



GESTION DES RISQUES POUR LE RÉSEAU SECONDAIRE D'EAU POTABLE DE LA VILLE DE MONTRÉAL

Nathalie Oum, ing., M.Sc.A



*«Une stratégie de type **Gestion d'actifs** consiste [...] à intervenir sur des éléments [d'infrastructures] qui ne sont pas encore défectueux, dans le but qu'ils ne deviennent jamais complètement défectueux, et que la fourniture d'eau ne soit pratiquement jamais interrompue de façon intempestive, majeure ou prolongée.»*

«Cette stratégie de gestion d'actifs permet même, à la marge et au besoin, de planifier les interruptions de service, et de faire en sorte qu'elles soient prévisibles, courtes, donc le moins perturbatrices possible.»

Rapport du comité de suivi du projet d'optimisation du réseau d'eau potable, Ville de Montréal, septembre 2011



PLAN

- Mise en contexte
- Calcul des probabilités de défaillances
- Calcul des conséquences de défaillances
- Calcul du risque
- Recommandations
- Conclusion



«Gérer, c'est prévoir et optimiser.»

MISE EN CONTEXTE

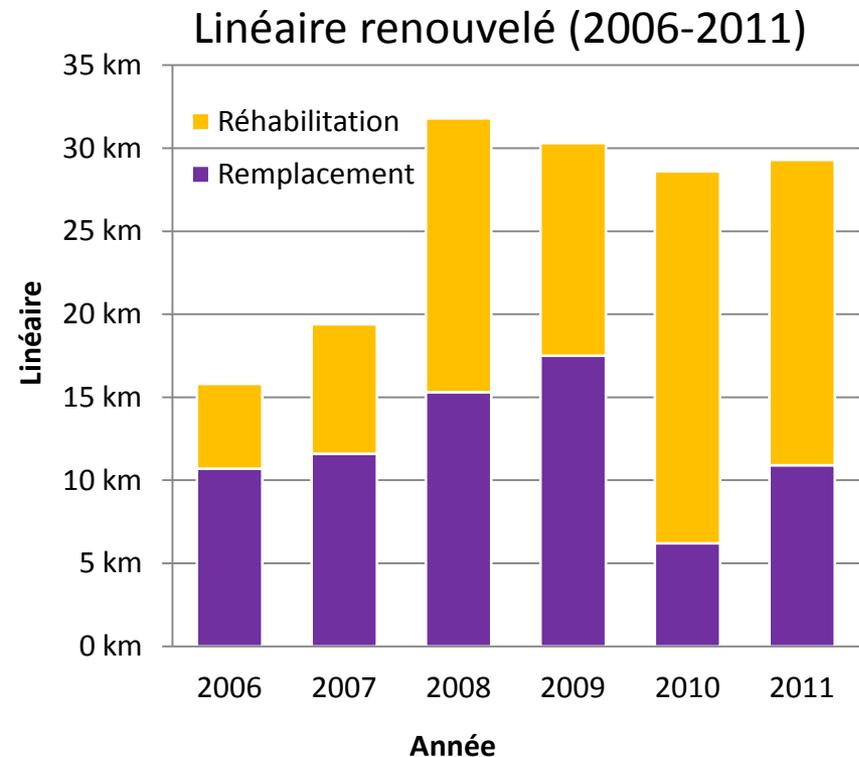
Besoins en investissements

- Direction de la Gestion Stratégique des Réseaux d'Eau (DGSRE): assure la distribution de l'eau via l'entretien et le renouvellement des réseaux d'eau secondaires.
- Réseaux d'eau secondaires: 3572 km (eau potable) et 4234 km (égouts sanitaire, pluvial et combiné)
- Plan d'intervention (2010): 280 M\$ d'investissement annuel (2010-2090)
 - Objectif:
 - Rattraper le déficit en investissement passé
 - Faire face aux besoins futurs d'investissement
- Plan d'investissement 10 ans (2011): 2,5 G\$ pour le renouvellement des réseaux secondaires d'ici 2020

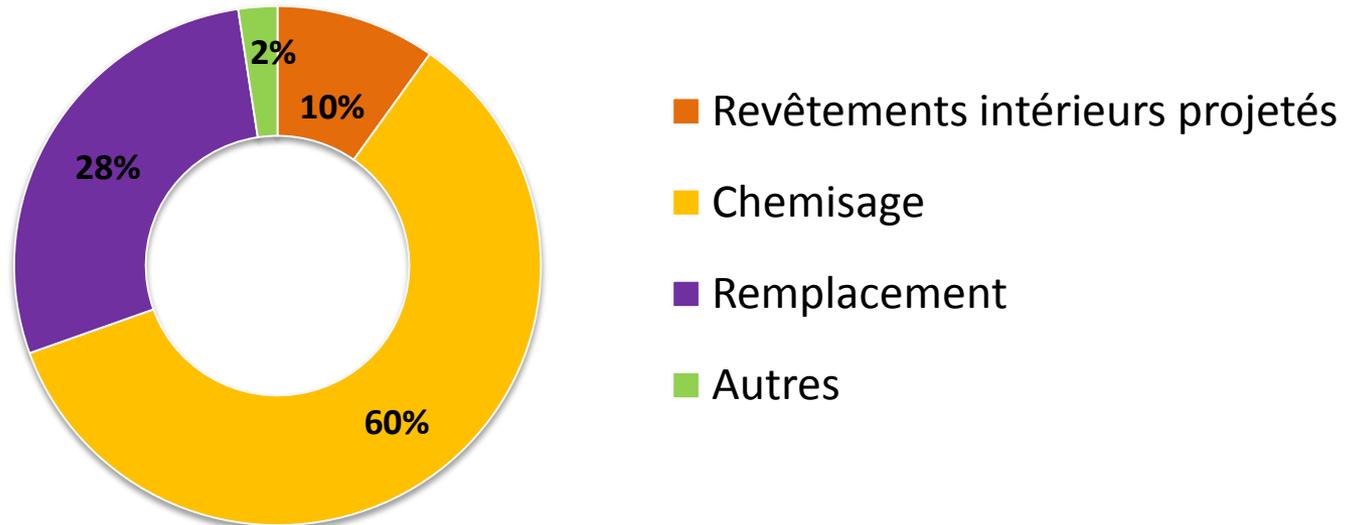


Taux de renouvellement

- En date de 2011, pour le réseau d'eau potable, près de 165 km ont été renouvelés (soit 4%).
- Plus de 85% du linéaire renouvelé a été réalisé depuis 2005.
- Taux annuel (2006-2010) $\approx 0.7\%$ (1 conduite est renouvelée tous les 142 ans)

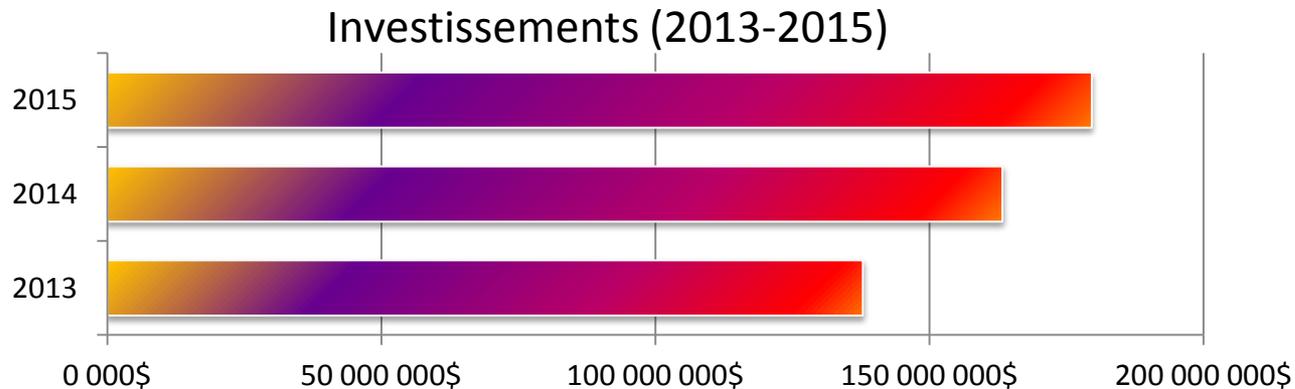


Méthodes de renouvellement (1985-2010)



Plan triennal d'immobilisations (2013-2015)

- Programme de renouvellement des réseaux secondaires (eau potable et égouts): 480 M\$



- Eau potable: près de 135 km prévus en chemisage ou remplacement

→ Nous devons établir un ordre de priorité afin d'utiliser les ressources d'une manière optimale.

Évaluation des priorités

- L'évaluation des priorités est basée sur une estimation **quantitative** du **risque** de défaillance.

$$\text{RISQUE} = \text{PROBABILITÉ} \times \text{CONSÉQUENCE}$$

- Il nous faut quantifier:
 - La probabilité d'occurrence d'une défaillance
 - Les conséquences tangibles liées à cette défaillance



Méthodologie

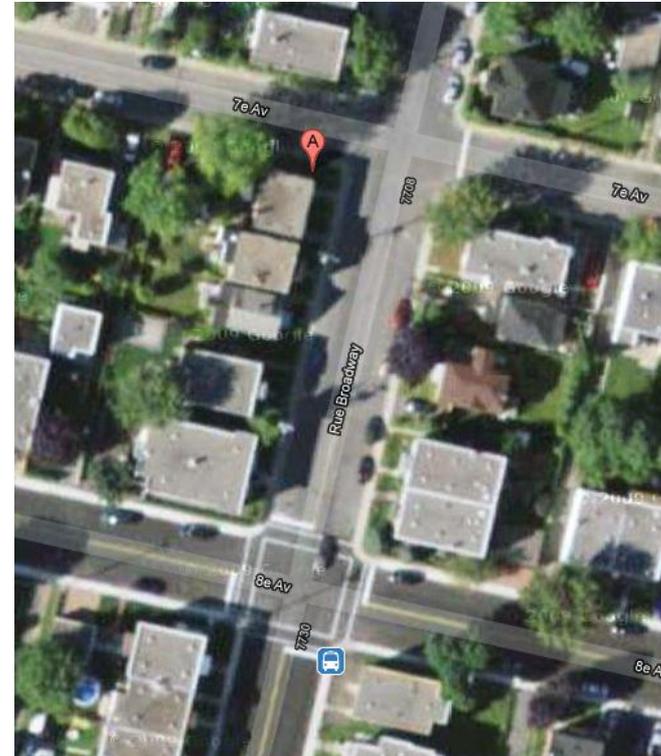
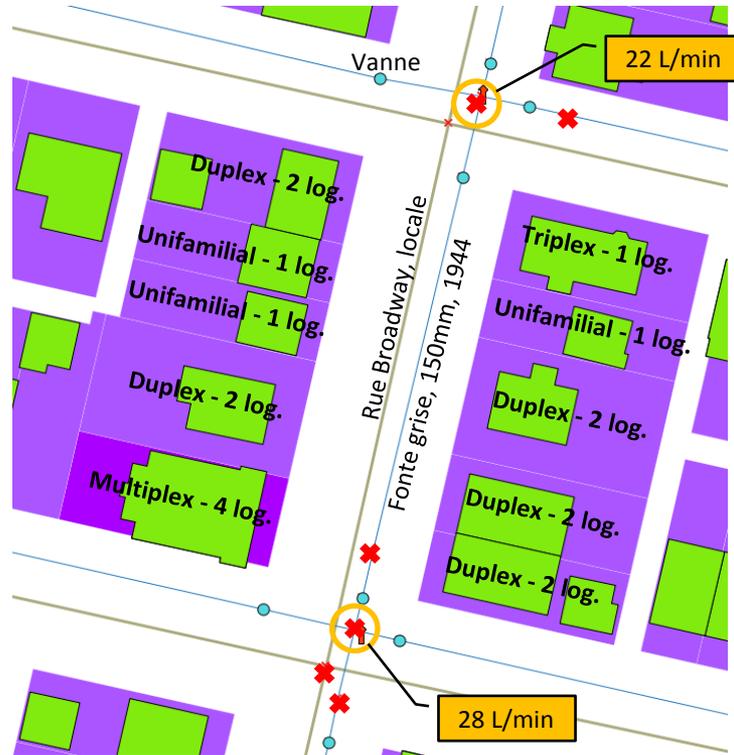
- **PROBABILITÉ:**
 - On utilise le modèle statistique de prédiction de défaillances LEYP (Linear Extended Yule Process).
 - Il ne génère pas de probabilité absolue, mais des résultats qui permettent d'attribuer une cote relative qui traduit cette probabilité.
- **CONSÉQUENCES:**
 - On définit les différents types de conséquences C_i .
 - On attribue à chaque C_i une cote.
 - On utilise une matrice pour obtenir la cote finale.

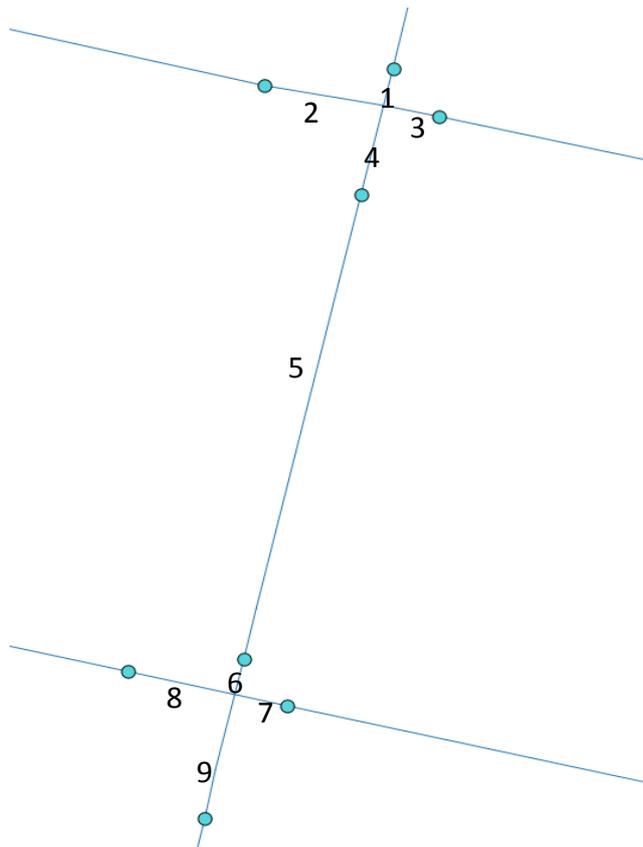
Données utilisées

Types	Informations
Segments de conduites	Matériau, année d'installation, diamètre, longueur, etc.
Historique des réparations	Dates de réparations sur les conduites (de 1972 à 2010)
Géobase routière	Classification des chaussées: artérielle, collectrice, etc.
Cadastres des lots fonciers	Utilisation de l'immeuble: Unifamiliale, école, usine, etc.
Polygones des bâtiments	Nombre de logements
Demande hydraulique	Débits (L/min)

Exemple







- Au total: 9 segments de conduite
- La PROBABILITÉ de défaillance est calculée pour chaque segment
- Les CONSÉQUENCES de bris sont calculées pour chaque segment en fonction de la localisation des vannes d'isolement:
 - Par exemple, les segments 1, 2, 3 et 4 auront les mêmes conséquences



«La probabilité de défaillance est basée sur les caractéristiques physiques de la conduite et son historique de réparations.»

CALCUL DES PROBABILITÉS DE DÉFAILLANCES

Estimation du nombre de bris futurs

- L'estimation du nombre de bris futur sur une conduite s'appuie sur le modèle de Yule:

$$\lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{P\{N(t+h) - N(t) = 1 | N(t) = j\}}{h}$$

$$= \underbrace{(1 + \alpha j)}_{\text{Yule Factor}} \underbrace{\delta t^{\delta-1}}_{\text{Weibull Factor}} \underbrace{\exp(Z^T \beta)}_{\text{Cox Factor}}$$

Nombre de défaillances historiques → **Yule Factor**

Temps → **Weibull Factor**

Z incorpore tous les facteurs de risques liés à la conduite ou son environnement → **Cox Factor**



Facteurs de risques

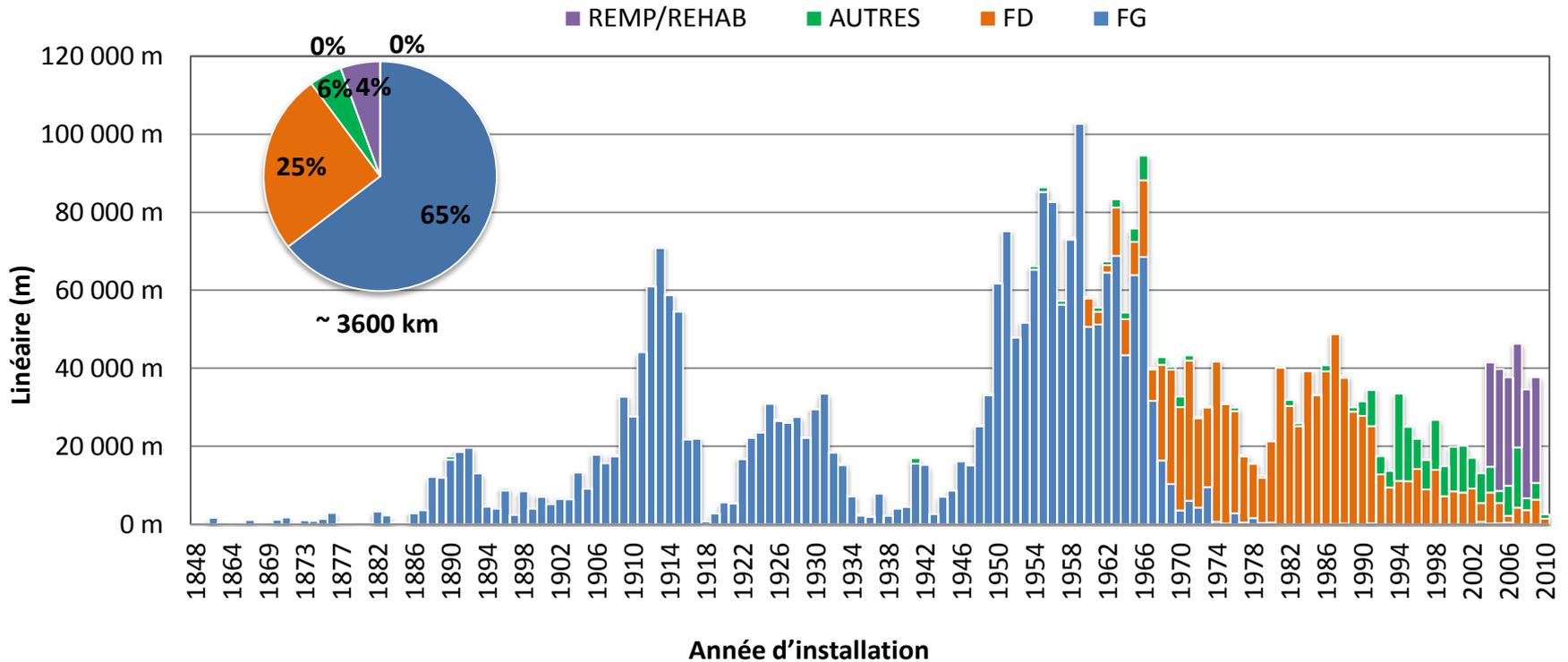
- Liés à la conduite
 - Matériau
 - Diamètre
 - Date d'installation (ou âge)
 - Longueur
 - Revêtement
 - Pression
 - Protection cathodique
 - Historique de bris
- Liés à son environnement
 - Type de sol
 - Trafic routier
 - Densité de construction
 - Niveau de la nappe phreatique
 - Proximité des courants vagabonds



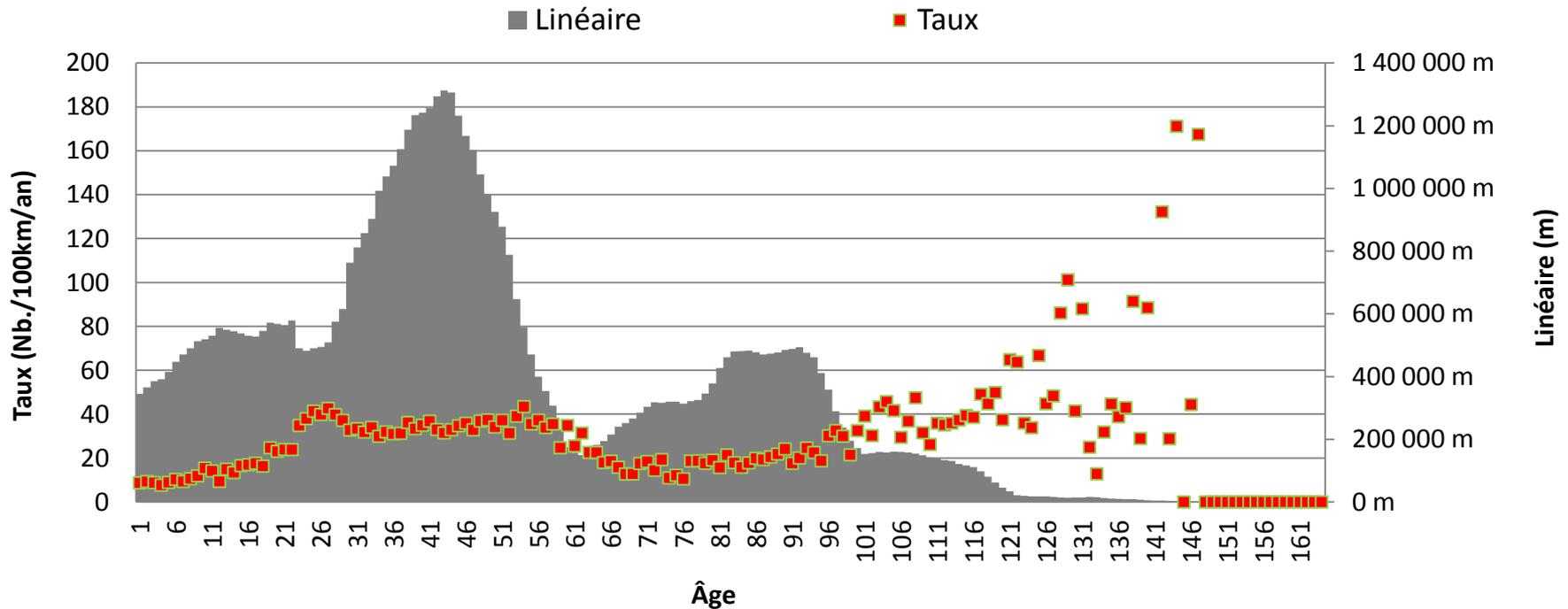
Analyse statistique

- Les statistiques descriptives réalisées permettent entre autres:
 - De comprendre les données
 - De définir les cohortes: groupes de conduites qui se dégradent d'une manière similaire
- L'analyse statistique est réalisée à partir des données sur les conduites existantes et celles qui ont été renouvelées:
 - Un traitement des données utilisées est nécessaire pour éliminer les données manquantes ou incohérentes.

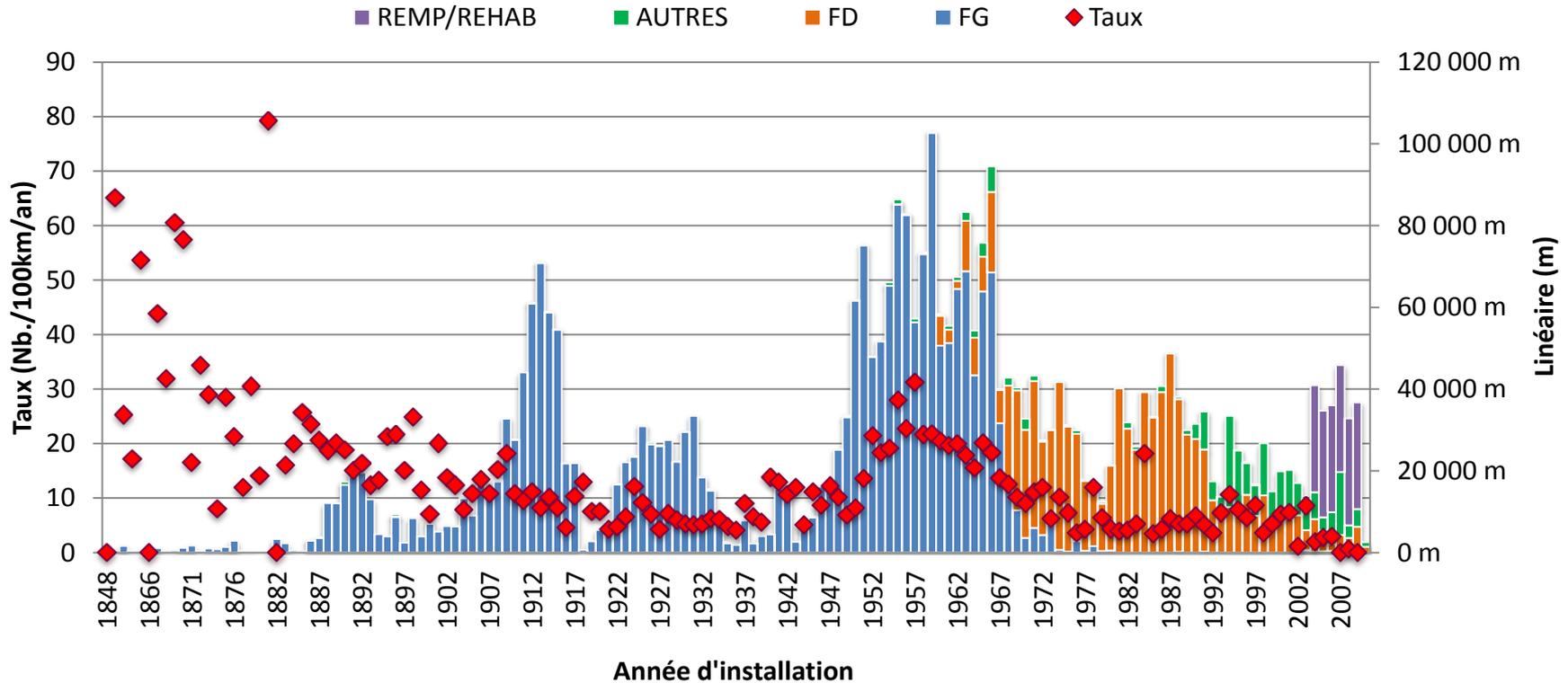
Linéaire par matériau et par année d'installation



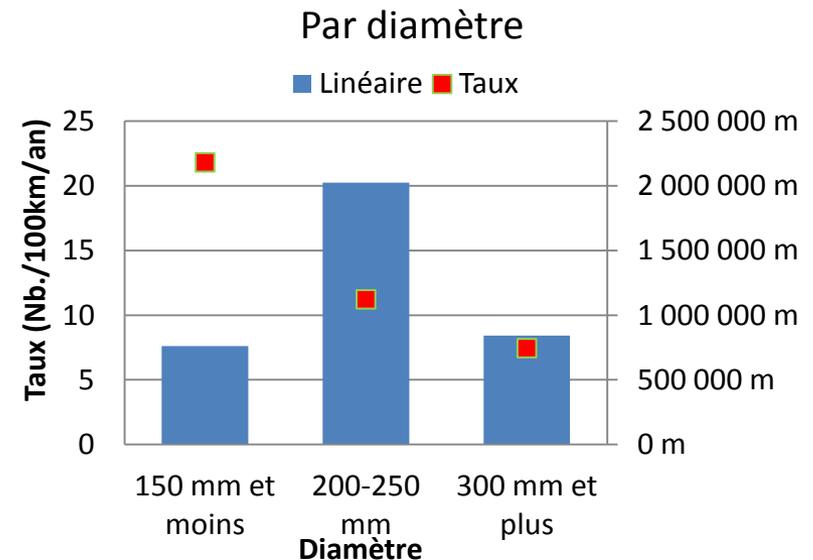
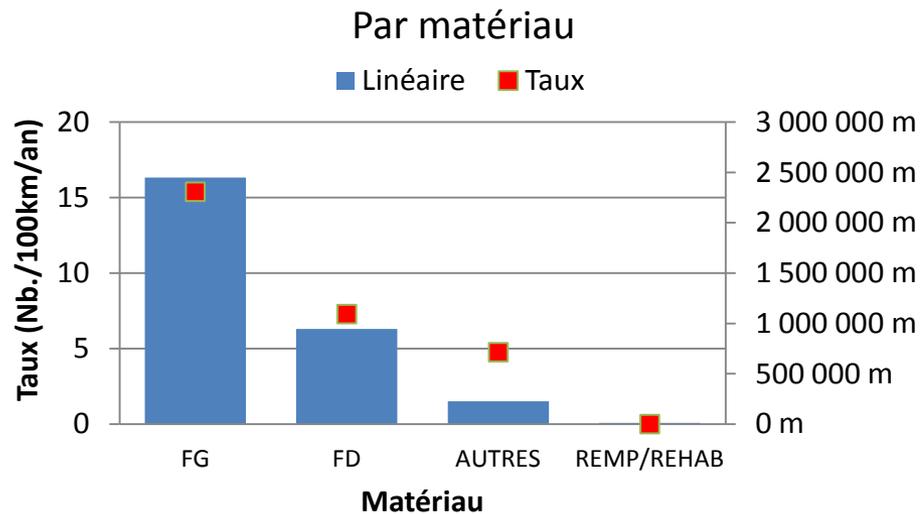
Taux de défaillances en fonction de l'âge au moment de la défaillance



Taux de défaillances en fonction de l'année d'installation



Taux de défaillances par rapport au matériau et au diamètre

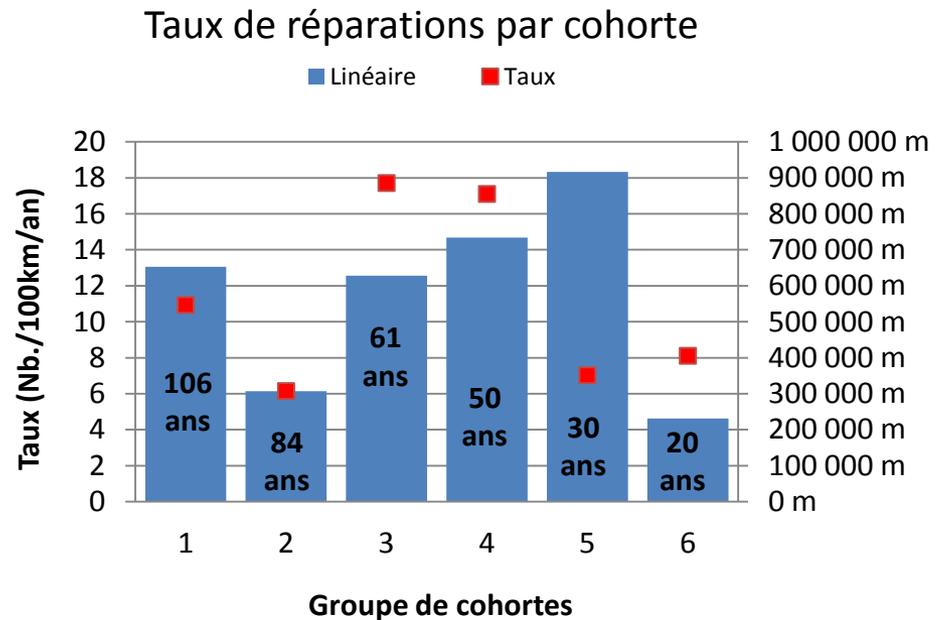


➔ Définition des variables qui influencent le taux de défaillances: diamètre, matériau.



Définition des cohortes

1. Fonte grise avant 1921
2. Fonte grise 1921-1935
3. Fonte grise 1936-1956
4. Fonte grise après 1956
5. Fonte ductile
6. Autres matériaux



Le réseau secondaire d'eau potable a en moyenne 58 ans



Modélisation (LEYP)

- Le modèle de LEYP est intégré dans le logiciel CASSES, développé par le laboratoire français, CEMAGREF.
- Cinq (5) étapes dans la simulation:
 - Importation des données sur les segments de conduites: Identifiant, année de pose, matériau, diamètre, date de retrait.
 - Importation de l'historique des réparations: Identifiant, date de réparation.
 - Définition des co-variables
 - Calibration et validation du modèle
 - Prédiction des bris futurs

Casses software : MANH_CIP_LCP.ksp SimpleTap

File Creation Construction Tools ?

- Pipe set
- Break set
- Environments
 - Default Environment
 - MANH_CIP_LCP
 - MANH_CIP_LCP_00_09_1
 - Validation
- Covariates
- Break data
 - Qualitative break data
 - Quantitative break data

Pipes | Observed breaks | Actual breaks | Validation - Results | Validation - Data

Description

Progression : MANH_CIP_LCP_00_09_11_CB_DDP4_DIAM5_LNL (Validation)
 Sub-project : MANH_CIP_LCP
 Observation period start date: 1/9/2000
 Observation period end date: 7/31/2009
 Validation period start date: 8/1/2009
 Validation period end date: 8/1/2011
 Environment : Default Environment
 Pipe set : All pipes
 Break set : All breaks

Importation des données sur les segments de conduites

Short name	Long name	Type	Unit	Minimum	Maximum	Number of modalities
AARD	A_A_Rd	QUALITATIVE				2
BORGH	Borough	QUALITATIVE				1
CB	CB_BR	QUALITATIVE				3
DDP	DOI	DATE	M/d/yyyy	1/1/1840	1/1/2005	
DDP4	DDP4	QUALITATIVE				4
DHS	DOA	DATE	M/d/yyyy			
DIA	Diameter	QUANTITATIVE	in	2.000	72.000	
DIAM5	DIAM5	QUANTITATIVE				5
IDR	Network ID	QUALITATIVE				1
LNG	Length	QUANTITATIVE	ft	0.518	1924.046	
LNL	LN LENGTH	QUANTITATIVE		-0.658	7.562	
MAT	Material	QUALITATIVE				2
NKOVO	Created by merging following ...	QUALITATIVE				3
NKOVI	Created by merging following ...	QUALITATIVE				3

Modalities	PN	% PN	LNG (km)	% LNG	OBN	% OBN	PBN	% PBN	MOBR	% DMOBR	MPBR	% DMPBR
0	14782	96.0	2438.967	95.3	282	97.2	61.242	95.9	0.012	2.0	0.013	0.6
1	610	4.0	119.084	4.7	8	2.8	2.604	4.1	0.007	-40.7	0.011	-12.4
TOTAL	15392	100.0	2558.050	100.0	290	100.0	63.845	100.0	0.012	0.0	0.012	0.0

Casses software : MANH_CIP_LCP.ksp

SimpleTap

File Creation Construction Tools ?

- Pipe set
- Break set
- Environments
 - Default Environment
 - MANH_CIP_LCP
 - MANH_CIP_LCP_00_09_1
 - Validation
- Covariates
- Break data
 - Qualitative break data
 - Quantitative break data

Pipes Observed breaks **Actual breaks** Validation - Results Validation - Data

Description

Progression : MANH_CIP_LCP_00_09_11_CB_DDP4_DIAM5_LNL (Validation)
 Sub-project : MANH_CIP_LCP
 Observation period start date: 1/9/2000
 Observation period end date: 7/31/2009
 Validation period start date: 8/1/2009
 Validation period end date: 8/1/2011
 Environment : Default Environment
 Pipe set : All pipes
 Break set : All breaks

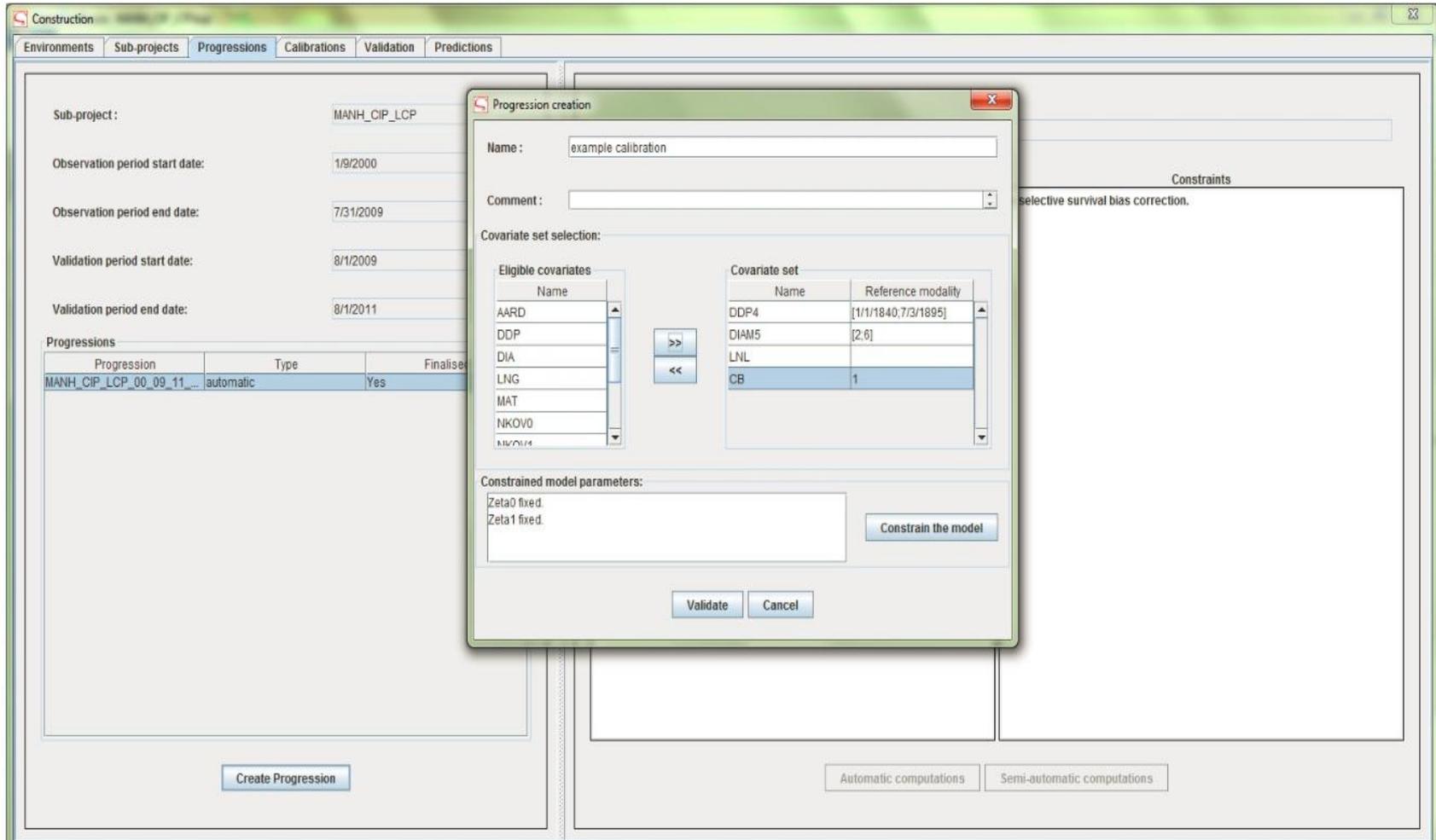
Importation de l'historique des réparations

Short name	Long name	Type	Unit	Minimum	Maximum	Number of modalities
DDC	DOB	DATE	M/d/yyyy	8/10/2009	7/31/2011	

Year	ABN	% ABN	MABR	% DMABR
2009	7	17.1	0.003	-55.9
2010	21	51.2	0.008	32.3
2011	13	31.7	0.009	40.4
TOTAL	41	100.0	0.006	0.0
Prediction	63.845		0.012	100.9

Copy top table Copy bottom table

Définition des co-variables



Progression creation

Name : example calibration

Comment :

Covariate set selection:

Eligible covariates		Covariate set	
Name		Name	Reference modality
AARD		DDP4	[1/1/1840,7/3/1895]
DDP		DIAM5	[2,6]
DIA		LNL	
LNG		CB	1
MAT			
NKOV0			
NKOV1			

Constrained model parameters:

Zeta0 fixed.

Zeta1 fixed.

Buttons: Validate, Cancel, Constrain the model



Calibration et validation du modèle

Construction

Environments Sub-projects Progressions Calibrations Validation Predictions

Finalised Progression: MANH CIP LCP 00 09 11 CB DDP4 DIAM5 LNL

Predictions

Validations	OPSD	OPED	VPSD	VPED
Validation	Jan 9, 2000	Jul 31, 2009	Aug 1, 2009	Aug 1, 2011

Results

An	AI	PBN	ABN	Rn
0.813	0.740	63.845	41.000	1.557

x(%)	Cxn(%)	Cxl(%)	Rxn(%)	Rxl(%)
0.100	2.439	4.878	2.571	0.770
0.500	9.756	12.195	1.669	0.895
1.000	14.634	14.634	1.571	1.188
5.000	36.585	26.829	1.334	1.677
10.000	46.341	34.146	1.480	1.898

% breaks avoided as a function of % replaced pipes (by number)

Graph by number of pipes (selected) / Graph by length of pipes

Copy image, Save, Print

Quit Construction mode

Prediction: Validation

IDT	DDP	MAT	LNG	PBN/Year	ACC/Year	MPBR	MABR
P1000001	1/1/1905	CIP	255.368	0.002	0.000	0.010	0.000
P1000002	1/1/1870	CIP	134.795	0.005	0.000	0.035	0.000
P1000003	1/1/1870	CIP	22.515	0.002	0.000	0.069	0.000
P1000004	1/1/1955	LCP	199.608	0.001	0.000	0.007	0.000
P1000006	1/1/1873	CIP	27.258	0.001	0.000	0.025	0.000
P1000007	1/1/1870	CIP	32.642	0.000	0.000	0.004	0.000
P1000008	1/1/1894	CIP	209.512	0.000	0.000	0.002	0.000
P1000011	1/1/1871	CIP	210.845	0.000	0.000	0.002	0.000
P1000013	1/1/1870	CIP	27.675	0.001	0.000	0.025	0.000
P1000015	1/1/1897	CIP	263.882	0.000	0.000	0.000	0.000
P1000016	1/1/1870	CIP	246.787	0.000	0.000	0.001	0.000
P1000017	1/1/1959	LCP	501.055	0.005	0.000	0.010	0.000
P1000019	1/1/1897	CIP	100.452	0.000	0.000	0.002	0.000
P1000021	1/1/1940	LCP	229.224	0.003	0.000	0.012	0.000
P1000022	1/1/1923	CIP	568.536	0.001	0.000	0.002	0.000
P1000025	1/1/1929	CIP	16.146	0.001	0.000	0.046	0.000
P1000026	1/1/1870	CIP	16.224	0.000	0.000	0.009	0.000
P1000027	1/1/1870	CIP	8.001	0.001	0.000	0.079	0.000
P1000029	1/1/1908	CIP	453.282	0.001	0.000	0.001	0.000
P1000030	1/1/1947	LCP	28.844	0.000	0.000	0.008	0.000
P1000032	1/1/1870	CIP	305.633	0.009	0.000	0.028	0.000
P1000033	1/1/1878	CIP	234.663	0.001	0.000	0.003	0.000
P1000034	1/1/1965	LCP	9.337	0.001	0.000	0.135	0.000
P1000035	1/1/1870	CIP	307.554	0.009	0.000	0.028	0.000
P1000037	1/1/1870	CIP	6.305	0.000	0.000	0.011	0.000
P1000039	1/1/1878	CIP	259.468	0.000	0.000	0.001	0.000
P1000042	1/1/1949	LCP	208.536	0.003	0.000	0.016	0.000
P1000043	1/1/1870	CIP	122.131	0.004	0.000	0.037	0.000
P1000046	1/1/1897	CIP	37.101	0.000	0.000	0.003	0.000
P1000047	1/1/1951	LCP	92.727	0.001	0.000	0.010	0.000
P1000048	1/1/1902	CIP	18.459	0.001	0.000	0.034	0.000
P1000049	1/1/1870	CIP	162.047	0.000	0.000	0.002	0.000
P1000050	1/1/1870	CIP	37.303	0.000	0.000	0.005	0.000
P1000051	1/1/1870	CIP	189.621	0.000	0.000	0.001	0.000
P1000056	1/1/1897	CIP	263.829	0.000	0.000	0.001	0.000
P1000060	1/1/1931	LCP	251.007	0.003	0.000	0.012	0.000
P1000064	1/1/1840	CIP	30.944	0.002	0.000	0.069	0.000
P1000065	1/1/1870	CIP	307.346	0.009	0.000	0.028	0.000

Prédiction des bris futurs

Construction

Environments Sub-projects Progressions Calibrations Validation Predictions

Finalised Progression: MANH_CIP_LCP_00_09_11_CB_DDP4_DIAM5_LNL

Predictions

Prediction	PPSD	PPED
2013_2015	8/1/2013	8/1/2015

Create new Prediction

Prediction : 2013_2015

IDT	DDP	MAT	LNG	PBN	MPBR
P1009449	1/1/1950	LCP	41.324	0.001	0.008
P1010524	1/1/1942	LCP	27.248	0.003	0.046
P1009457	1/1/1950	LCP	4.741	0.001	0.113
P1009458	1/1/1870	CIP	259.519	0.010	0.019
P1010526	1/1/1850	LCP	24.459	0.004	0.074
P1009455	1/1/1964	LCP	50.660	0.006	0.059
P1010525	1/1/1850	LCP	20.602	0.003	0.079
P1010528	1/1/1870	CIP	62.467	0.006	0.047
P1009453	1/1/1945	LCP	485.751	0.012	0.012
P1010527	1/1/1878	CIP	232.316	0.002	0.004
P1009451	1/1/1870	CIP	167.297	0.012	0.034
P1010529	1/1/1897	CIP	39.203	0.002	0.024
P1009452	1/1/1945	LCP	41.132	0.003	0.037
P1022995	1/1/1885	CIP	5.565	0.001	0.056
P1010520	1/1/1950	LCP	608.130	0.009	0.007
P1022991	1/1/1937	LCP	14.569	0.001	0.029
P1022992	1/1/1937	LCP	447.836	0.005	0.005
P1010521	1/1/1941	LCP	84.063	0.001	0.004
P1010515	1/1/1931	CIP	16.570	0.002	0.046
P1009467	1/1/1906	CIP	1.688	0.000	0.125
P1010513	1/1/1872	CIP	226.990	0.009	0.020
P1009468	1/1/1905	CIP	239.468	0.005	0.010
P1010519	1/1/1947	LCP	620.688	0.009	0.007
P1010517	1/1/1965	LCP	10.625	0.002	0.096
P1009460	1/1/1931	LCP	808.103	0.013	0.008
P1009461	1/1/1928	CIP	13.330	0.001	0.032
P1009475	1/1/1958	LCP	806.704	0.009	0.006
P1022977	1/1/1908	CIP	44.751	0.001	0.009
P1010549	1/1/1897	CIP	243.207	0.000	0.001
P1022978	1/1/1950	LCP	810.686	0.001	0.001
P1009473	1/1/1907	CIP	657.212	0.001	0.000
P1010546	1/1/1908	CIP	30.061	0.001	0.019
P1010548	1/1/1930	LCP	219.668	0.006	0.013
P1009477	1/1/1926	CIP	38.862	0.001	0.009
P1022979	1/1/1840	CIP	25.521	0.001	0.028
P1010544	1/1/1908	CIP	7.374	0.001	0.041
P1022973	1/1/1840	CIP	9.430	0.000	0.011
P1009472	1/1/1948	LCP	32.562	0.003	0.041
P1009470	1/1/1942	CIP	204.982	0.002	0.002

<< Quit Construction mode

Prédictions des bris futurs

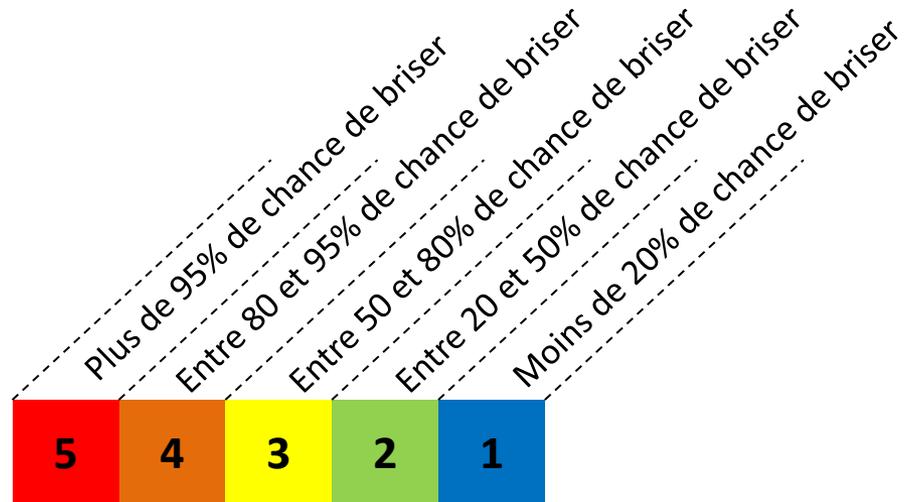
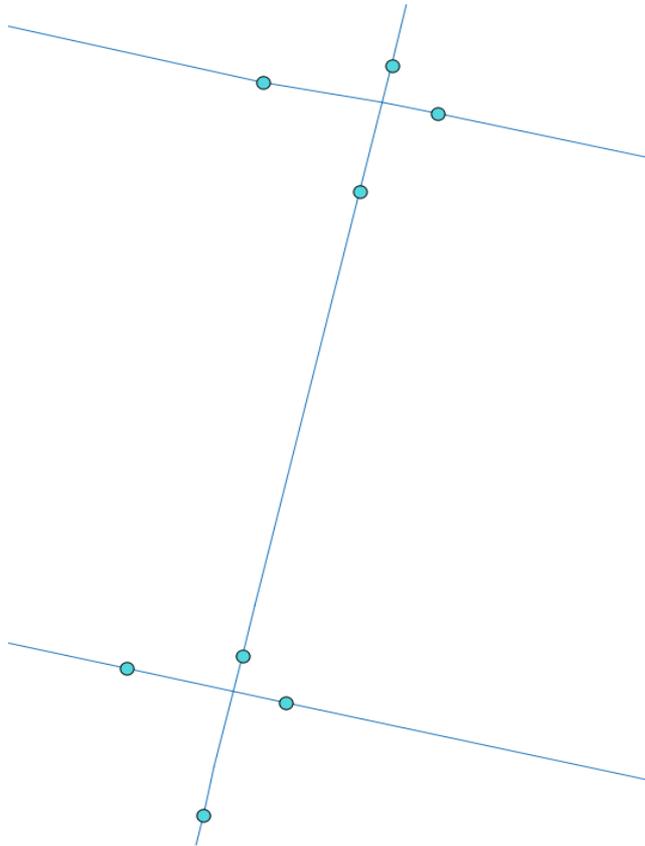
- Nombre de Bris Prédits (NBP) par année et par conduite: Exemple

ID conduite	2011	2012	2013	2014	2015
101	0.0412	0.0415	0.0418	0.0421	0.0424
102	0.0415	0.0416	0.0417	0.0418	0.0419

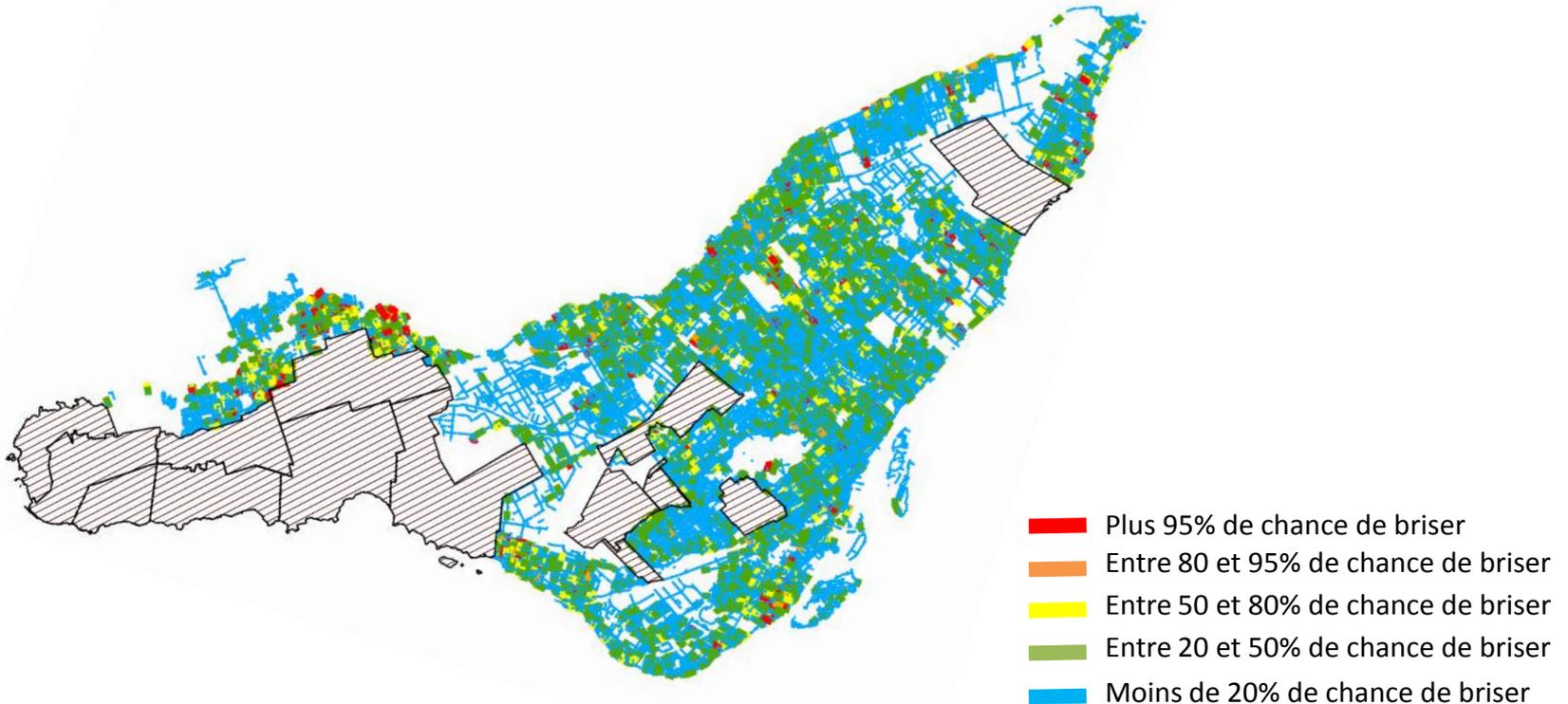
- Estimation du proxy de la probabilité en fonction de NBP (2011-2015):
 - Le proxy de la PROBABILITÉ: $P = \% \text{ NBP}$
 - P caractérise la chance de briser (%).

Cote de PROBABILITÉ

- La cote de PROBABILITÉ est attribuée en fonction du proxy de la PROBABILITÉ (%).



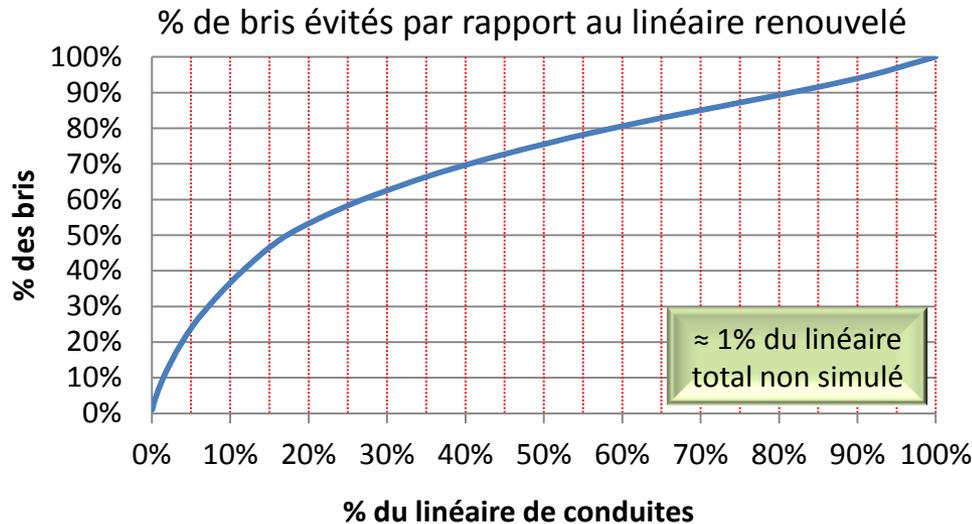
Cartographie des probabilités de défaillances



Cartographie des probabilités de défaillances



Résultat de LEYP: Prédiction de bris (2011-2015)

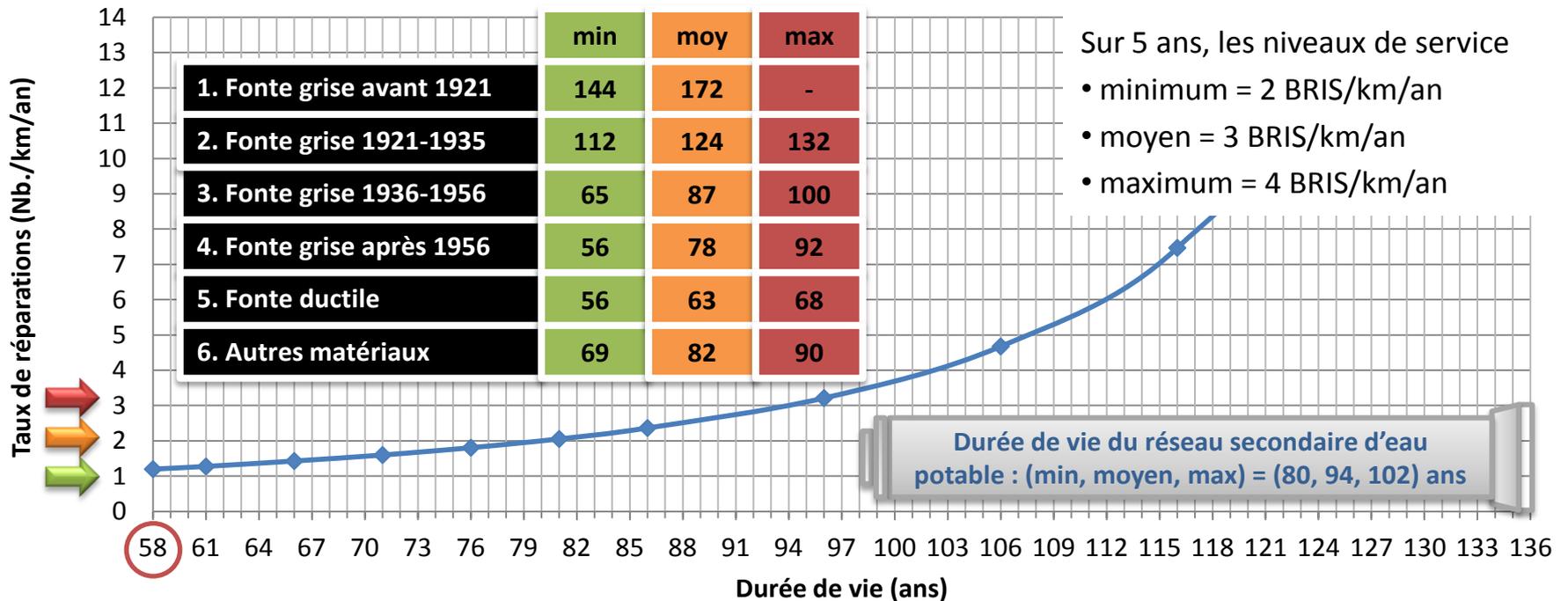


- Conduites classées par NBP décroissant
- Au total: 4252 bris prédits
- En intervenant immédiatement sur 1% des pires conduites (≈35 km): on évite près 7.5% de bris (≈318 bris)
- Taux₂₀₁₁₋₂₀₁₅ = 24.5 bris/100km/an

P ≤ 20%	20% < P ≤ 50%	50% < P ≤ 80%	80% < P ≤ 95%	P > 95%
2972 km	358 km	88km	20km	32km
2325 bris	1056 bris	441 bris	130 bris	300 bris
0,16 bris/km/an	0,6 bris/km/an	1 bris/km/an	1,3 bris/km/an	1,9 bris/km/an

Autre résultat de LEYP: Durée de Vie des matériaux

Courbe de dégradation du réseau secondaire (tous matériaux confondus)





«Les conséquences impliquent une sorte de perte.»

CALCUL DES CONSÉQUENCES DE DÉFAILLANCES

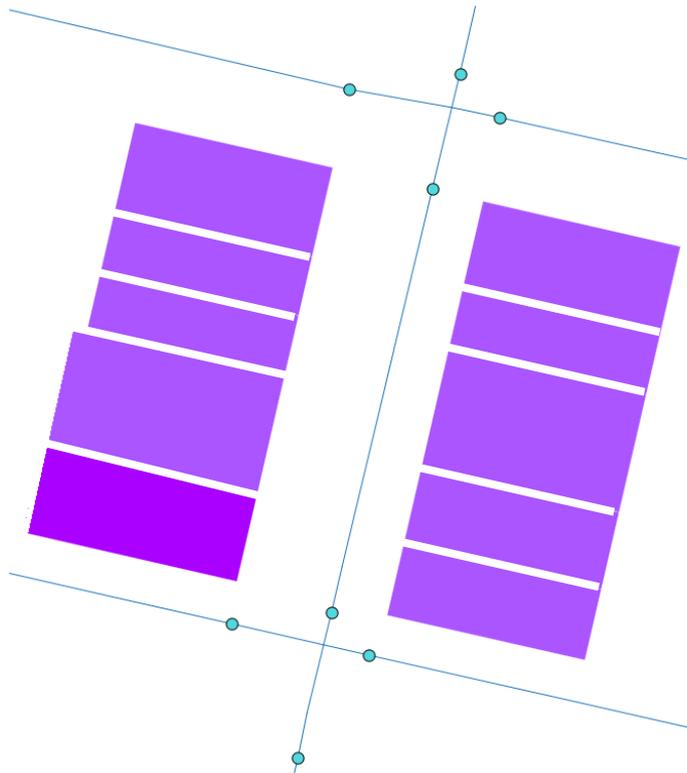
Types de conséquences

- C1 - Catégorie d'utilisateurs
- C2 - Nombre d'utilisateurs affectés (uniquement pour le résidentiel)

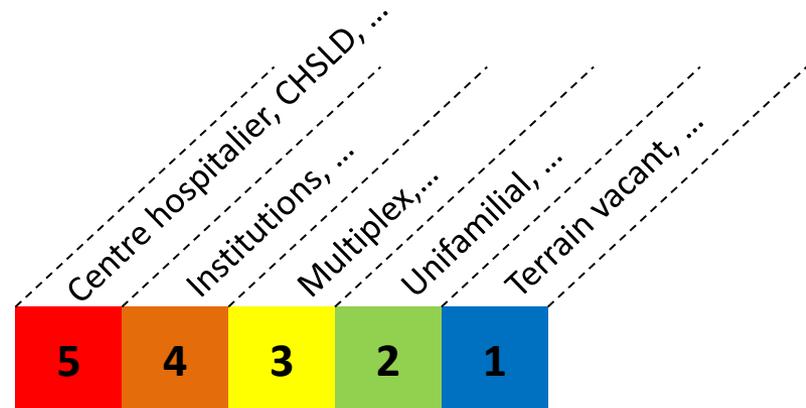


- C3 - Débit
- C4 - Type de chaussée

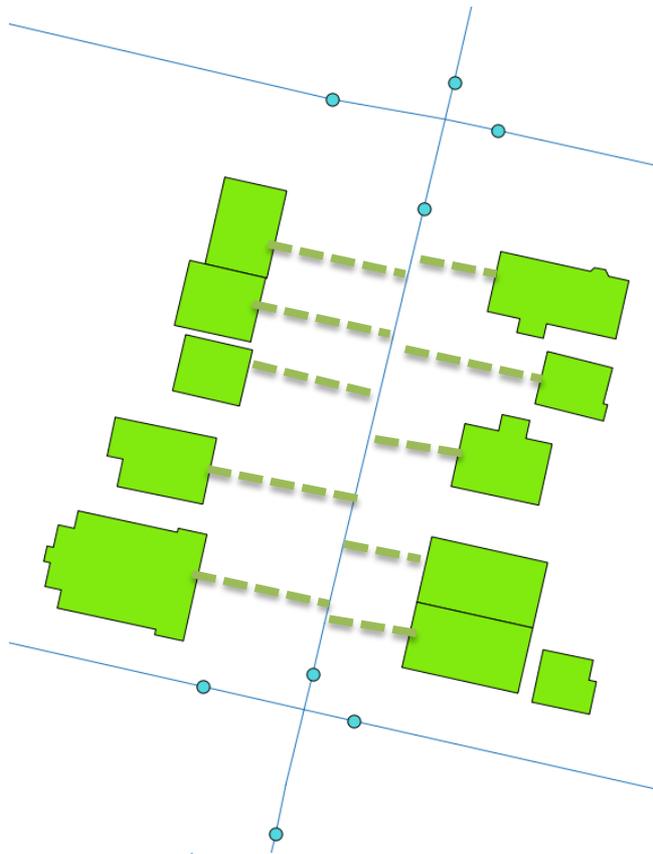
Cote pour la catégorie d'usagers



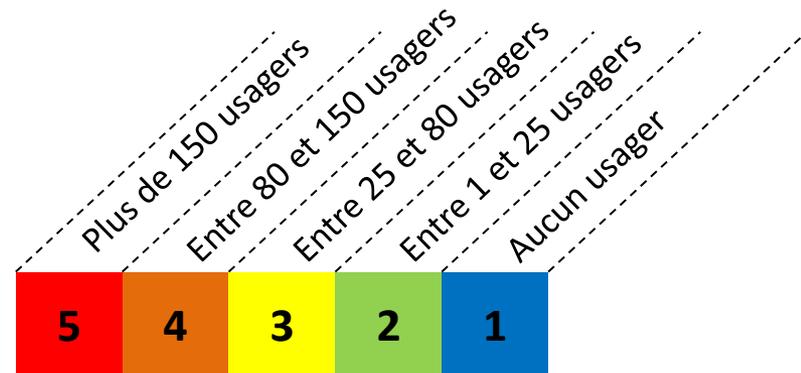
- Près de 35 classes de catégorie d'immeubles présentes dans le cadastre des lots fonciers
- La cote de conséquence est attribuée en fonction du type de catégorie.
- La catégorie la plus élevée en termes d'impact est retenue pour la conduite.



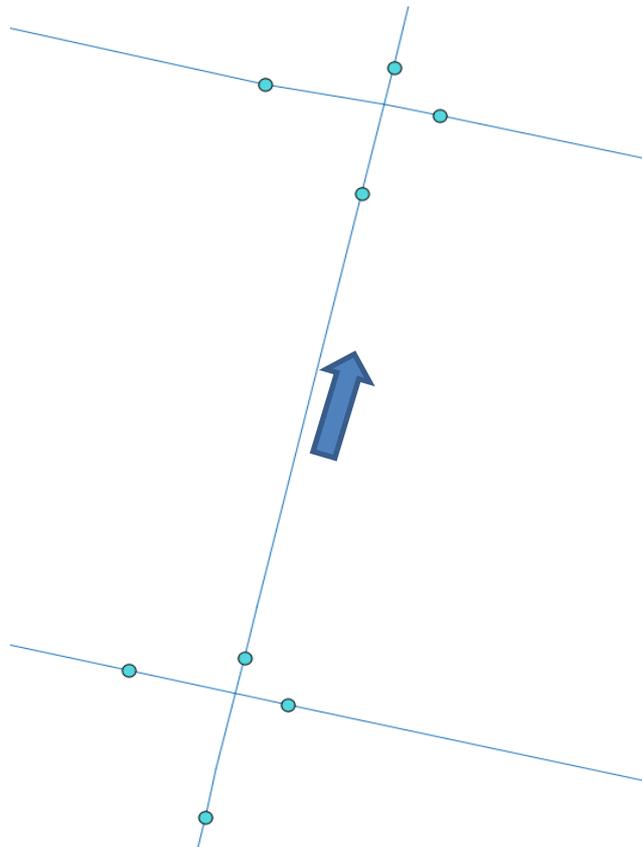
Cote pour le nombre d'usagers affectés



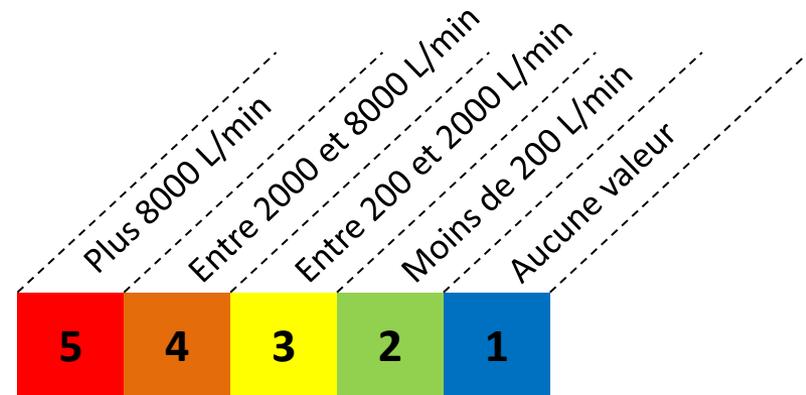
- Ratio de 3.2 personnes par logement (Normes de la Ville de Montréal):
 - Nombre d'usagers affectés = Somme des logements raccordés à la conduite x 3.2
- La cote de conséquence est attribuée en fonction des classes prédéfinies suite à une analyse statistique.



Cote pour le débit

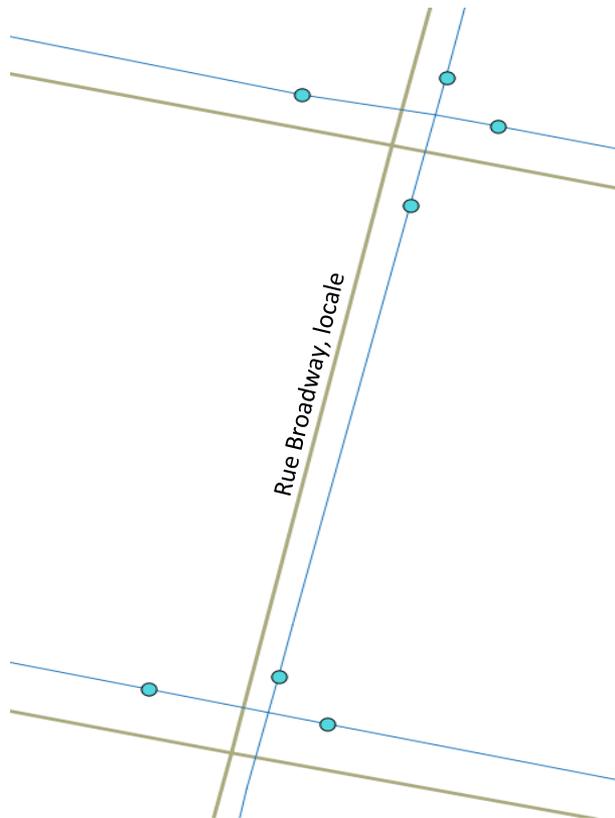


- La demande hydraulique est évaluée par le débit qui transite dans la conduite.
- La cote de conséquence est attribuée en fonction des classes prédéfinies suite à une analyse statistique.





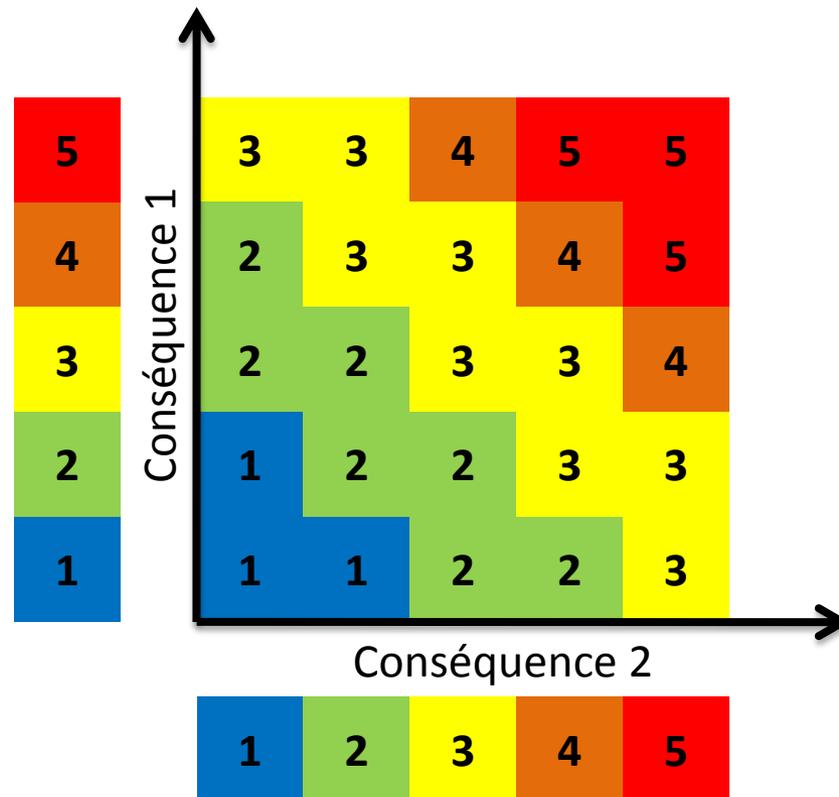
Cote pour le type de chaussée



- La géobase routière comporte 8 classes de chaussée.
- La cote de conséquence est attribuée en fonction de la classification de la géobase.



Matrice de cote finale de CONSÉQUENCE



Cartographie des conséquences

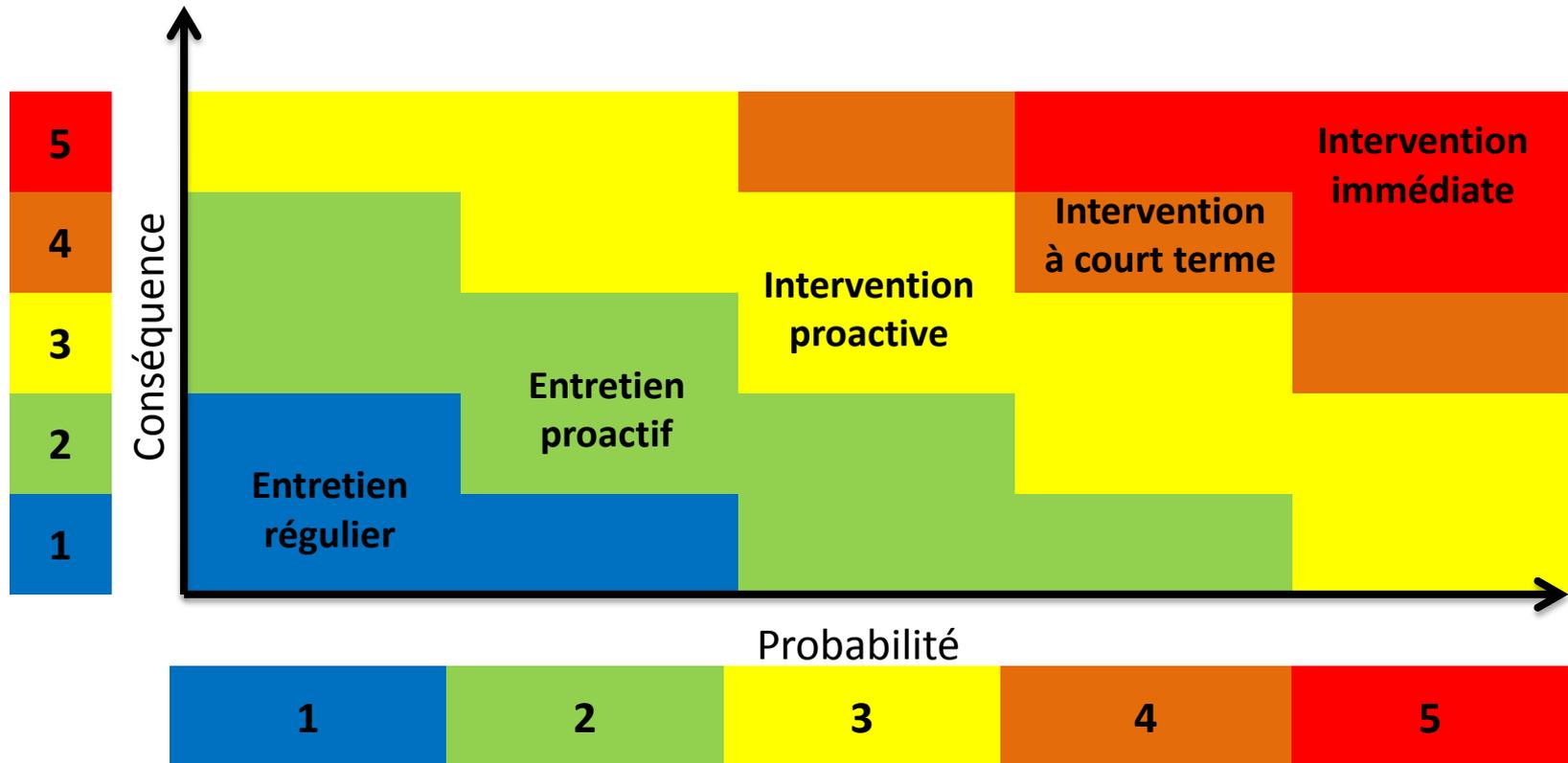




«Le risque est défini par la probabilité d'apparition d'un évènement et la valeur attendue de ses conséquences.»

CALCUL DU RISQUE

Évaluation de la cote de RISQUE



Cartographie des risques





«La qualité des résultats dépend étroitement de la qualité des données et de la justesse de leur interprétation.»

RECOMMANDATIONS



Recommandations

- Maximiser la qualité des données sur les conduites et les bris
 - Conserver les conduites qui ont été remplacées avec leur historique de bris
 - Identifier les conduites qui sont déjà planifiées pour des travaux
- Optimiser l'interopérabilité entre les systèmes (p.ex. WaterGEMS, SIAD)
 - Définir une segmentation unique du réseau dans tous les systèmes (p.ex. de vanne à vanne)
 - Conserver les mêmes identifiants pour les conduites
- Traduire les objectifs stratégiques du Service de l'eau dans la cote de risque
- Approfondir la définition des conséquences
- Refaire l'analyse des risques tous les 3 à 5 ans



«Mieux vaut prévenir que guérir.»

CONCLUSION



Conclusion

- Réseau secondaire d'eau potable: **58 ans** d'âge moyen
- Actuellement, avec un niveau de service de 3 bris/km/an sur une période de 5 ans:
 - Durée de vie estimée à **94 ans**
 - 61% de la durée de vie déjà atteinte
- Près de 4252 bris prédits (2011-2015)
- En intervenant immédiatement sur 1% du linéaire des pires conduites:
 - 318 bris évités
 - 3934 bris restants à gérer
- Nécessité d'identifier des solutions alternatives d'atténuation des risques
 - Particulièrement où les conséquences sont très élevées (p.ex. installer plus de vannes d'isolement, doubler les entrées de service pour les usagers critiques, etc.)