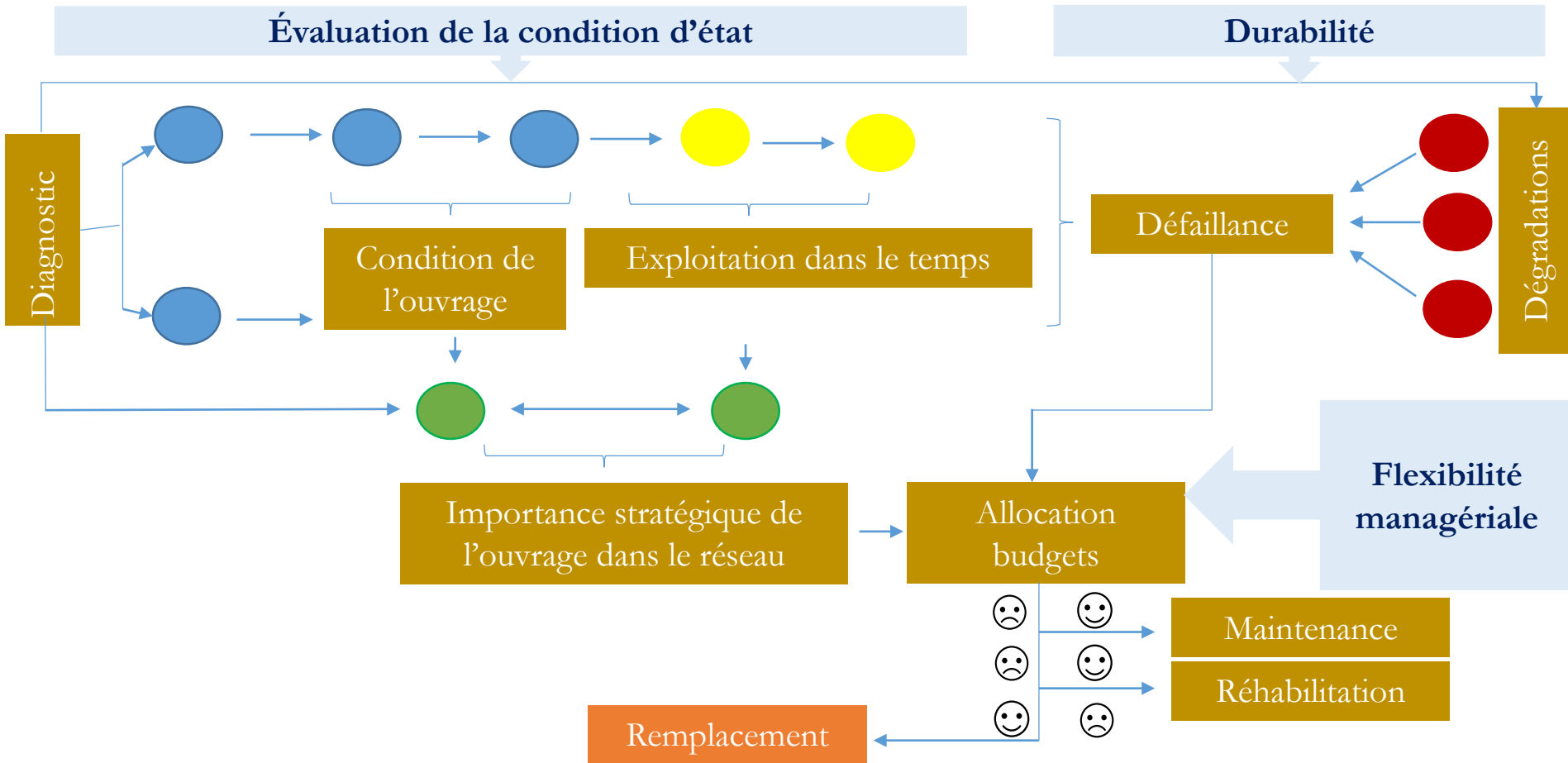
- Structure
- Matériaux
- Fiabilité des structures
- Finance
- Optimisation des systèmes

Laval
McGill

- Abdoul Salam Bah (Évaluation de la condition d'état)
- Yan Zhang (Durabilité)
- Kotaro Sasai (Flexibilité managériale)

© lapresse.ca

➤ Processus d'optimisation échelle du réseau (SGOMI)



Plan

➤ Évaluation de la condition d'état

Objectifs

Méthodologie

Résultats

Conclusions & travaux futurs

©Levis

Objectifs

Condition de l'ouvrage

Condition d'exploitation

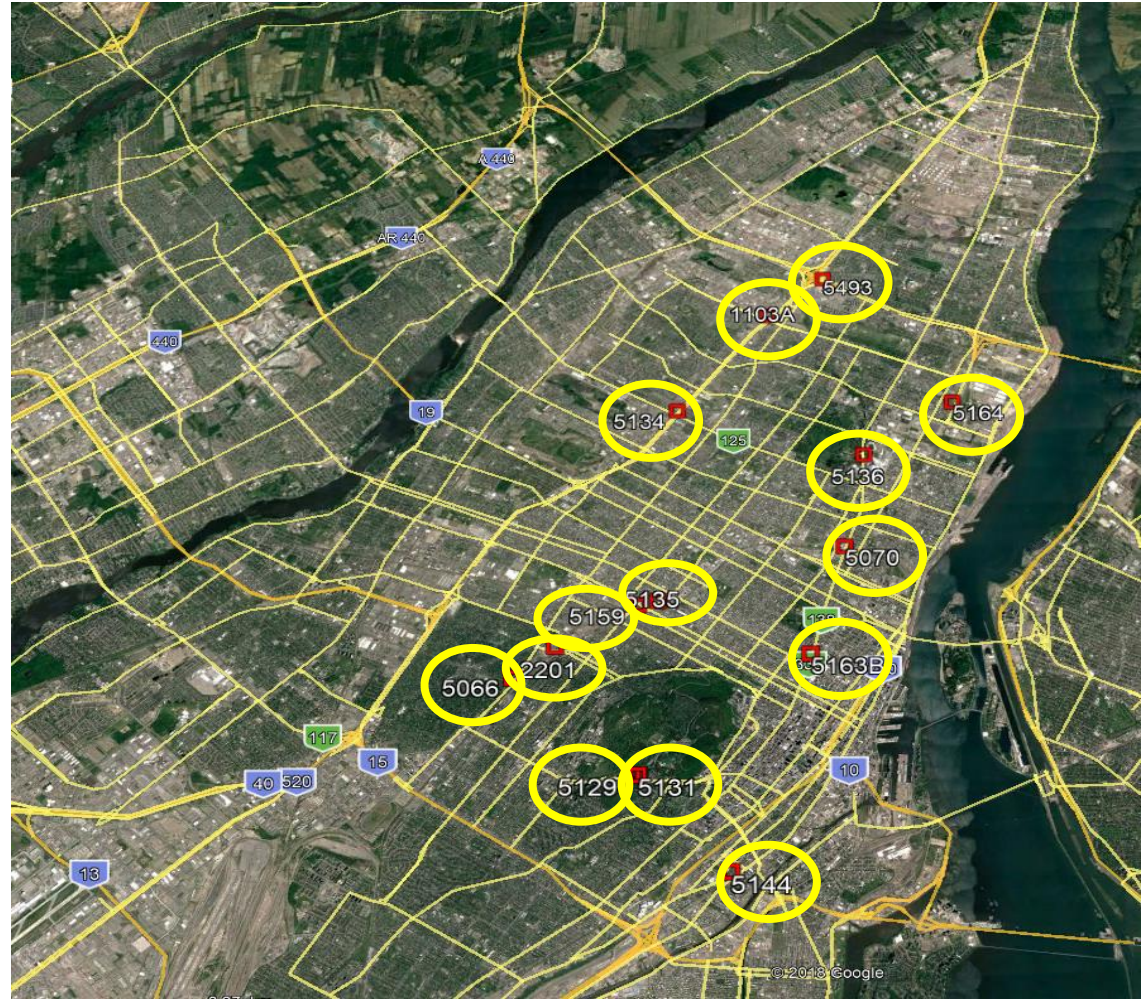
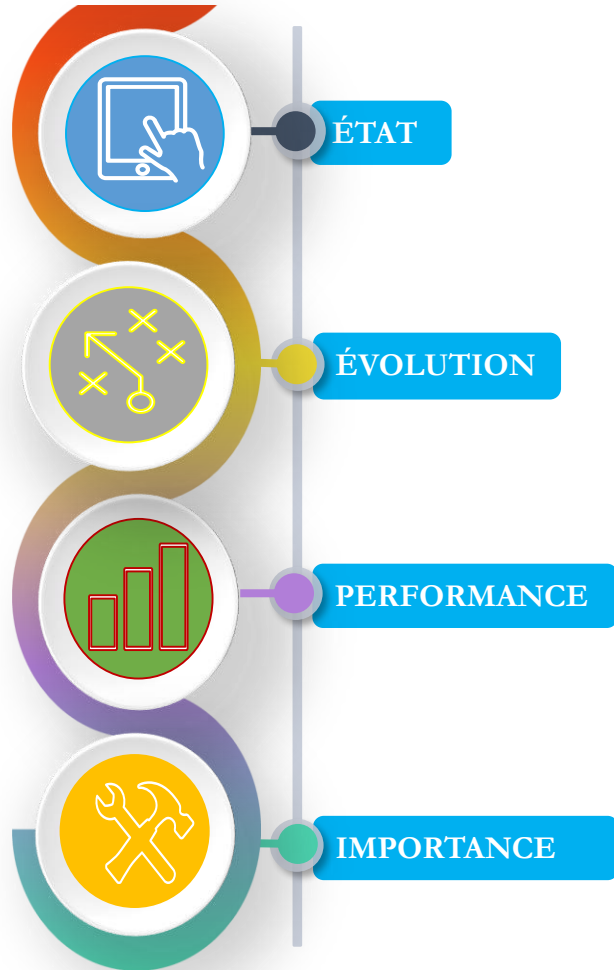
Gestion intégrée

Maintenance

© mi2d.fr.php

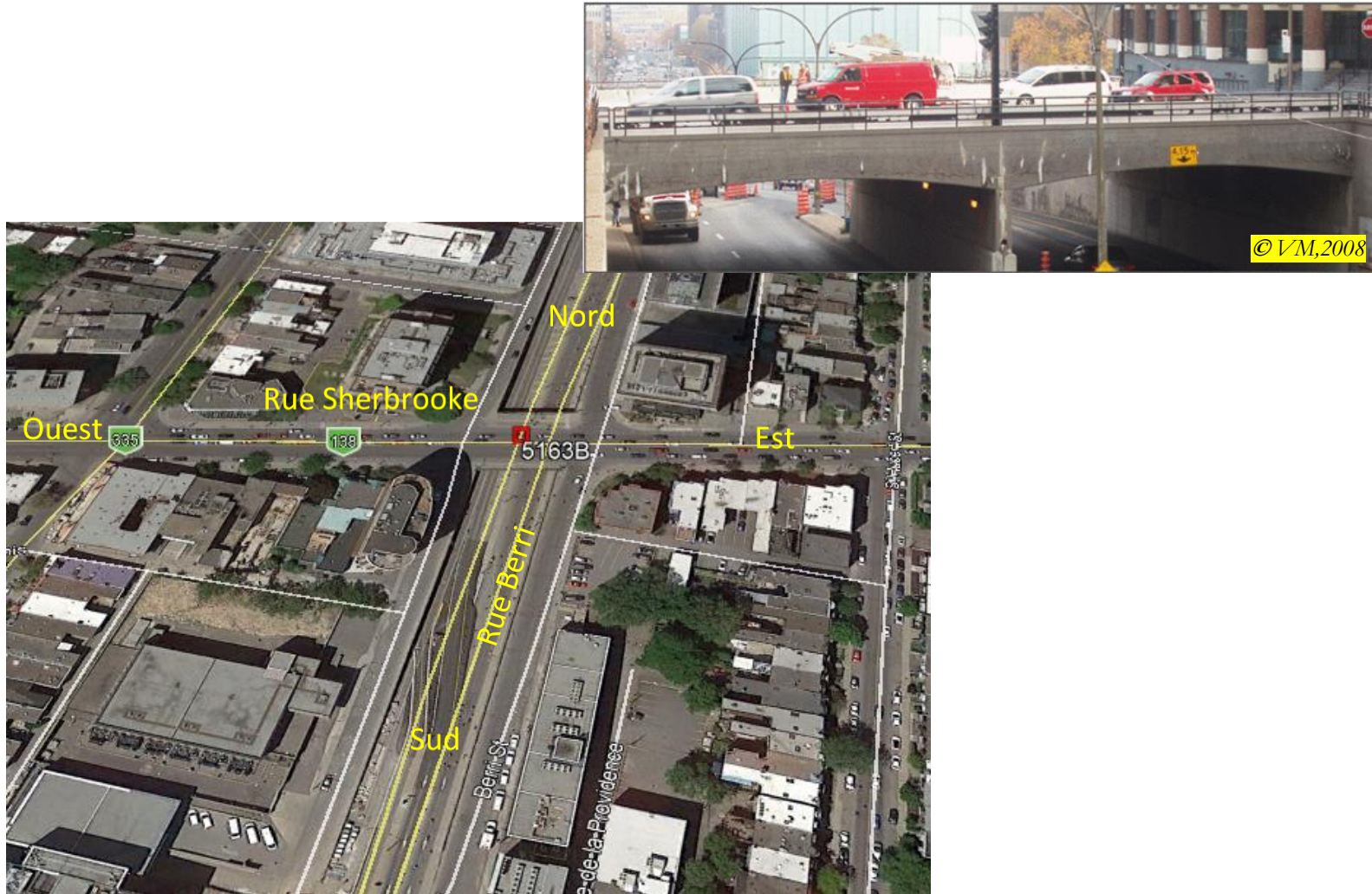
Méthodologie

➤ Échelle réseau: choix et collecte des données



Méthodologie

➤ Échelle local: choix de l'ouvrage



➤ Note par élément – inspection visuelle

T	GROUPE	ÉLÉMENT / TYPE	Surface	Principal/ Secondaire	Cote matériau (%)				Cote comportement
					α	β	γ	δ	
1	Culées	Mur de front	128 m ²	P	15	0	85	0	3
1	Piles	Fûts	350m ²	P	93	0	7	0	4



$\alpha/\beta/\gamma/\delta/CEC: 93/0/7/0/4$

Commentaires : délaminage (2 %) dans le haut. Fissures verticales extrémité sud supérieur 0.8 mm, (5 %) de rouille.

$$M_i = \sum_{j=1}^4 \frac{P_{j,i}}{P_{1,i} + \dots + P_{4,i}} (5 - j) \quad \text{avec}$$

$$P_{1,i} = \alpha^{\exp n(\alpha)}, P_{2,i} = \beta^{\exp n(\beta)},$$

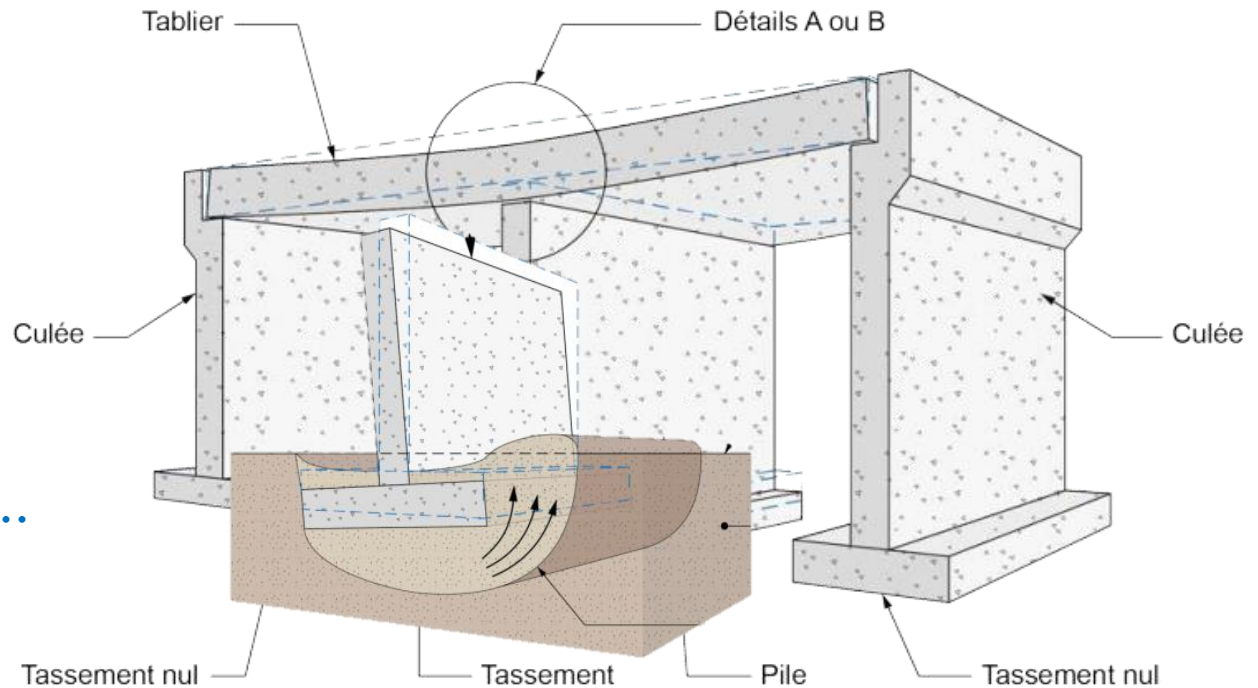
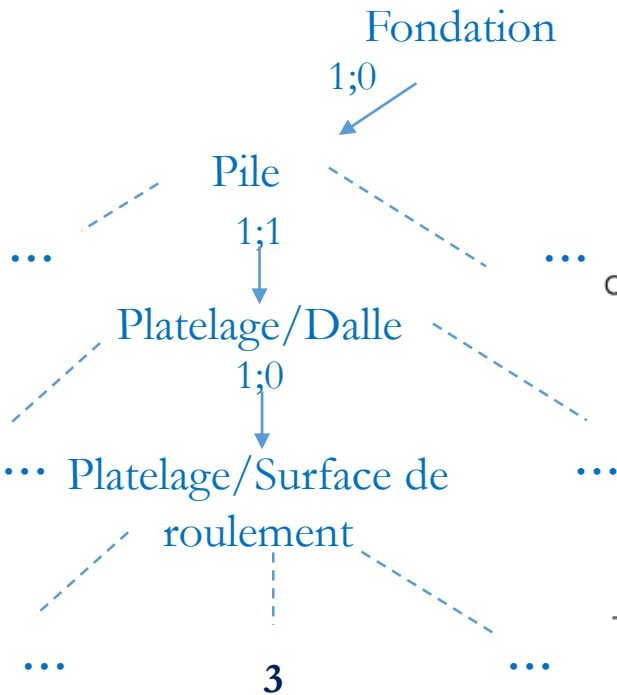
$$P_{3,i} = \gamma^{\exp n(\gamma)}, P_{4,i} = \delta^{\exp n(\delta)}$$

- M_i = État du matériau
- P_j = Pénalité matériau dérivé de la cote
- n = Poids de la pénalité
- j = Niveau de dégradation

Méthodologie

➤ Échelle locale : évaluation (arbres des conséquences)

	PiIe/ Fondation	Pile/Fût	Platelage/ Dalle	Platelage /Surface de Roulement	W
PiIe/Fondation	0	1	1	1	3



Structure continue ou discontinue *Manuel d'inspection MTQ, 2017*

⇒ Échelle locale : cote globale

$$C_C = \sum_{i \in W} A^{C_i} \sum_{j \in W \setminus i} x_{ij} \quad I_C (\%) = 100 \left(1 - \left[\frac{C_C - C_{C_{\text{meilleur}} (c=4)}}{C_{C_{\text{pire}} (c=1)} - C_{C_{\text{meilleur}} (c=4)}} \right] \right)$$

$$C_M = \sum_{i \in W} A^{m_i} \sum_{j \in W \setminus i} x_{ij} \quad I_M (\%) = 100 \left(1 - \left[\frac{C_M - C_{M_{\text{meilleur}} (M=4)}}{C_{M_{\text{pire}} (M=1)} - C_{M_{\text{meilleur}} (M=4)}} \right] \right)$$

C_C = Cote d'évaluation du comportement de la structure

C_M = Cote d'évaluation de matériaux de la structure

I_C = Indice du comportement de la structure

I_M = Indice de matériau de la structure

c_i = Pénalité comportement (1 → 4 : 1 pire ; 4 meilleur)

m_i = Pénalité matériau (1 → 4 : 1 pire ; 4 meilleur)

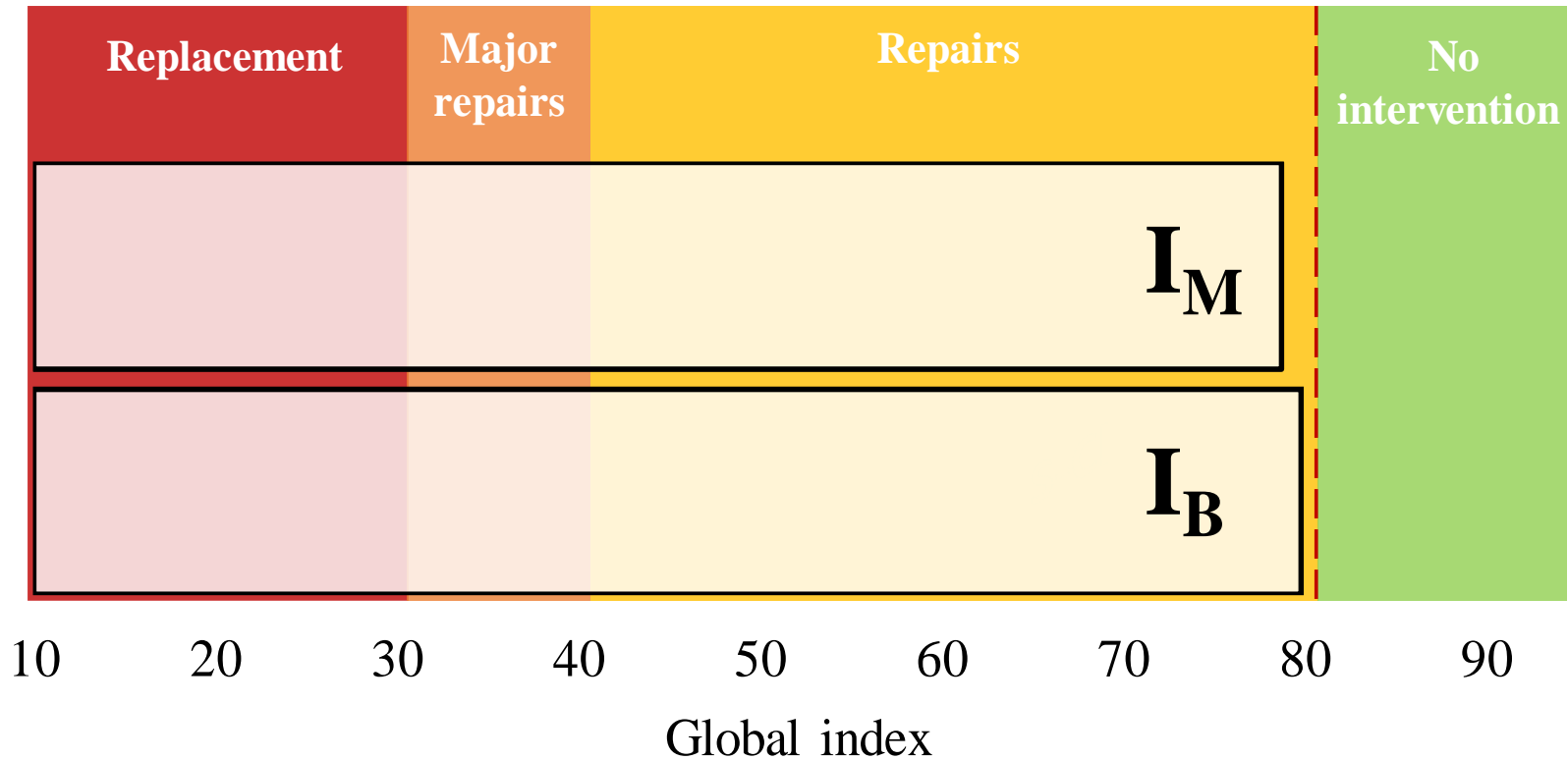
x_{ij} = Nombre d'élément j impliqué pour chaque élément i {0,1} ; {1,1}

W = Ensemble des d'affectations (nombre d'enfant)

A = Facteur évolutif des dégradations (De Sitter WR 1983 : A^n)

Résultats

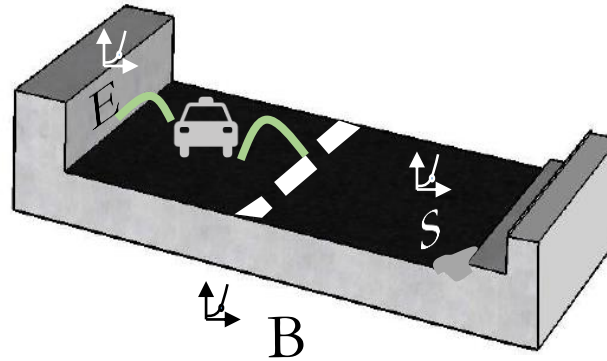
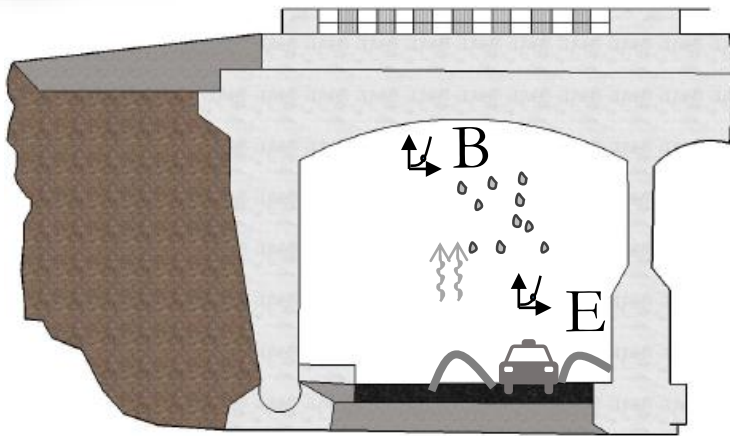
➤ Inspection visuelle: cote globale



Méthodologie

➤ Modèle de détérioration: TransChlor[®]

Note par élément



Expositions



E: Éclaboussure

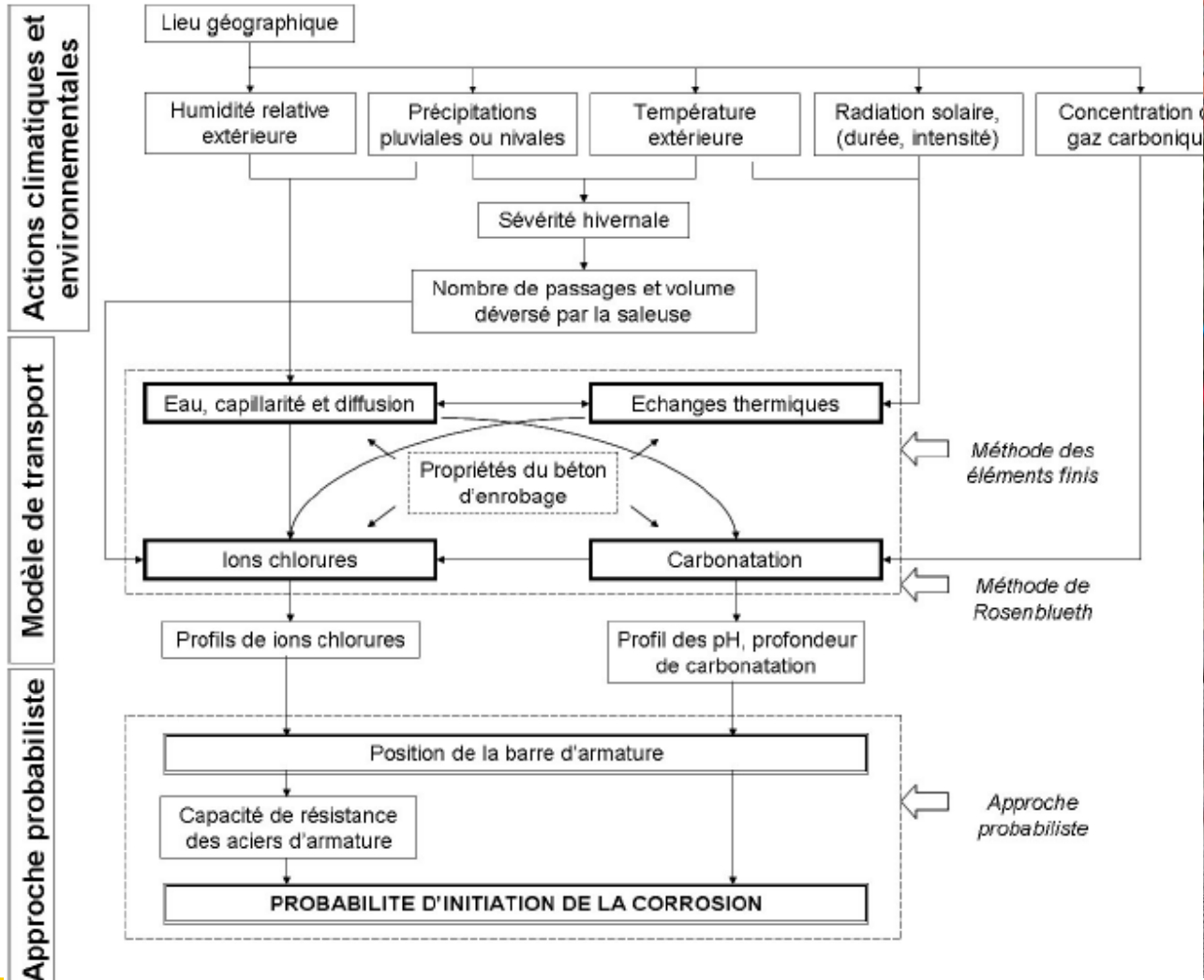
B: Brouillard

S: Stagnante

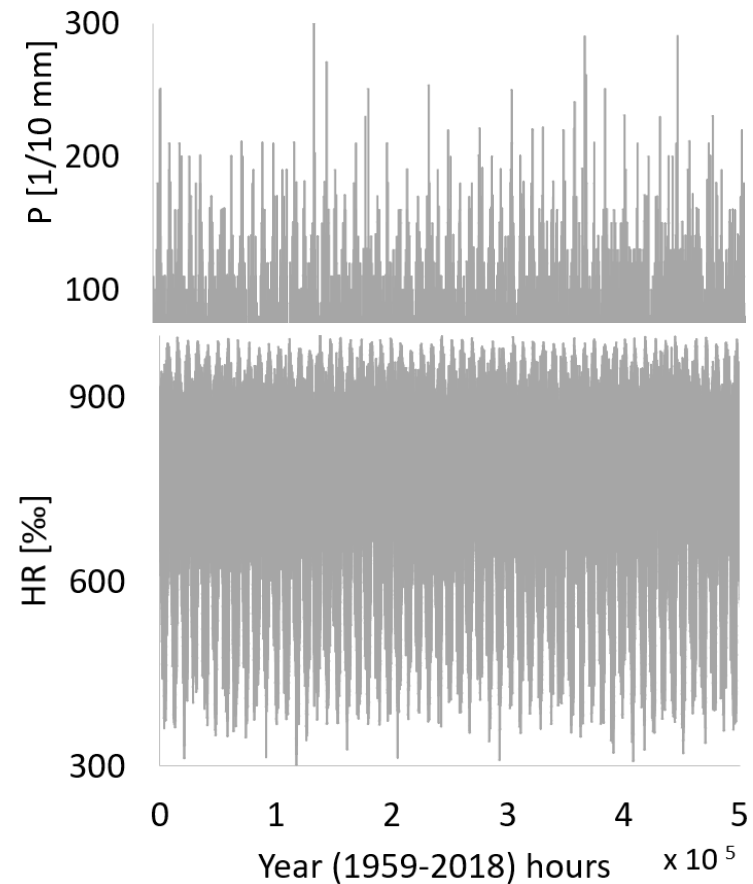
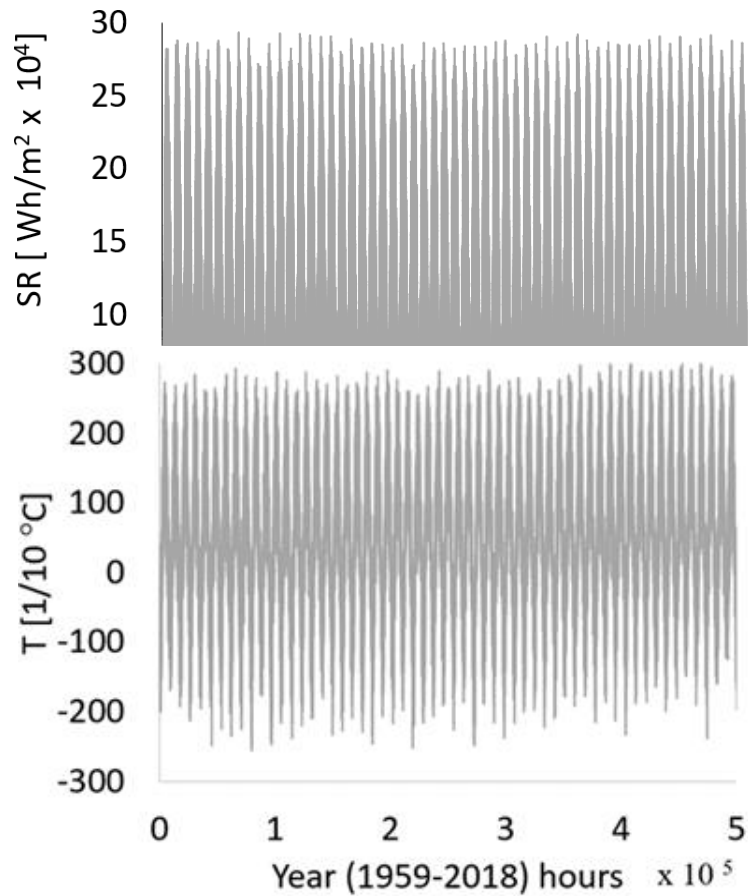
Note globale

Méthodologie

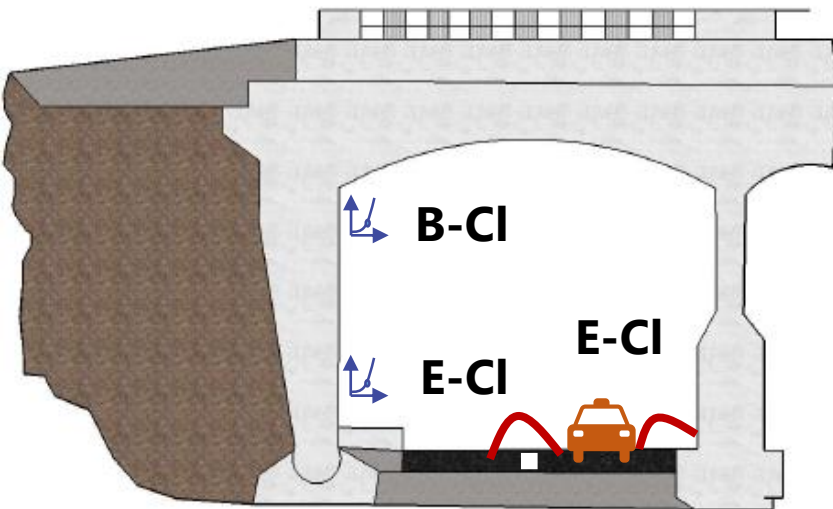
➤ Modèle de détérioration: TransChlor[®]



➤ Modèle de détérioration: données climatiques



➤ Affinage de la cote: inspection visuelle & modèle



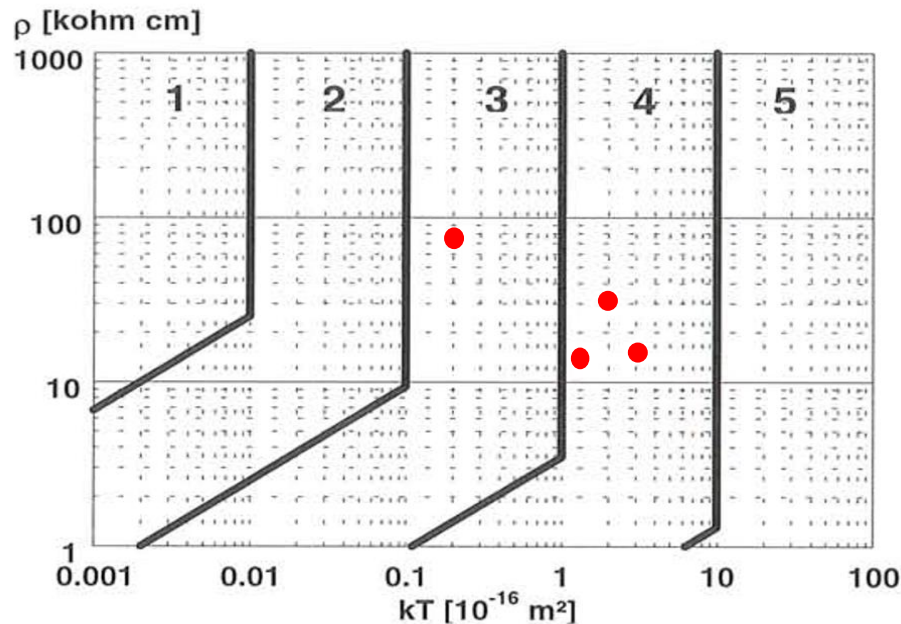
$$Hauteur_{max} = 0.8179 v_{vehicule}^{0.2548}$$

↳ Keserle et al., 2020

$$\text{Élément}_i = \sum_{k=1}^{N_{exp}} \frac{S_{exp_{ik}} \cdot P_{corr_{ik}}}{S_{Tot_i}} = \text{Cote élément}$$

Cote globale = \sum Cote élément (arbre des conséquences)

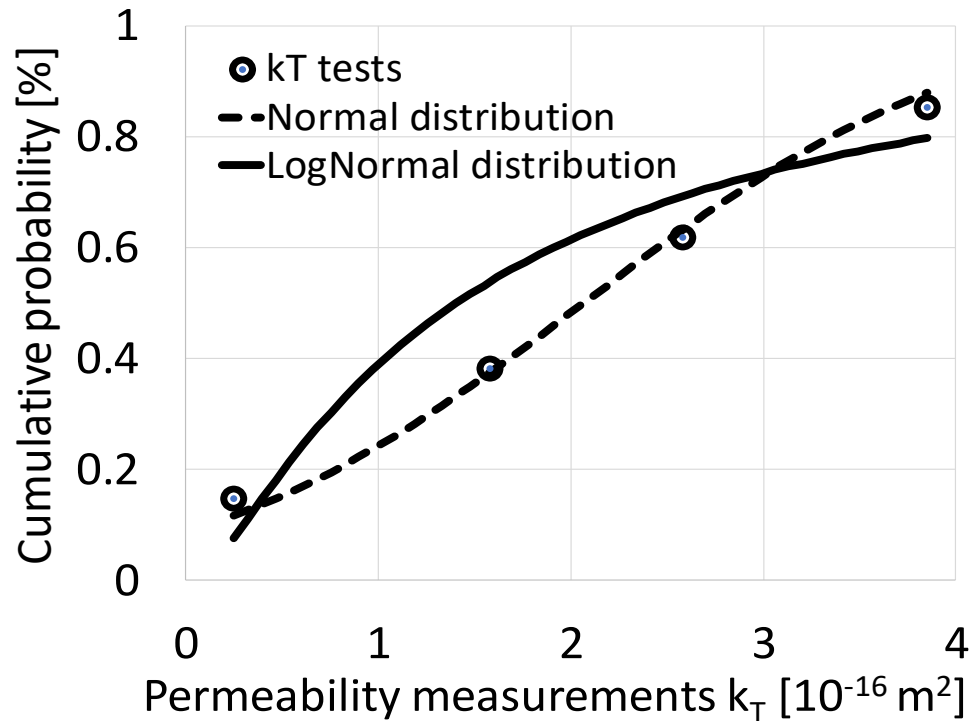
➤ Test de perméabilité à l'air Torrent & résistivité Wenner



Classes de qualité du béton de couverture

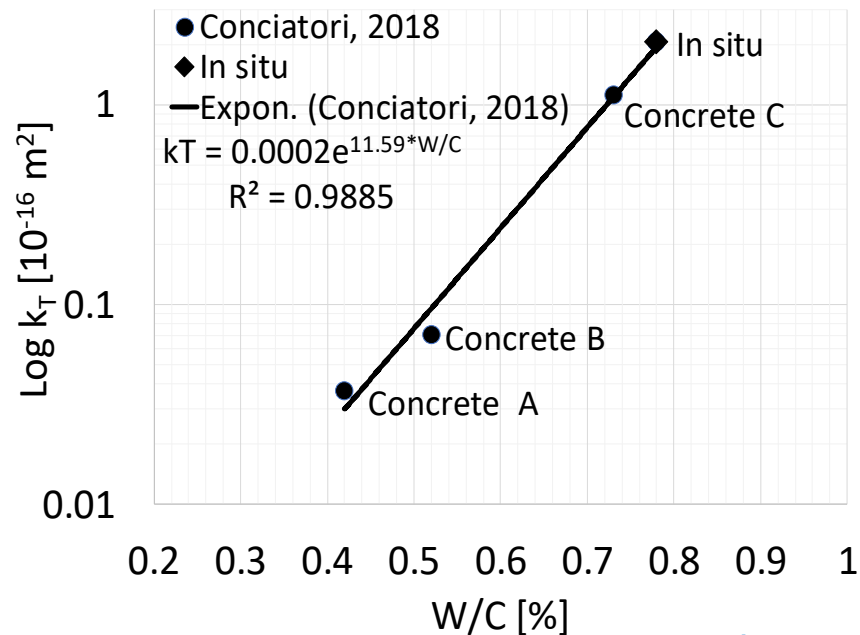
Qualité de la couverture du béton	Indice	kT (10^{-16} m^2)
Très perméable	5	> 10
Perméable	4	$1.0 - 10$
Moyen perméable	3	$0.1 - 1.0$
Perméabilité faible	2	$0.01 - 0.1$
Perméabilité très faible	1	< 0.01

➤ Analyse de sensibilité de la perméabilité



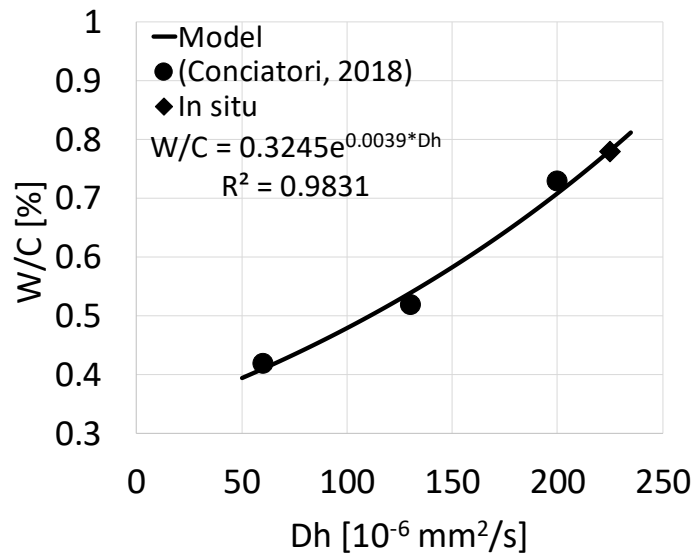
➤ Propriétés du béton

Concrete	w/c	water content (kg/m ³)	air content (%)	k _T (10 ⁻¹⁶ m ²)
A	0.42	121.50	1.5	0.037
B	0.52	152.62	1.5	0.071
C	0.73	159.25	1.5	1.116
In situ	0.78	141.20	6.5	2.067

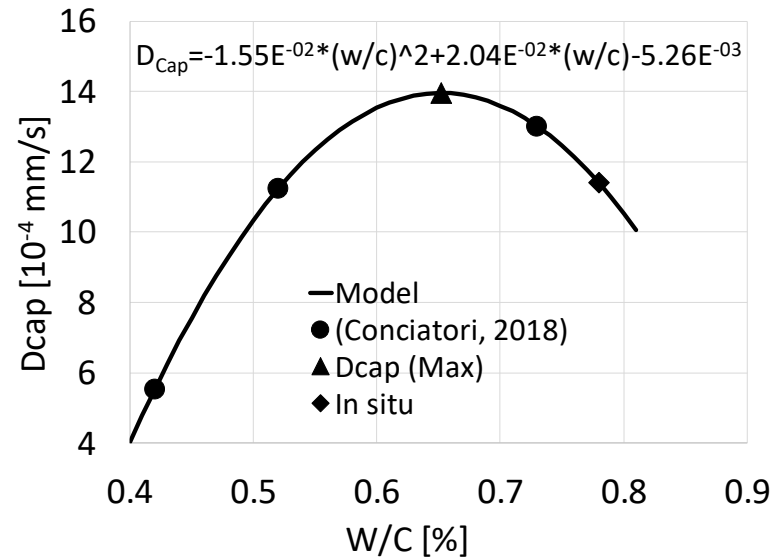


Correlation between k_T and W/C

➤ Propriétés de transport du béton

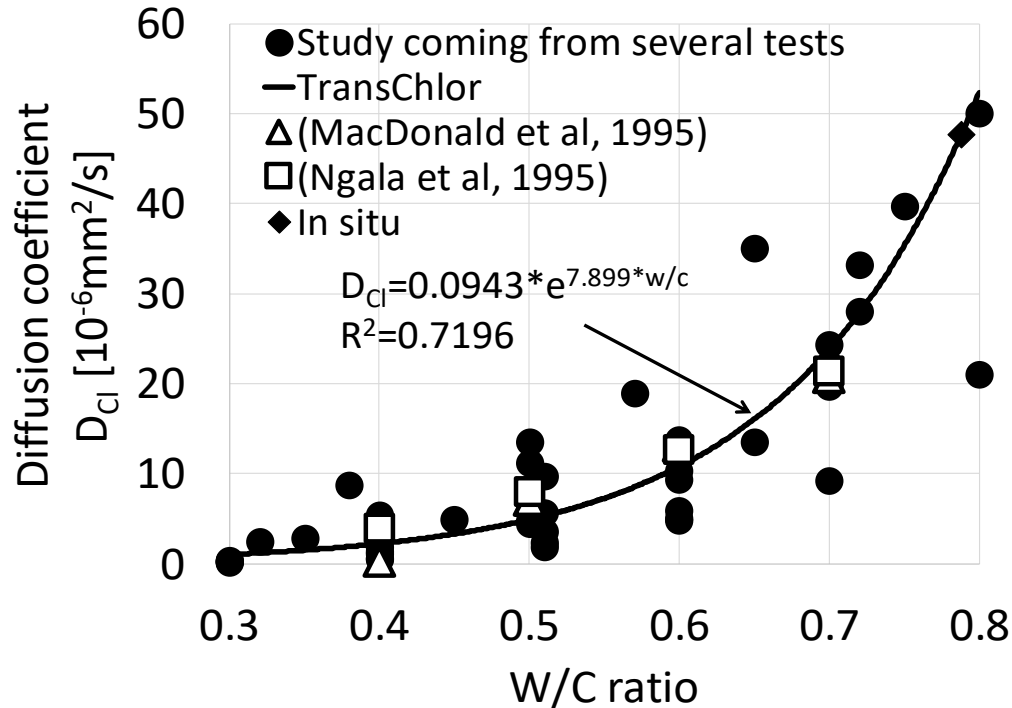


Correlation between D_h and W/C



Correlation between W/C and D_{cap}

➤ Propriétés de transport du béton

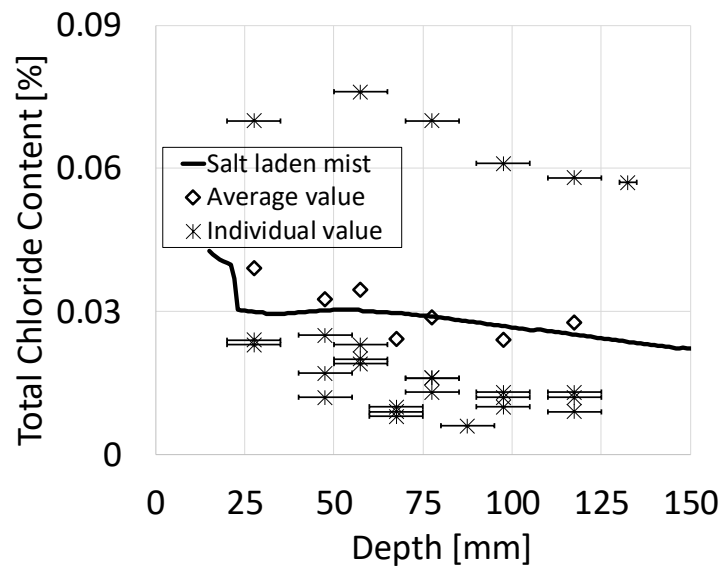


Correlation between D_{Cl} and W/C

➤ Analyse probabiliste des paramètres du béton

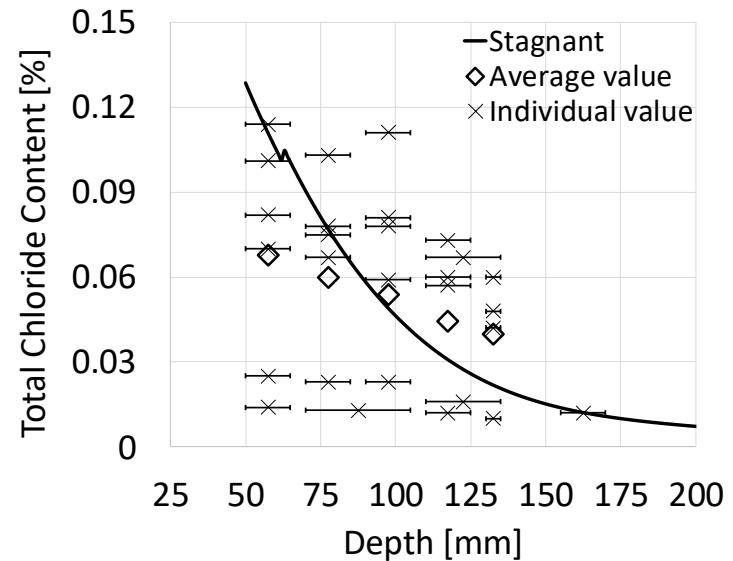
Transport parameters	μ	σ	COV (%)	Distribution
k_T (10^{-16} m ²)	2.068	1.319	63.78	Normal
D_h (10^{-6} mm ² /s)	225.30	16.62	7.37	Normal
W/C (%)	0.783	0.05	6.45	Normal
D_{Cl} (10^{-6} mm ² /s)	49.47	20.52	41.48	Normal
D_{cap} (10^{-4} mm/s)	11.10	2.11	18.97	Normal

➤ Profils de la teneur des ions chlorures totaux



Intrados total chloride ion content

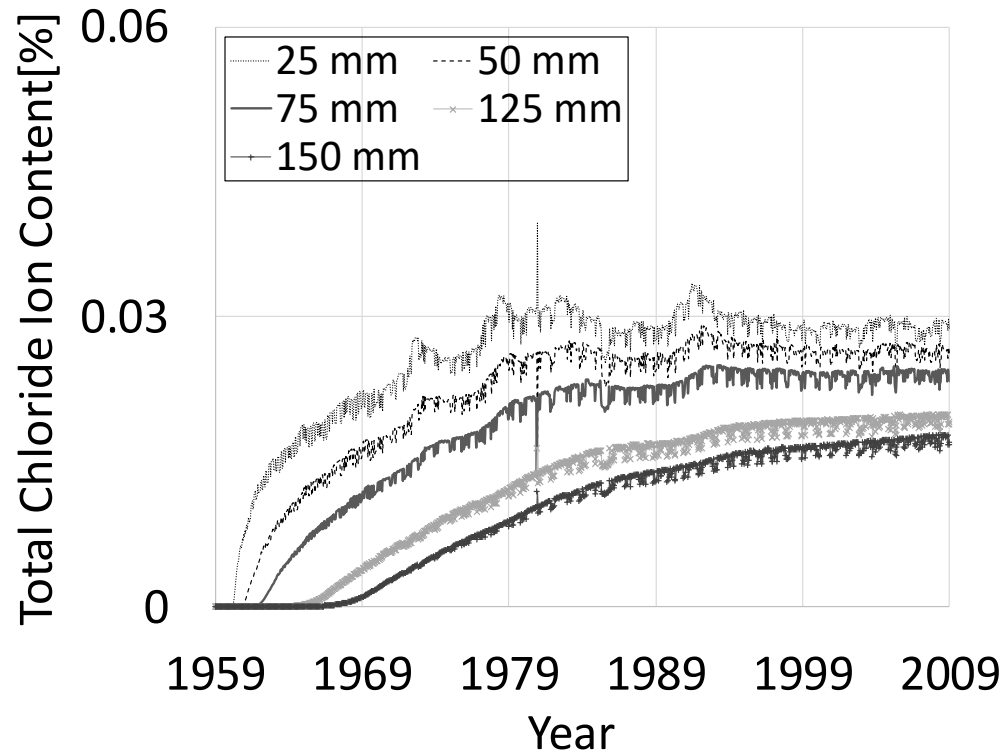
Salt laden mist exposure



Extrados total chloride ion content

Stagnant water exposure

➤ Profil de la teneur des ions chlorures totaux



Seuil limite

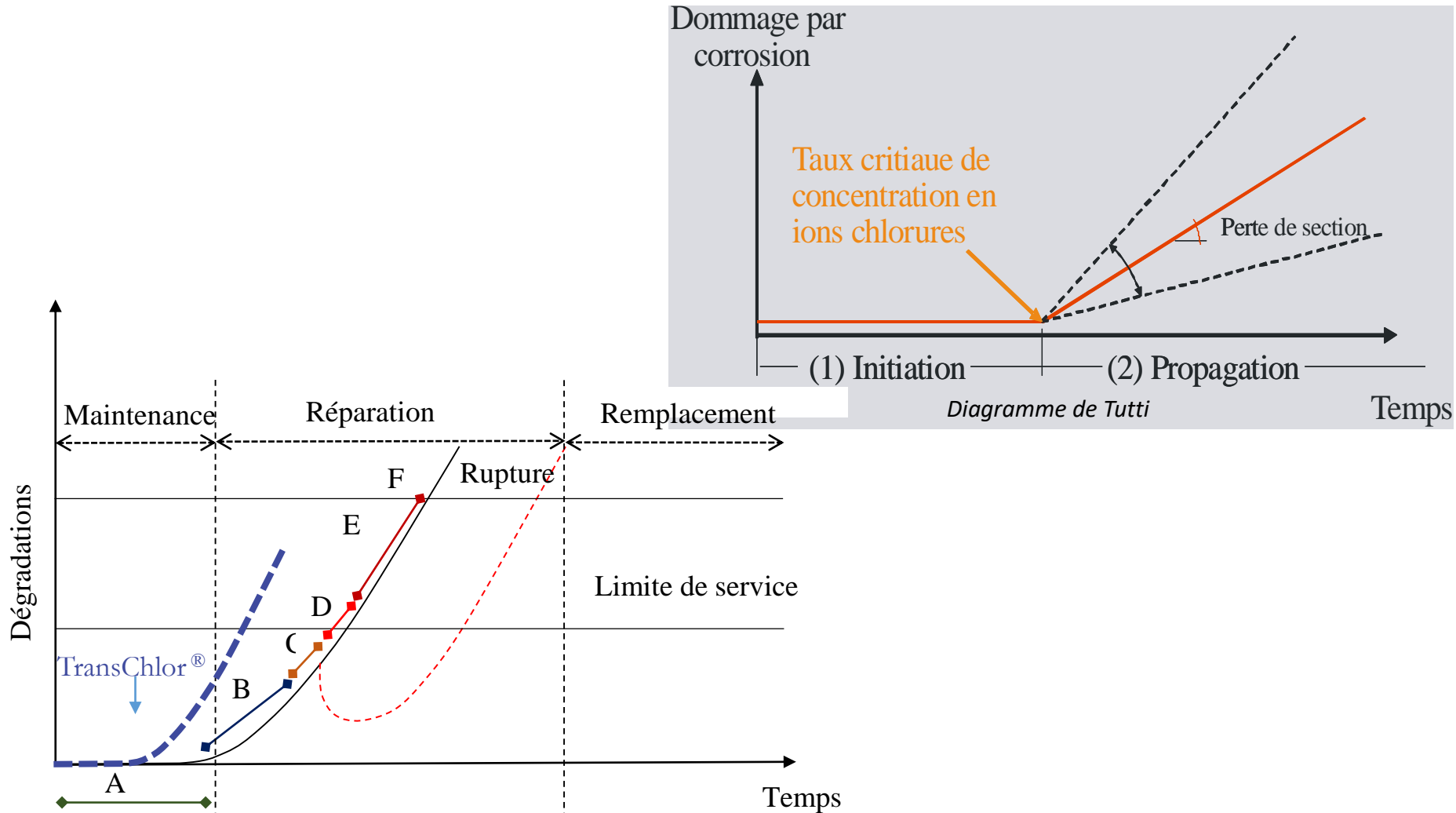


0,025% à 0,037% d'ions
chlorure par masse de béton.

ACI 362.1R-17

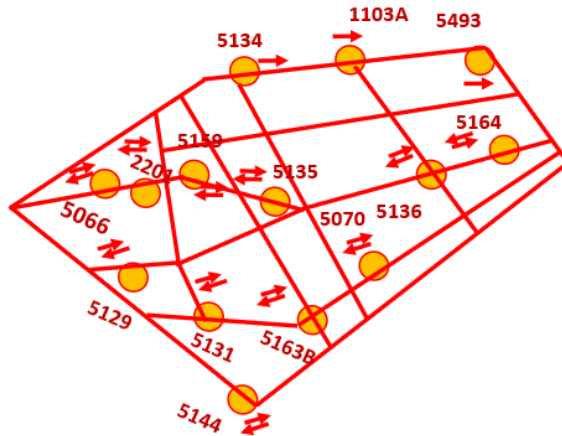
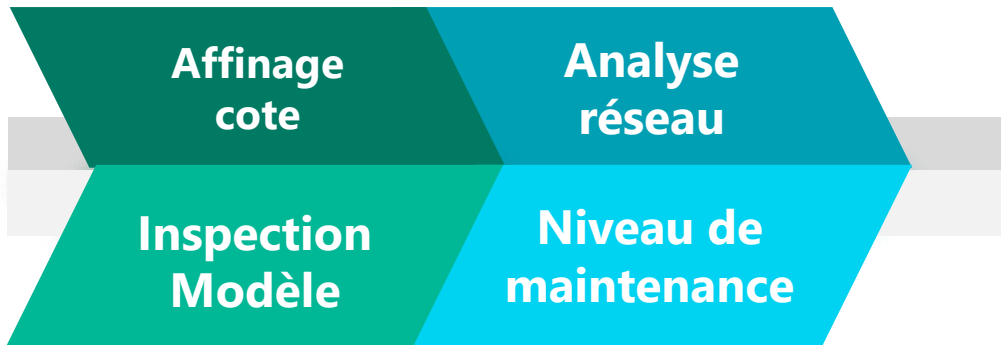
Conclusion

➤ Affinage de la cote: inspection visuelle & modèle



Travaux en cours

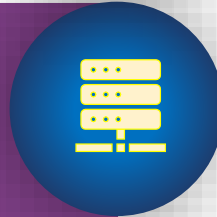
➤ Affinage de la cote de la condition d'état :
inspection visuelle & modèle



Priorité des interventions



Service aux usagers



Gestion intégrée



Merci de votre attention

➤ Questions



- ACI 362.1R-17** – Guide for the Design of Durable Parking Structure, 39 p. Manuel d'entretien des structures, MTQ, ACI 222R-01 Protection of Metals in Concrete against Corrosion.
- Bilan de l'état des Structure** du réseau routier Québécois, 2016.
- Bridgit**, technical manual NCHRP, project 12-28(2), national engineering technology corporation 1994.
- Conciatori, D., Laferriere, F., & Bruhwiler, E. (2010)**. Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 109–118. doi:10.1016/j.cemconres.2009.08.007.
- Keserle, G.C** Exposition des structures en condition hivernale **2020**.
- Garvin, M.J. and Cheah, C.Y.J. 2004**, “Valuation techniques for infrastructure investment decisions”, *Construction Management and Economics*, 22(1), 373-383;
- Hajdin, R., Grob, J.**, Massnahmenplanung für die Erhaltung von Kunsbauten, Phase 2: Grobkonzept, Dr. J. Grob & Partner AG, Winterthur, 1995.
- Henriksen, A., Bridge Management – Routine maintenance, recent experiences with the routine management module in Danbro BMS, Proceedings International Bridge Management Conference, Denver Colorado, United States, 1999.
- Ishida T., Maekawa K.**, *Modelling of PH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory*, JSCE, N°648/V-47, 16 p., Tokyo, Japan, May, **2000**.
- Les infrastructures publiques du Québec, Plan Québécois des infrastructures** 2017-2017, Plans annuels de gestion des investissements publics en infrastructures 2017-2018.
- Manuel d'inspection des structures** MTQ, 2017
- Masi M., Colella D., Radaelli G., Bertolini L.**, *Simulation of chloride penetration in cement-based materials*, *Cement and Concrete Research*, Pergamon, Elsevier Science Ltd., 27, No. 10, 1591-1601, Milan, Italie, **1997**.
- Meijers S. J. H., Bijen J. M., de Borst R., Fraaij A. L. A.**, *Computational modelling of chlorid'ion transport in reinforced concrete*, *Experimental and Numerical Research for the Design and Optimization of Cement and Concrete*, 46, pp 207 - 216, Delft, Suède, **2001**.
- Pontis** technical manual report FHWA SA-94-031 department of transportation USA 1993.
- Saetta A. V., Scotta R. V., Vitaliani R. V.**, *Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete*, *ACI Materials Journal*, 90 (5), pp 441 - 451, **1993**.
- Samson E., Marchand J., Robert J. L., Bournazel J.-P.**, *Modelling ion diffusion mechanisms in porous media*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46, 2043- 2060, Laval, Canada, **1999**.
- Sanchez, T., Ait-Mokhtar, A., Henocq, Pierre, Hamami, Ameer El Amine, & Millet, O. (2018)**. Development of An Accelerated Migration Test for Radionuclides Through Cementitious Materials. *Cement and Concrete Research*.
- Schmidt-Döhl F., Rostasy F. S.**, *A model for the calculation of combined chemical reactions and transport processes and its application to the corrosion of mineral- building materials Part II. Experimental verification*, Elsevier Science Ltd., Part II Experimental verification, pp 1048 - 1053, Braunschweig, Germany, **1999**.
- Schmidt-Döhl F., Rostasy F. S.**, A model for the calculation of combined chemical reactions and transport processes and its application to the corrosion of mineral-building materials Part I. Simulation model, Elsevier Science Ltd., Part I Simulation model, pp 1039 -1045, Braunschweig, Germany, 1999.
- Shin C. B. , Kim E. K.**, *Modelling of chlorid'ion ingress in coastal concrete*, *A. A. Balkema*, 32, 757 - 762, South Korea, december, **2001**.
- Soderqvist, M.-K., Veijola, M.**, Finnish project level Bridge Management System, Proceedings International Bridge Management Conference, Denver Colorado, United States, 1999.
- Tang L., Utgenannt P.**, *Characterization of chloride environment along a highway*, Fifth CanMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, 213223 p., Barcelone, Espagne, june, **2000**.
- Truc O., Ollivier J. P., Nilsson O.**, *Multi species transport in saturated cement-based materials*, RILEM, proceeding PRO 19, edited by C. Andrade and J. Kropp, Pro 19, 14, Toulouse, France, September, **2000**.