



HAL
open science

Gestion du patrimoine ouvrages d'art : modélisation du vieillissement des bétons sous l'action des chlorures et développement d'outils d'aide à la décision

Nabil Bellaft

► To cite this version:

Nabil Bellaft. Gestion du patrimoine ouvrages d'art : modélisation du vieillissement des bétons sous l'action des chlorures et développement d'outils d'aide à la décision. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2016. dumas-02474299

HAL Id: dumas-02474299

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02474299>

Submitted on 11 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Année : 2016

Voie d'approfondissement :
Génie civil

Nabil Bellaft

Gestion du patrimoine ouvrages d'art

**Modélisation du vieillissement des bétons sous l'action
des chlorures et développement d'outils d'aide à la
décision**

Confidentialité levée en 2018



Travail de Fin d'Etudes

GESTION DU PATRIMOINE OUVRAGES D'ART
Modélisation du vieillissement des bétons sous l'action des
chlorures et développement d'outils d'aide à la décision

Nabil BELLAFT

VA Génie Civil – Ouvrages d'Art

61^{ème} promotion

2015/2016

Président de jury : **Alireza TURE SAVADKOOHI**

Tuteurs entreprise : **Jérôme BARNIER, Emilie BRUNEL**

Expert : **Denis BRANQUE**

Date de la soutenance : **15/09/2016**

Notice analytique

	NOM	PRÉNOM	
AUTEUR	BELLAFT	Nabil	
TITRE DU TFE	GESTION DU PATRIMOINE OUVRAGES D'ART : Modélisation du vieillissement des bétons sous l'action des chlorures et développement d'outils d'aide à la décision		
	ORGANISME D'AFFILIATION ET LOCALISATION	NOM ET PRÉNOM	
MAITRE DE TFE	Autoroutes Rhône-Alpes	Emilie BRUNEL	
COLLATION	Nombre de pages du rapport : 59 pages	6 annexes (20 pages)	7 références bibliographiques
MOTS CLÉS	Ouvrages d'art, composant d'ouvrage, vieillissement, pénétration des ions chlorure, sels de déveglaçage, front critique des chlorures, vulnérabilité, exposition, gestion de patrimoine, maintenance, risque, indice de danger, gravité, indicateur d'état, criticité du risque, hiérarchisation, note IQOA, Chaînes de Markov, matrice de transition d'états		
TERMES GÉOGRAPHIQUES	France, Rhône-Alpes, Bron		
RÉSUMÉ	<p>La Société d'Autoroutes Rhône Alpes AREA est une société concessionnaire d'un réseau autoroutier de 413 Km. D'ici la fin de la convention de concession en 2035, l'entreprise doit respecter ce contrat en garantissant la disponibilité des infrastructures et la sécurité des utilisateurs empruntant ces infrastructures, tout en les maintenant en bon état d'entretien. AREA dispose d'un patrimoine d'ouvrages d'Art conséquent, constitué de 800 ouvrages. Afin de répondre aux obligations du contrat de concession, ce patrimoine fait objet d'actions d'entretien et de maintenance. Confrontée à des problématiques liées au vieillissement des ouvrages d'art, AREA souhaite disposer d'outils permettant d'optimiser la gestion de la maintenance de ces ouvrages.</p> <p>Le sujet de ce TFE comporte deux volets en relation avec la problématique de gestion du patrimoine ouvrages d'art. Le premier objectif est de développer un modèle de vieillissement des parements en béton armé exposés aux agressions salines. Ce modèle permettra aux ingénieurs AREA d'établir un pronostic de détérioration des composants d'ouvrages en béton armé et donc de pouvoir intervenir en amont pour réduire les risques liés à la dégradation des ouvrages.</p> <p>La deuxième partie du TFE a pour objectif de développer des outils d'aide à la décision qui permettront aux ingénieurs AREA d'anticiper les besoins de maintenance et de quantifier les budgets nécessaires pour l'atteinte d'objectifs cibles. Ces outils permettront par ailleurs aux ingénieurs de communiquer avec la direction de l'entreprise pour justifier les actions et les coûts de maintenance.</p>		
ABSTRACT	<p><i>La Société d'Autoroutes Rhône Alpes AREA is a company that operates a 413 Km highway network. Until the end of the concession contract in 2035, the enterprise must ensure the infrastructures availability as well as the security of the users taking those infrastructures while at the same time keeping these infrastructures in a good state of maintenance. AREA operates a sizable asset of 800 bridges. In order to meet the terms of the concession convention, this asset is subjected to maintenance and repair programs. Facing issues related to the ageing of structures, AREA wants to have tools and techniques that will make it possible to optimize the management of the company's bridge asset.</i></p> <p>This study addresses two main subjects related to the issue of bridge asset management. The objective of the first part of the internship is to develop an ageing model for reinforced concrete bridge components exposed to deicing salts attacks. This model will allow the engineers to predict the deterioration of reinforced concrete structures and thus will enable them to take appropriate actions in a good timing to prevent the occurrence of higher risks related to deterioration of the structures.</p> <p>The second part of the study aims to develop decision support tools which will help AREA's engineers to anticipate the needs in terms of maintenance actions as well as to quantify the necessary resources to achieve objectives that can be imposed. These tools will also be useful for the engineers to communicate with the company executives in order to justify the choice of maintenance actions and the related costs.</p>		

Remerciements

Je tiens à remercier :

- Michel CHARRAT Chef du Département Infrastructures pour ses conseils avisés et ses remarques instructives
- Jérôme BARNIER Chef du Pôle Patrimoine et Ouvrages d'Art pour son expertise, sa disponibilité et surtout pour ses qualités techniques aussi bien qu'humaines qui m'ont permis de m'épanouir au sein du Pôle
- Emile BRUNEL Ingénieur conductrice d'opérations pour sa disponibilité, son encadrement et pour m'avoir fait partager son expérience à travers des visites sur le terrain
- Le bureau d'étude OXAND pour son assistance, ses remarques et son apport technique considérable dans le cadre de ce TFE
- Le bureau d'étude CERA pour m'avoir fait profiter d'une journée sur le terrain

Ainsi que l'ensemble du personnel AREA pour leur accueil, leur disponibilité et leur convivialité.

Table des matières

Notice analytique	3
Remerciements	5
Liste des figures.....	8
Liste des tableaux.....	9
Introduction	11
I- Contexte du Travail de Fin d'Études	12
1- Présentation de la structure d'accueil.....	12
1.1- Le groupe APRR.....	12
1.2- AREA.....	13
1.3- Le patrimoine ouvrage d'art AREA.....	14
2- La gestion du patrimoine ouvrages d'art ; bases, objectifs et enjeux.....	15
2.1- Les bases de la gestion du patrimoine ouvrages d'art.....	15
2.2- Objectifs et enjeux de la gestion du patrimoine OA au sein d'AREA	16
3- Besoin AREA – Problématique du TFE	16
II- Première phase du TFE : mise au point de modèles prédictifs de pénétration des chlorures	17
1- La corrosion des aciers sous l'action des sels	17
1.1- Désordres liés à la corrosion des aciers du béton armé	17
1.2- Mécanisme de la corrosion des aciers sous l'effet des chlorures.....	20
2- Modélisation de la pénétration des chlorures dans le béton	21
2.1- L'intérêt de la modélisation	21
2.2- Les données d'entrée pour la mise au point du modèle	21
2.3- Elaboration du modèle	22
2.3.1- Principe de la modélisation.....	22
2.3.2- Quantification des paramètres du modèle à partir des diagnostics disponibles	24
2.3.3- Généralisation du modèle	24
2.3.4- Synthèse.....	28
III- Deuxième phase du TFE : développement d'outils d'aide à la gestion du patrimoine OA	29
1- Evaluation de l'état des ouvrages	29
1.1- Indice IQOA	30
1.2- Indice interne AREA	30
2- Outil basé sur une approche d'analyse par le risque	32
2.1- Méthode de l'analyse par le risque	32
2.2- Construction de l'outil d'analyse par le risque	34
2.2.1- Quantification des risques	34
2.2.2- Définition des opérations de maintenance	39
2.2.3- Hiérarchisation des ouvrages et programmation des opérations de maintenance.....	41

3-	<i>Outil basé sur l'historique de la notation IQOA des ouvrages d'art</i>	44
3.1-	Principe de la méthode : modélisation de la détérioration des ouvrages par les Chaines de Markov.....	44
3.1.1-	Présentation de l'approche probabiliste de la détérioration des ouvrages.....	44
3.1.2-	Définitions	46
3.1.3-	Modélisation de l'évolution de l'état d'un ouvrage par les chaînes de Markov :	46
3.2-	Construction de l'outil	47
3.2.1-	Définition de la matrice de transition d'état : probabilisation de la note IQOA	47
3.2.2-	Prise en compte des opérations de maintenance : matrices de maintenance	50
3.2.3-	Définition de la matrice des couts de maintenance.....	51
3.2.4-	Structuration de l'outil, définitions d'objectifs et optimisation.....	51
3.2.5-	Limites du modèle	57
IV-	Synthèse et conclusion	58
	Bibliographie	59
	Annexes	60
	Annexe 1 : Extrait de diagnostic réalisé sur un ouvrage d'art	61
	Annexe 2 : Observations à propos de l'étude 2013	62
	Annexe 3 : Construction d'un modèle de vieillissement des parements en béton soumis aux agressions salines	65
	Annexe 4 : Calcul des gravités liées aux objectifs de disponibilité et de sécurité	71
	Annexe 5 : Justification des hypothèses de Markov et d'homogénéité	72
	Annexe 6 : Exemple de scénarios issus de l'exploitation de l'outil basé sur l'analyse par les risques	76

Liste des figures

Figure 1 Réseau autoroutier du groupe APRR - Chiffres clés du groupe	12
Figure 2 Organigramme du groupe APRR	13
Figure 3 Réseau AREA	13
Figure 4 Organigramme du Département Infrastructure de la DEX AREA	14
Figure 5 Principe de la gestion du patrimoine OA AREA.....	15
Figure 8 Saleuse entrain de projeter de la saumure pour prévenir la formation du verglas.....	17
Figure 7 Carte des zones de gel (à gauche) et Carte des zones de rigueur hivernale (à droite).....	17
Figure 6 Saleuse : outil de déneigement qui permet de répandre le sel sur la chaussée.....	17
Figure 9 Exemples de désordres induits par l'exposition aux chlorures.....	18
Figure 10 Exemples de désordres induits par l'exposition aux chlorures (suite).....	19
Figure 11 Processus de corrosion des aciers sous l'effet des ions chlorure	20
Figure 12 Evolution de l'état de corrosion des aciers dans le temps.....	20
Figure 13 Principe de la modélisation de la pénétration des ions chlorure	22
Figure 14 Profils des chlorures à des instants différents	23
Figure 15 Front Critique des Chlorures.....	23
Figure 16 Identification des paramètres de la modélisation	24
Figure 17 Démarche adoptée pour modéliser le vieillissement des bétons exposés aux agressions salines.....	28
Figure 18 Descriptifs des différents composants d'ouvrages et des indicateurs d'état associés	31
Figure 19 Positionnement de l'analyse de risques dans le cadre de la gestion des OA	32
Figure 20 Démarche adoptée pour mener une analyse par le risque	33
Figure 21 Construction de l'indicateur d'état modélisé pour les parements en béton armé.....	34
Figure 22 Démarche permettant de déterminer les temps de transition entre états.....	35
Figure 23 Démarche pour déterminer l'indice de danger pour les composants structurels d'un OA	36
Figure 24 Deux autoroutes AREA avec des densités de trafic différentes.....	36
Figure 25 Démarche permettant de quantifier la gravité-disponibilité.....	37
Figure 26 Matrice de criticité du risque.....	38
Figure 27 Effet des 3 types de maintenance sur l'état du composant PP	39
Figure 28 Illustration de quelques opérations de réparation sur les piles et piédroits d'OA	40
Figure 29 Principe d'hierarchisation des ouvrages par rapport aux enjeux de disponibilité et de sécurité.....	42
Figure 30 Principe d'hierarchisation des ouvrages par rapport à l'enjeu contractuel.....	43
Figure 31 Principe de la modélisation probabiliste de l'évolution de l'état des structures.....	45
Figure 32 Interprétation graphique de la modélisation probabiliste de la détérioration des structures.....	45
Figure 33 Méthode développée pour modéliser l'évolution de l'état des ouvrages en se basant sur les chaînes de Markov.....	53

Liste des tableaux

Tableau 1 Mécanismes d'exposition des parements aux sels	18
Tableau 2 Données relatives aux piles et pieds droits d'ouvrages pour lesquels on dispose de diagnostics.....	25
Tableau 3 Définition des classes IQOA	30
Tableau 4 Coefficients de vulnérabilité structurelle par type d'ouvrage	36
Tableau 5 Définition des opérations de maintenance sur les piles d'ouvrages.....	39
Tableau 6 Définition des opérations de maintenance sur piédroits d'ouvrages	39
Tableau 7 Forme de la matrice des coûts de maintenance	51

Introduction

La plupart des autoroutes françaises sont aujourd'hui gérées et exploitées par des sociétés privées dans le cadre de conventions de concessions conclues entre ces entreprises et l'Etat.

A travers ces contrats, l'Etat délègue le financement, la construction, l'exploitation et l'entretien du réseau autoroutier à des sociétés concessionnaires, en contrepartie de la perception d'un péage auprès des utilisateurs du réseau, pour une durée déterminée préalablement. En fin de concession, lorsque les contrats arriveront à leurs termes, les réseaux autoroutiers seront restitués à l'Etat.

L'Etat fixe, dans le cadre de ces contrats, des objectifs aux différentes sociétés concessionnaires et, notamment, les niveaux de service d'exploitation attendus. Les contrats permettent en outre à l'Etat de programmer avec les sociétés concessionnaires les investissements supplémentaires à réaliser au cours de la vie de la concession, et d'ajuster les augmentations tarifaires nécessaires pour le financement de ceux-ci.

Concessionnaire d'un réseau autoroutier de 397 Km, la société des Autoroutes Rhône-Alpes AREA détient un contrat de concession jusqu'en 2035. L'objectif des dirigeants d'AREA est de maintenir les infrastructures du réseau exploité dans un bon état de service de manière à répondre aux obligations du contrat de concession, tout en assurant la sûreté de l'exploitation.

Parmi les objectifs de performances visés par AREA, figure une gestion efficace du patrimoine d'ouvrages d'art. En effet, la haute valeur stratégique de ces ouvrages oblige à ce que ces derniers fassent l'objet d'une gestion rigoureuse qui inclut à la fois un suivi en continu de ce patrimoine ainsi que des opérations de maintenance appropriées.

La stratégie de gestion du patrimoine des ouvrages d'art répond à la convention de concession entre AREA et l'Etat :

- Assurer la disponibilité des ouvrages (prévenir la perte de capacité partielle ou totale)
- Assurer la sécurité des ouvrages (vis-à-vis des clients et autres usagers de l'autoroute)
- Assurer la durabilité des ouvrages (maintien des ouvrages en « bon état d'entretien »)

Afin d'organiser et de mieux structurer la gestion du patrimoine ouvrages d'art, AREA utilise plusieurs systèmes d'indicateurs de performances pour suivre l'état du patrimoine ainsi qu'une base de données qui centralise toutes les informations relatives aux ouvrages d'art et notamment les opérations de maintenance.

Confrontée à des problématiques liées au vieillissement des ouvrages d'art, AREA souhaite exploiter ses bases de données et son retour d'expérience pour développer des outils d'aide à la gestion. Ces outils permettront aux ingénieurs d'AREA de mieux appréhender les mécanismes de détérioration des ouvrages afin de prévoir l'évolution de leur état et de pouvoir ainsi prendre des décisions pertinentes vis-à-vis des opérations de maintenance à entreprendre.

La présente étude, qui vise d'une part la modélisation du vieillissement des bétons soumis aux agressions salines et d'autre part le développement d'outil d'aide à la décision, s'inscrit donc dans une dynamique de respect des objectifs de la gestion de patrimoine.

I- Contexte du Travail de Fin d'Études

1- Présentation de la structure d'accueil

1.1- Le groupe APRR

Le groupe autoroutier Paris-Rhin-Rhône est une société concessionnaire d'un réseau de près de 2300 kilomètres déployé dans l'est de la France. Depuis 2006, date de la privatisation par l'Etat, APRR appartient au consortium Effarie (détenu à part égale par Eiffage et Macquarie, une banque d'investissement australienne). APRR est le deuxième groupe autoroutier en France et le quatrième en Europe.

Ses principales missions sont la construction et l'exploitation d'infrastructures autoroutières dans des conditions optimales de fluidité, de trafic, de sécurité, de confort et de service auprès des usagers. Déployé dans l'est de la France, son réseau et les activités qui en découlent permettent ainsi de structurer les territoires et de favoriser leur développement économique et touristique.

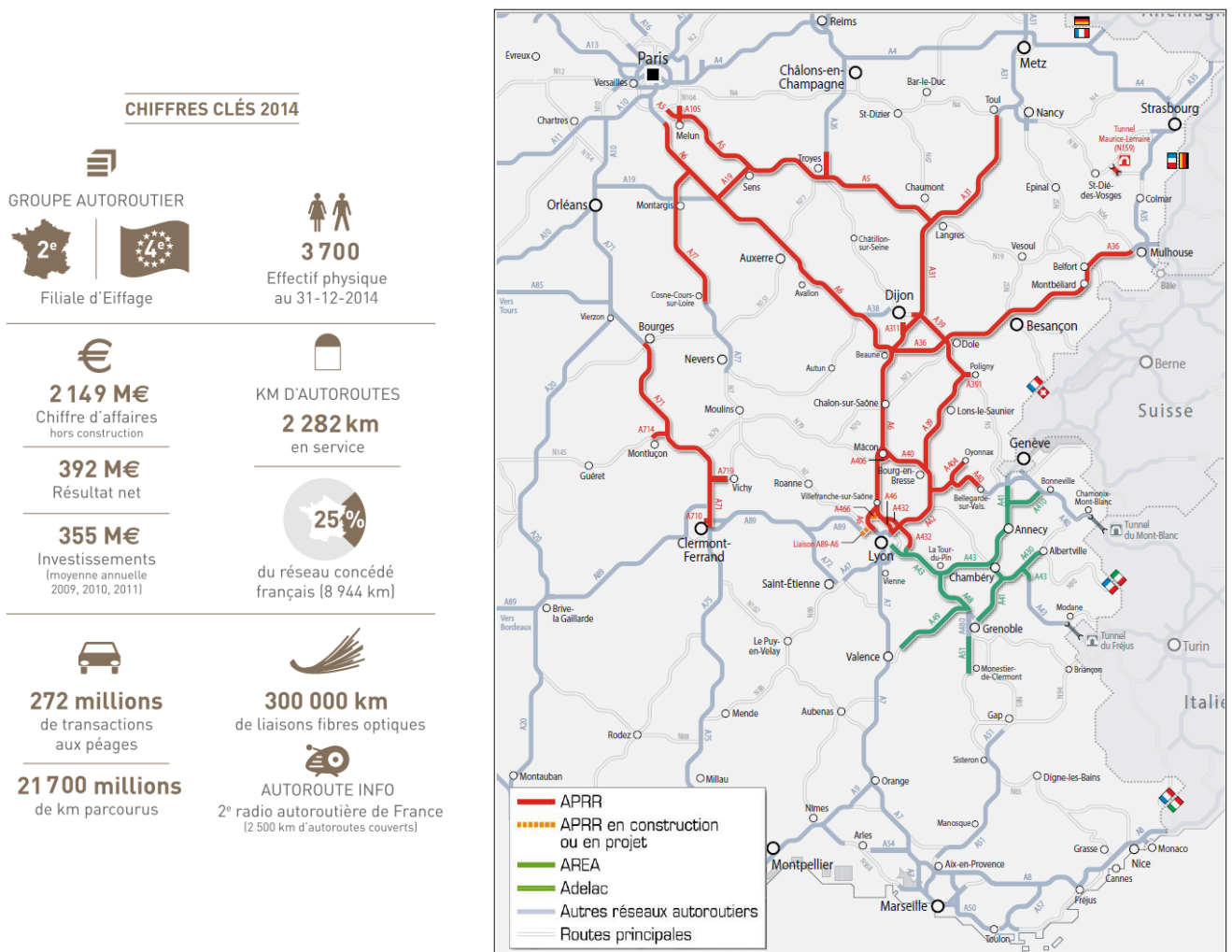


Figure 1 Réseau autoroutier du groupe APRR - Chiffres clés du groupe

- Organigramme de la direction du groupe APRR :

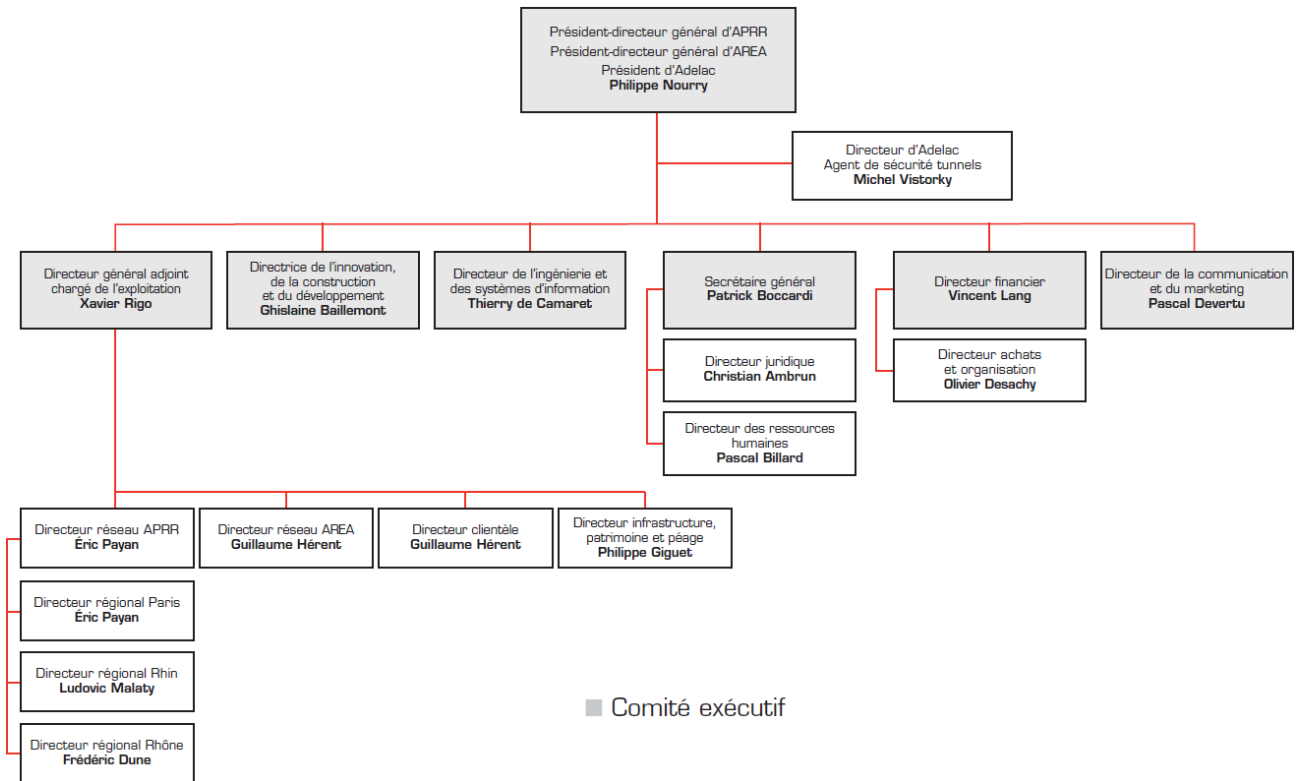


Figure 2 Organigramme du groupe APRR

1.2- AREA

La Société des Autoroutes Rhône-Alpes a été fondée en 1971 pour construire et gérer les autoroutes desservant l'ensemble du réseau Rhône-Alpes. AREA est devenue filiale du groupe APRR en 1994 et exploite actuellement un linéaire de 413 km d'autoroutes (A41, A410, A43, A432, A48, A49, A51).

L'activité de la direction d'exploitation d'AREA repose sur trois directions principales :

- La Direction Clientèle qui gère les relations clients
- La Direction Réseau dont la mission est d'assurer la sécurité du réseau
- La Direction Infrastructure, Patrimoine et Péage qui gère le patrimoine infrastructure APRR et AREA

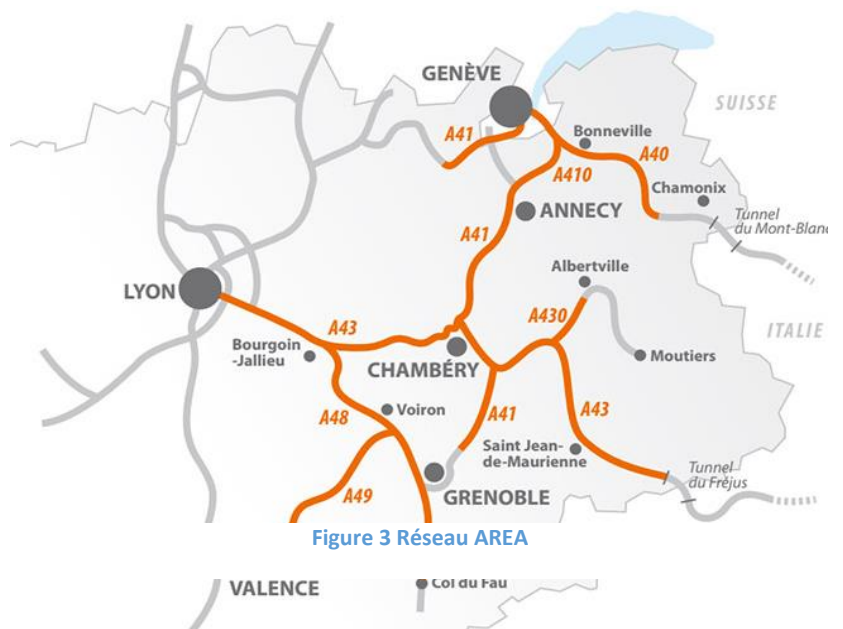


Figure 3 Réseau AREA

Ces trois directions sont épaulées par d'autres services, notamment le Service Parc Achats, le Département Viabilité Sécurité Trafic, le Département Equipement ainsi que le Pôle Prévention et Sécurité du Personnel.

Le réseau autoroutier exploité par AREA est scindé en cinq zones. Chaque zone est supervisée par un Centre d'Entretien qui assure la maîtrise d'œuvre des chantiers ainsi que toutes les activités de suivi, de surveillance et d'entretien des infrastructures autoroutières.

J'ai réalisé mon Travail de Fin d'Etudes au sein du Département Infrastructure basé dans les locaux d'AREA à BRON, et plus précisément au du Pôle Patrimoine et Ouvrages d'Art.

- Organigramme du Département Infrastructure AREA :

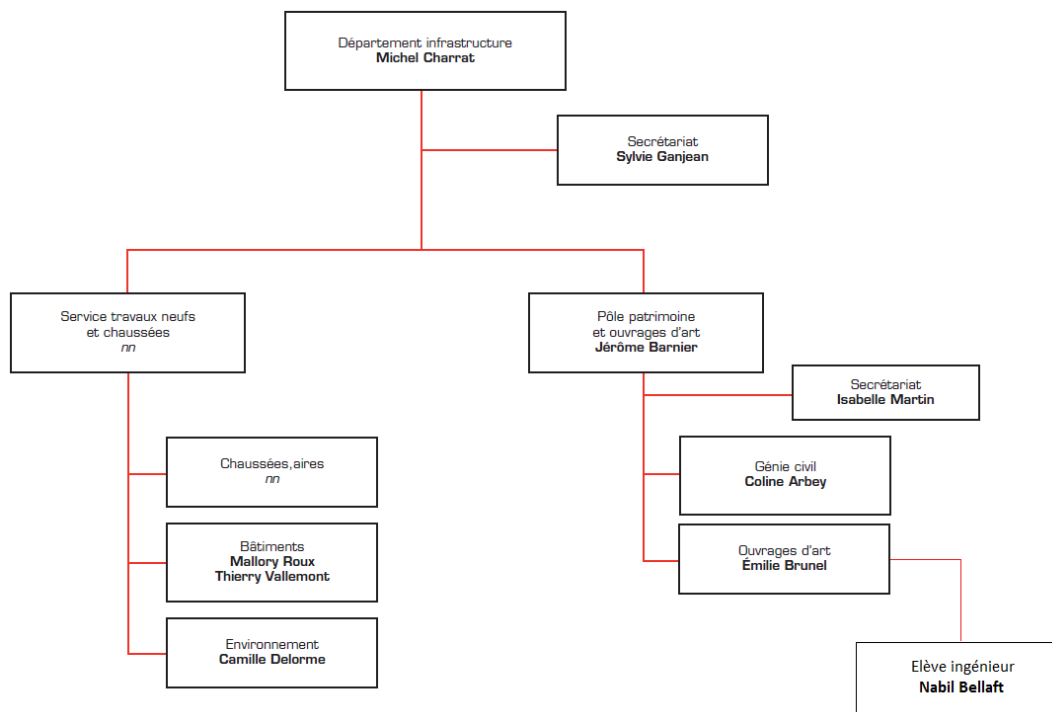


Figure 4 Organigramme du Département Infrastructure de la DEX AREA

1.3- Le patrimoine ouvrage d'art AREA

Le patrimoine d'ouvrages d'art d'AREA est constitué de :

- 790 ponts dont 352 passages supérieurs et inférieurs et 49 viaducs, représentant près de 375 000 m² de tablier
- 71 murs de soutènement d'environ 110 000m² de surface, protégeant ou supportant 19km d'autoroutes
- 5 tunnels d'une longueur totale de 12,6 km
- 400 PPHM¹ – 90 Pylônes – 40 Auvents de gare

La valorisation de ce patrimoine s'élevé à près de 2 milliards d'euros, répartis comme suit :

- Patrimoine ponts – 1 milliard d'euros (2750 €/m²)
- Patrimoine murs de soutènement – 82.5 millions d'euros (750 €/m²)
- Patrimoine tunnels – 756 millions d'euros (60 000 €/ml de tube)
- Patrimoine équipements (pylônes, PPHM, auvents) – 20 millions d'euros

¹ Portiques, potences et hauts mâts

2- La gestion du patrimoine ouvrages d'art ; bases, objectifs et enjeux

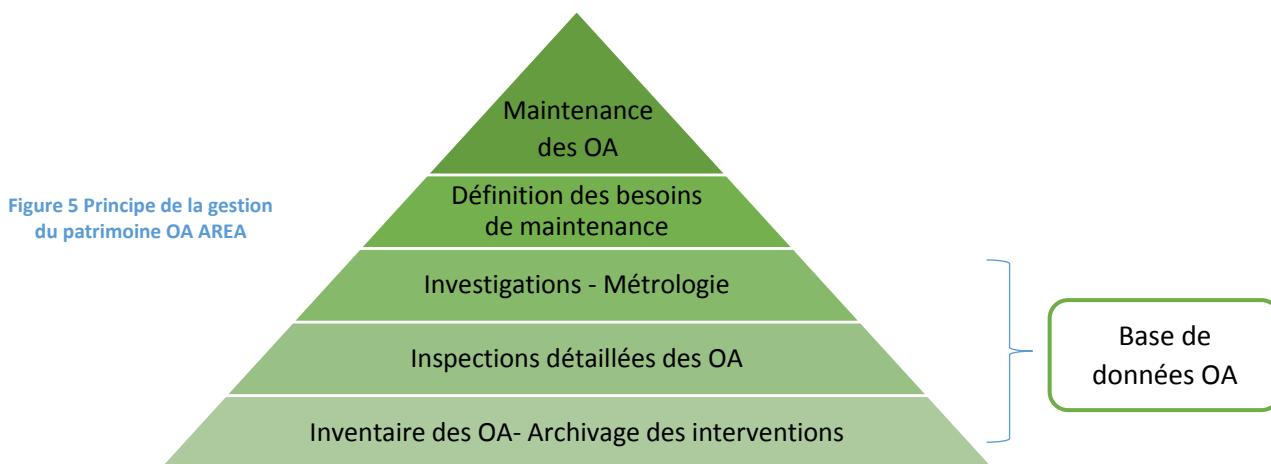
Les ouvrages d'art sont des éléments ponctuels des infrastructures routières. Ils englobent une grande variété de structures (viaducs, ponts, tunnels, buses, murs de soutènement).

Si l'intérêt économique de chacun d'entre eux peut varier selon son utilisation et sa capacité, tous nécessitent un suivi rigoureux et une maintenance efficace. Le Maître d'Ouvrage d'un patrimoine d'infrastructures doit définir une politique d'entretien et de préservation des ouvrages d'art.

Dans de cas des sociétés concessionnaires d'autoroutes, la Maîtrise d'Ouvrage est assurée par la société concessionnaire. Celle-ci est responsable de la gestion du réseau autoroutier qu'elle exploite et notamment la gestion des ouvrages d'arts. Au sein d'AREA, la mission de gestion du patrimoine ouvrage d'art est assurée par les ingénieurs du Pôle Patrimoine Ouvrage d'Art.

La gestion du patrimoine d'ouvrages d'art est une mission complexe qui nécessite une bonne connaissance du patrimoine et qui fait appel à des compétences techniques variées par rapport au domaine des ouvrages d'art (calcul de structures, pathologies d'ouvrages, techniques de réparation d'ouvrages ainsi que des compétences en marché public et en conduite de projet). C'est également un domaine qui fait intervenir une multitude d'acteurs et de compétences.

2.1- Les bases de la gestion du patrimoine ouvrages d'art



La gestion du patrimoine OA au sein du pôle Ouvrages d'Art AREA repose sur les éléments suivants :

- **Le recensement et la description technique** de tous les ouvrages qui composent le parc et l'**archivage** de l'ensemble des opérations menées sur le patrimoine :

Chacun des ouvrages d'art du parc AREA possède un dossier. Ce dossier contient l'ensemble des informations relatives à l'ouvrage depuis sa construction et qui sont nécessaires pour assurer la gestion de l'ouvrage dans tous les domaines ; technique, administratif et juridique. Le dossier d'ouvrage est le carnet de santé de l'ouvrage permettant de connaître son histoire et son évolution.

- **Un suivi périodique de l'état du patrimoine** qui permet d'obtenir une image fiable en continu de l'état de chaque ouvrage :

Le suivi de l'état du patrimoine d'ouvrages d'art est assuré grâce à des actions de surveillance périodiques qui permettent de disposer d'une connaissance précise de l'état de chaque ouvrage ou composant d'ouvrage. **Les inspections détaillées des OA²** constituent l'entrant principal pour ce qui concerne la prise de décisions relatives à la gestion du patrimoine.

- **La prise de décisions en termes de priorités** par rapport aux opérations d'entretien et de maintenance des OA

Afin de pouvoir prendre des décisions concernant la maintenance des ouvrages d'art, le Pôle OA se base sur un ensemble de critères pour justifier et optimiser ses choix. En plus des résultats des inspections visuelles, le Pôle recourt à des indicateurs d'état qui rendent compte de l'état des ouvrages ainsi que des indicateurs de performance

² Il s'agit d'inspections périodiques menées sur l'ensemble des ouvrages. Les ouvrages du parc AREA sont soumis à des inspections détaillées d'une fréquence de l'ordre de 5 ans. Dans ces inspections, toutes les parties d'ouvrage sont analysées et évaluées.

qui combinent à la fois l'état de l'ouvrage et sa valeur stratégique. A cela s'ajoute les contraintes d'exploitation qui sont prises en compte : l'organisation des travaux et la planification. Tous ses éléments aboutissent à une priorisation des actions à mener sur le patrimoine.

- **La programmation des opérations** à mener sur le parc d'ouvrages d'art et la **prévision des enveloppes financières** adéquates :

A la suite des étapes précédentes, les actions à entreprendre sont planifiées et la programmation budgétaire associée est établie.

2.2- Objectifs et enjeux de la gestion du patrimoine OA au sein d'AREA

Les objectifs principaux de la gestion du patrimoine d'AREA sont

- Garantir la disponibilité des infrastructures,
- Garantir la sécurité des usagers sur l'ensemble du réseau,
- Garantir le bon état d'entretien des ouvrages à la fin de la concession.

Ces objectifs se traduisent par des enjeux majeurs du point de vue :

- Exploitation : la gêne occasionnée en cas d'indisponibilité d'un ouvrage croît avec l'importance des enjeux socio-économiques (valeur stratégique de l'ouvrage)
- Juridique : la mise en danger des usagers en raison du mauvais état d'un ouvrage engage la responsabilité pénale de la société
- Financier : une action tardive entraîne un surcoût des travaux de réparation et d'exploitation.

3- Besoin AREA – Problématique du TFE

Le patrimoine OA exploité par AREA a une moyenne d'âge de 35 ans. Comme toute structure de génie civil, ces ouvrages peuvent être affectés par des désordres de gravités très variables et dont les causes sont multiples. La présence de déformations et de fissurations inhabituelles est souvent le signe visible d'une pathologie définie. Toutefois, dans le cas de certains types de pathologies, comme c'est le cas de la corrosion des aciers induite par les chlorures, les ouvrages peuvent être sévèrement affectés et ce avant l'apparition de signes extérieurs.

Face aux problématiques liées au vieillissement des ouvrages d'art, AREA souhaite disposer de moyens lui permettant d'une part, d'agir en amont afin de réduire des risques liés à la détérioration des ouvrages et d'autre part, d'être en mesure de prévoir et de quantifier les besoins nécessaires au maintien en bon état des ouvrages et de pouvoir affecter de manière optimale les ressources en fonction de l'état des ouvrages.

Le présent travail de fin d'étude porte sur deux volets en lien avec la problématique de la gestion du patrimoine OA :

- Le développement d'un modèle prédictif de pénétration des chlorures dans les parements en béton armé
- Le développement d'outils permettant de piloter la stratégie de maintenance des ouvrages d'art. Ces outils permettront de simuler des scénarios de maintenance différents en fonction d'objectifs à atteindre en fin de concession (2035) et de définir les trajectoires budgétaires permettant d'atteindre ces objectifs.

Dans les chapitres suivants, je vais détailler chacune de mes missions durant ce stage. Dans un premier temps, je m'intéresserai à la modélisation de la pénétration des chlorures dans le béton. Par la suite, j'aborderai en détail les outils que j'ai développés dans le cadre de l'optimisation de la gestion du patrimoine d'ouvrages d'art AREA.

II- Première phase du TFE : mise au point de modèles prédictifs de pénétration des chlorures dans les parements en béton armé exposés aux sels de déverglaçage

1- La corrosion des aciers sous l'action des sels, facteur majeur de la détérioration des parements en béton armé

La corrosion des aciers induite par les ions chlorures est de loin la cause prépondérante de la dégradation des structures en béton armé. La corrosion des armatures conduit à la formation de produits expansifs qui occupent un volume plus important que celui des aciers ce qui génère par conséquent des contraintes mécaniques au sein du béton entraînant plusieurs formes de désordres (écaillage, fissuration, éclatement d'enrobage, perte d'adhérence...).

Fort concernée par l'état de son patrimoine, AREA souhaite développer un outil pour modéliser l'évolution de la concentration des chlorures dans les parements en béton armé dans le but d'anticiper les désordres résultant de la corrosion des aciers.

1.1- Désordres liés à la corrosion des aciers du béton armé

La pénétration des chlorures dans les parements en béton armé sous l'action de polluants extérieurs est l'une des formes majeures d'agression chimique auxquels sont exposés les ouvrages d'art. Dans le cas du patrimoine d'ouvrages AREA, il s'est avéré par expérience, à travers les différentes études et investigations qui ont été réalisées, que la cause dominante des désordres affectants la majorité des structures est l'attaque du béton armé par les ions chlorures provenant des sels³ utilisés pour le déneigement des chaussées.

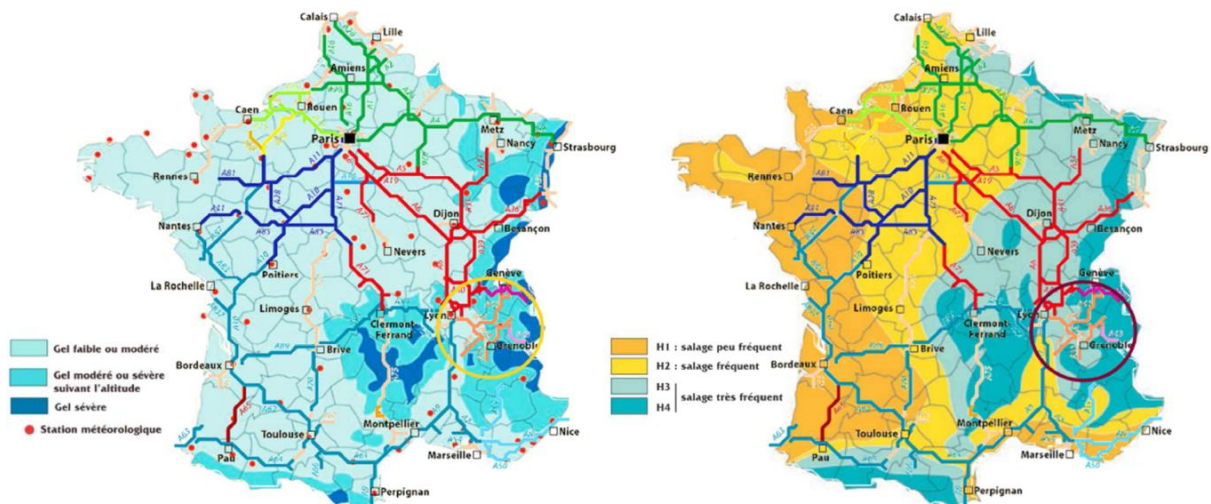


Figure 8 Carte des zones de gel (à gauche) et Carte des zones de rigueur hivernale (à droite) _ NF EN 206-1/CN



Figure 7 Saleuse : outil de déneigement qui permet de répandre le sel sur la chaussée



Figure 6 Saleuse entrain de projeter de la saumure pour prévenir la formation du verglas

³ Les sels de déneigement ou fondants routiers sont des produits (naturel ou chimique) utilisés en service hivernal pour abaisser le point de congélation de l'eau, ce qui permet de faire fondre la glace. Pour ce qui concerne le réseau AREA, deux types de fondants sont utilisés par les Centres d'Entretien ; le chlorure de sodium (NaCl) qui est le plus consommé en termes de masse (plus de 90 %) et le chlorure de calcium (CaCl). Les sels de déneigement sont utilisés sous forme de saumure obtenue par mélange de sel et de l'eau.

En fonction du composant de l'ouvrage, le mécanisme d'agression par les sels peut varier :

Composant en béton armé	Mécanismes d'exposition aux sels
Trottoir / Longrine	Projection directe suite au passage des véhicules Stagnation
Corniche	Ruissellement ou percolation Brouillard salin
Intrados / Encorbellement	Ruissellement ou percolation Infiltration Brouillard salin
Chevêtre de culée / Voussoir d'about	Ruissellement Stagnation
Pile / Piédroit	Projection directe suite au passage des véhicules

Tableau 1 Mécanismes d'exposition des parements aux sels

Selon le type de la structure, on constate que les désordres induits par l'exposition aux sels de déverglaçage sont similaires d'un ouvrage à un autre. Les images suivantes illustrent quelques types de désordres que l'on rencontre sur certains ouvrages :



Corniches – PS3091



Intrados - Viaduc du Chéran



Intrados – PS152

Figure 9 Exemples de désordres induits par l'exposition aux chlorures



Voussoir d'about – PS368



Voussoir d'about – PS152



Pile – PS373



Piédroit – PI3001



Trottoir – PS826



Trottoir – PS310

Figure 10 Exemples de désordres induits par l'exposition aux chlorures (suite)

1.2- Mécanisme de la corrosion des aciers sous l'effet des chlorures

Les armatures du béton armé, généralement en acier, sont normalement protégées chimiquement par le milieu alcalin assuré par la matrice cimentaire (pH aux environs de 12 à 13) et physiquement par la présence d'un enrobage qui retarde l'intrusion d'agents agressifs. Tant que l'acier est dans un environnement suffisamment basique, celui-ci développe une fine couche d'oxyde de Fer (Fe_2O_3) qui l'isole des électrolytes et contribue ainsi à sa protection. On dit que l'acier est passivé.

Toutefois, sous l'effet de la diffusion des chlorures au sein du béton, la couche de passivation se retrouve attaquée par endroits, à cela s'ajoute l'action du dioxyde de carbone qui est responsable de l'abaissement du pH du béton, contribuant ainsi à l'amenuisement de la couche de passivation.

Il en résulte l'apparition d'une différence de potentiel entre les parties passives et actives des aciers ; cette différence conduit à des réactions chimiques aboutissant à la formation des produits expansifs de la corrosion.

Les schémas ci-dessous synthétisent le processus de détérioration du béton sous l'effet de la corrosion des aciers :

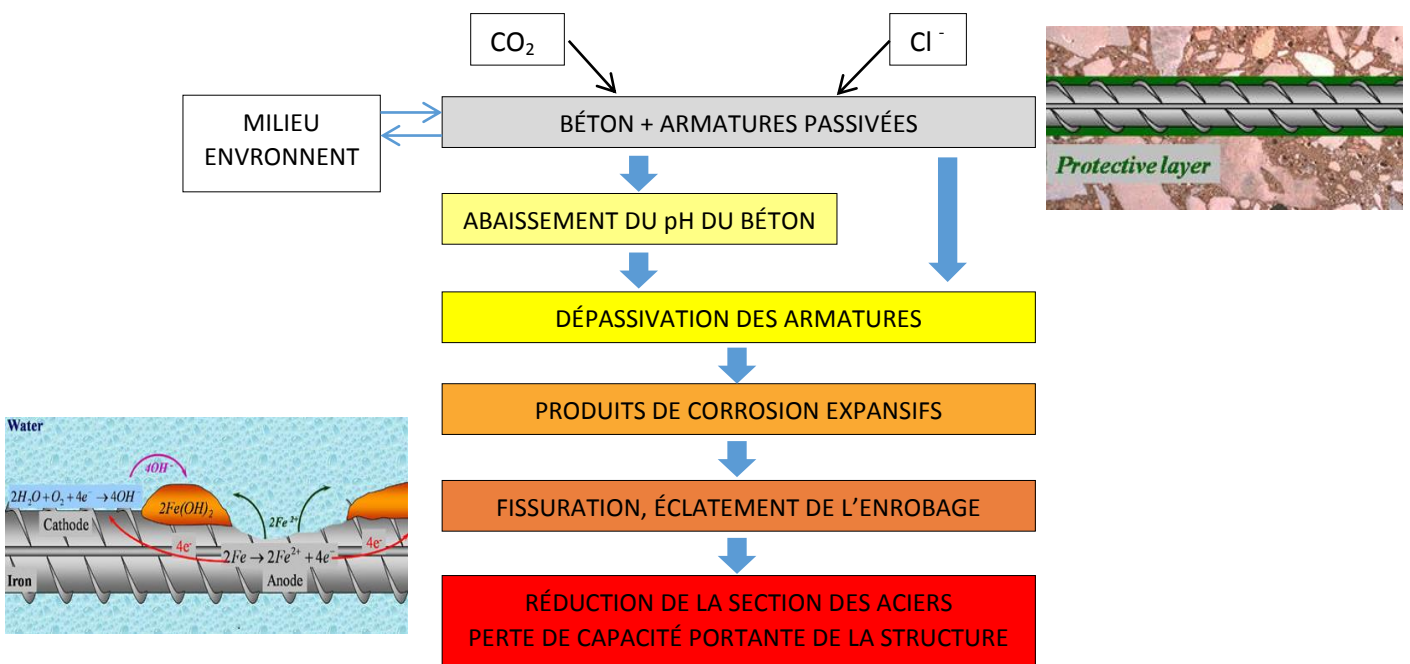


Figure 11 Processus de corrosion des aciers sous l'effet des ions chlorure

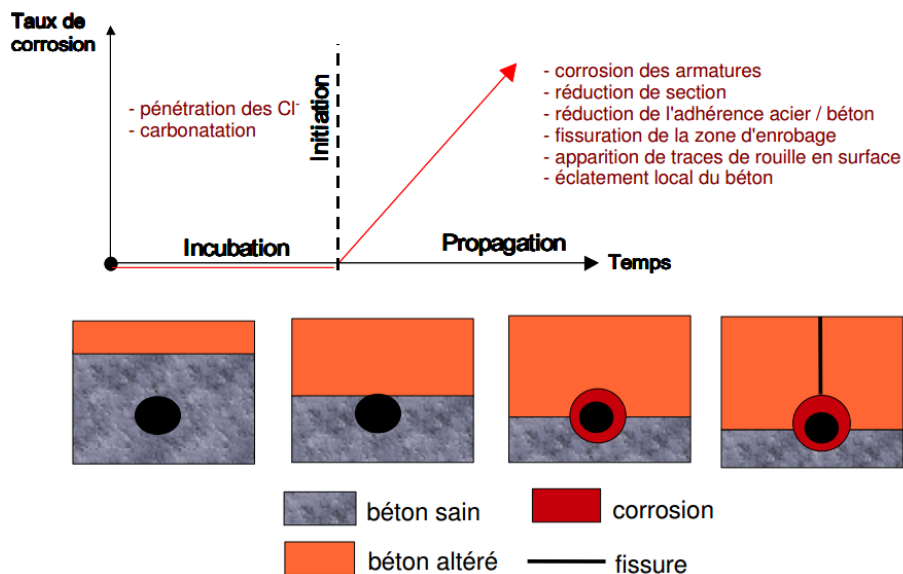


Figure 12 Evolution de l'état de corrosion des aciers dans le temps

2- Modélisation de la pénétration des chlorures dans le béton

2.1- L'intérêt de la modélisation

L'évaluation de la durée de vie des ouvrages en béton armé se base le plus souvent dans la littérature sur la comparaison de la teneur en ions chlorures au niveau des aciers, qu'elle soit mesurée expérimentalement à travers des diagnostics chimiques ou estimée théoriquement via des modèles, avec des seuils considérés comme pathogènes, au-delà desquels la corrosion est susceptible de se déclencher.

Au cours de ces dernières années le Pôle Ouvrages d'Art AREA a réalisé de nombreuses investigations et de diagnostics sur les ouvrages d'art. Ces diagnostics permettent au Pôle d'avoir une connaissance plus précise sur l'état des différents composants d'ouvrages, notamment la connaissance du niveau de corrosion des armatures ainsi que la profondeur de pénétration d'agents agressifs dans le béton tel que les chlorures.

Afin de valoriser toute ces données, AREA a commencé à mettre au point des modèles. Ces modèles permettent d'une part d'affiner la connaissance par rapport aux pathologies d'ouvrages et d'autre part d'économiser sur les budgets destinés aux diagnostics. En effet, le parc des ponts AREA étant conséquent (environ 800 ponts), la réalisation de diagnostics sur l'ensemble des ouvrages couterait cher à l'entreprise, d'où l'intérêt de la modélisation de la dégradation de ces structures.

2.2- Les données d'entrée pour la mise au point du modèle

Dans cette première phase du stage, je me suis intéressé à la mise au point d'un modèle de pénétration des chlorures dans les composants d'ouvrages en béton armé. Pour ce faire, je me suis basé sur les données suivantes :

- Les premiers modèles qui ont été développés en 2013 dans le cadre d'un TFE
- Les différentes investigations ayant été menées sur les ouvrages d'art AREA, notamment les rapports des inspections détaillées et les diagnostics⁴ effectués sur différentes parties d'ouvrages ; piles, piédroits, corniches, longrines, trottoirs ... (Voir en annexe 1 page 61 un exemple de diagnostic effectué sur un ouvrage)
- Les informations relatives aux caractéristiques des ouvrages (plans de coffrage et de ferrailage, dates de construction, niveaux de trafics des voies portées et franchies, quantités de sel utilisées annuellement pour le déneigement des chaussées, distances des parements exposés par rapport à la chaussée, altitudes des ouvrages ...)
- Documentation scientifique traitant de la diffusion des chlorures dans le béton

Cette première phase s'est organisée comme suit :

Dans un premier temps, je me suis intéressé à un travail de fin d'études qui a été réalisé en 2013 au sein s'AREA dans le cadre du développement de modèle de pénétration de chlorures dans le béton. J'ai donc vérifié les hypothèses du modèle qui a été développé ainsi que les formules qui ont été exploitées pour la modélisation. En annexe 2 page 62 est fourni le détail des observations que j'ai pu tirer de l'étude de 2013.

L'analyse du modèle développé pour AREA en 2013 m'a orienté vers la recherche d'une nouvelle approche pour la modélisation du phénomène de diffusion des chlorures dans le béton tout en exploitant la démarche qui a été adoptée dans le cadre du TFE de 2013.

Dans un deuxième temps, j'ai mené une recherche documentaire sur la modélisation de la diffusion des ions chlorures dans le béton. A l'issue de cette recherche, je suis parvenu à construire un modèle prenant en compte des hypothèses plus proches de la réalité, notamment en ce qui concerne la modélisation de l'exposition des parements aux sels.

Finalement, il a fallu mettre au point une méthode permettant d'appliquer le modèle sur l'ensemble des composants d'ouvrages en béton armé. J'ai donc procédé en deux temps :

⁴ L'objectif de ces diagnostics est de connaître l'avancement du phénomène de corrosion des aciers ; il s'agit d'un « état des lieux » qui permet de savoir si la structure est en phase d'incubation ou en phase de propagation. La connaissance de cet avancement est fondamentale puisqu'elle permet de sélectionner et de dimensionner la technique de réparation.

- Pour les ouvrages pour lesquels on dispose de diagnostics, les paramètres du modèle (J : flux massique de sel absorbé, D : coefficient de diffusion apparent) ont été obtenus directement en calant le modèle aux données expérimentales de manière à ce qu'il soit le plus cohérent possible avec les résultats des diagnostics.
- Afin de pouvoir exploiter le modèle, même pour les ouvrages pour lesquels on ne dispose pas de diagnostics, j'ai eu l'initiative d'une part de prendre en compte des hypothèses concernant l'enrobage moyen C et le coefficient de diffusion D , et d'autre part de déduire le paramètre J (flux massique de sel absorbé) à partir d'autres données tels que la distance des parements exposés à la chaussée et l'altitude des ouvrages. Pour ce faire, je me suis basé sur les résultats issus du calage du modèle par rapport aux diagnostics chimiques disponibles.

2.3- Elaboration du modèle

2.3.1- Principe de la modélisation

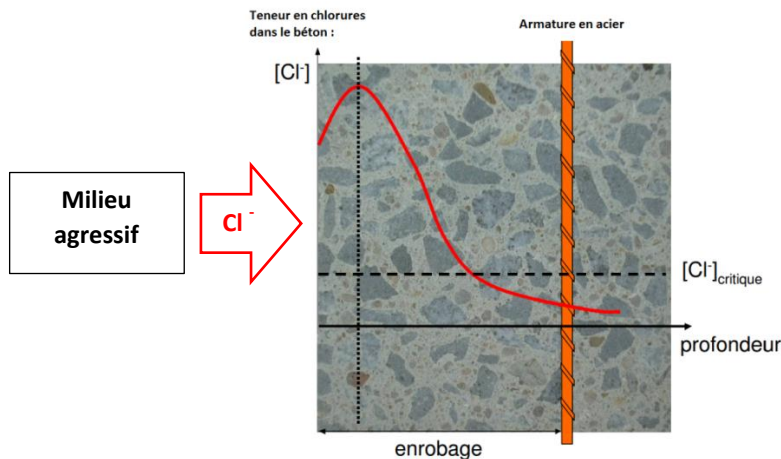


Figure 13 Principe de la modélisation de la pénétration des ions chlorure

La pénétration dans le béton qui est un milieu poreux requiert la présence d'une phase liquide. En milieu saturé, les ions chlorures pénètrent par diffusion⁵ dans le béton sous l'effet d'un gradient de concentration. Pour les bétons soumis à des cycles d'humidification-séchage, comme les bétons exposés aux sels de déverglaçage, les chlorures pénètrent par absorption capillaire puis migrent par convection⁶ avec la phase liquide. La progression se fait ensuite par diffusion dans la zone saturée.

A travers une recherche documentaire sur le sujet, il s'est avéré que dans le cas où le béton est exposé à des cycles d'humidification-séchage, la zone caractérisée par la convection ne concerne que quelques millimètres à partir de la surface exposée du béton. De ce fait, la pénétration des chlorures est due principalement au phénomène de diffusion.

La diffusion des chlorures est modélisée par la seconde loi de Fick :

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

- $C(x, t)$: concentration en chlorures dans le béton, dépendante de la profondeur x et du temps t
- D : coefficient de diffusion apparent des chlorures (en m^2/s)

➤ **La modélisation de la pénétration des chlorures dans le béton consiste à exprimer explicitement la concentration en chlorures $C(x, t)$ à l'aide d'une fonction de deux variables (x et t).**

Pour déterminer une telle fonction il faut :

- Fixer des hypothèses concernant les paramètres du modèle
- Modéliser les conditions aux limites : exprimer la quantité de sel absorbée par le béton au niveau de la surface exposée par une fonction du temps
- Résoudre l'équation de diffusion (1)

Ce travail est détaillé en annexe 3 page 65.

⁵ La diffusion est un processus naturel de transport de matière induit par la **différence de concentration** d'une espèce chimique dans un système ; la matière se déplace des zones de forte concentration vers celles de faible concentration

⁶ La convection est un processus de transport de matière dans lequel, un fluide (l'eau) entraîne dans son mouvement des particules (ions chlorure)

Le modèle développé permet :

- D'évaluer la concentration des ions chlorures dans le béton à une profondeur x de la surface exposée et à un temps t depuis la date de construction du composant en béton : profils de chlorures
- De donner l'évolution de la position du **front critique des chlorures**, c'est-à-dire la progression en fonction du temps de la profondeur où la concentration des chlorures dépasse le seuil critique, au-delà duquel la corrosion des aciers est susceptible de se déclencher
- D'évaluer le temps d'initiation de la corrosion, c'est-à-dire le temps nécessaire aux chlorures pour traverser l'enrobage et donc atteindre les aciers

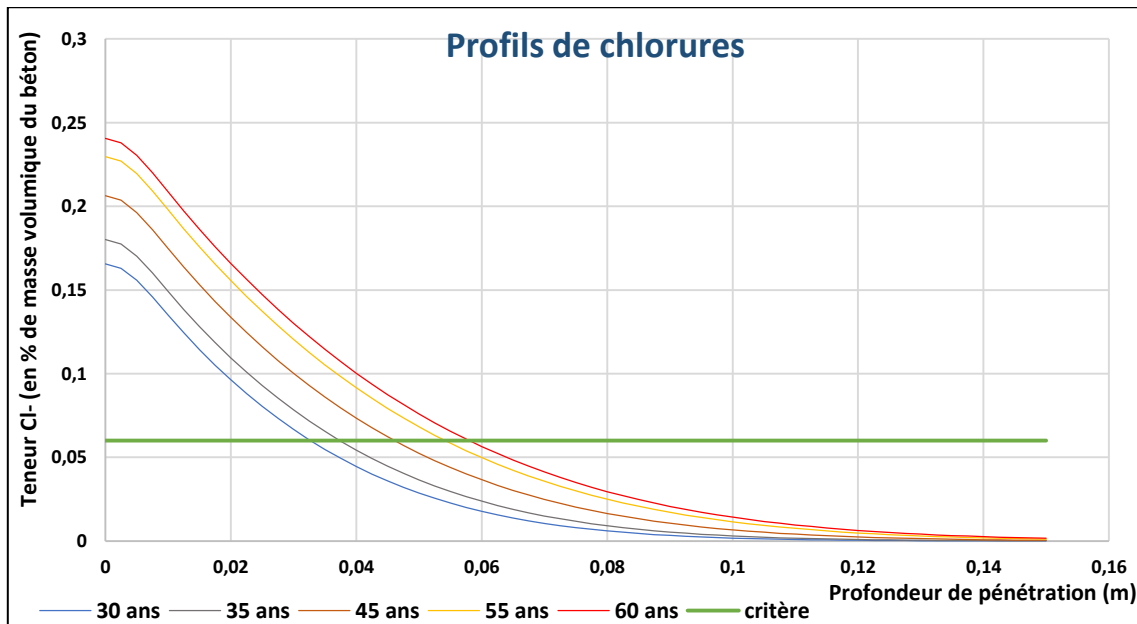


Figure 14 Profils des chlorures à des instants différents

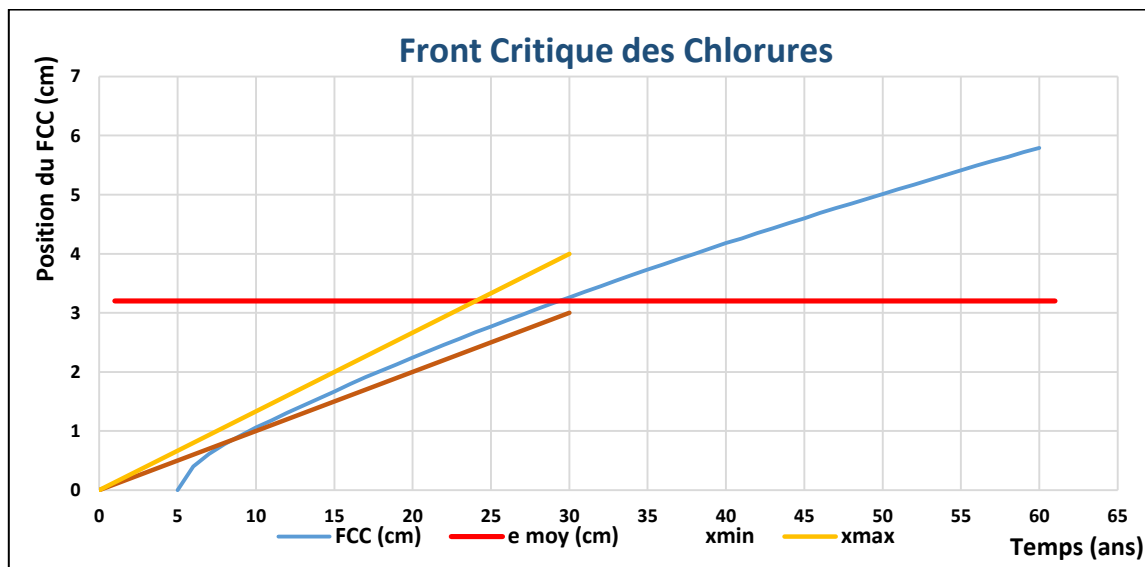


Figure 15 Front Critique des Chlorures

Le modèle se base sur des paramètres que l'on peut classer en deux catégories :

- Des paramètres de vulnérabilité : il s'agit de paramètres qui traduisent la résistance du matériau vis-à-vis de l'agression par les ions chlorures, notamment :
 - **L'enrobage des aciers** : plus il est important, plus il faut du temps aux chlorures pour atteindre les aciers

- **Le coefficient de diffusion** : plus il est important, plus les propriétés de transfert du béton sont élevées (« perméabilité » élevée aux chlorures).
- Des paramètres d'exposition qui traduisent le degré d'agressivité du milieu où se trouve le parement. Il s'agit notamment de :
 - La quantité de sel absorbée par le parement en béton par unité de temps et par unité de surface appelée aussi **flux massique de sel absorbé**.

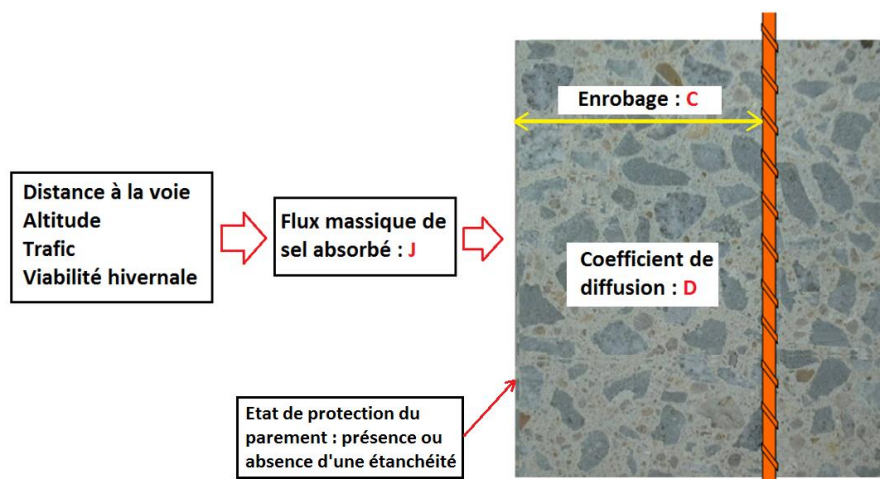


Figure 16 Identification des paramètres de la modélisation

2.3.2- Quantification des paramètres du modèle à partir des diagnostics disponibles

Après avoir identifié les paramètres nécessaires pour le modèle, j'ai été amené à exploiter les résultats expérimentaux issus des diagnostics disponibles afin de quantifier ces derniers.

- Pour l'enrobage des aciers, j'ai pris en compte la valeur moyenne issue de mesures in situ réalisées sur les parements diagnostiqués.
- Les deux paramètres D et J n'étant pas mesurés directement, il a fallu exploiter les résultats de l'analyse chimique d'échantillons prélevés sur les ouvrages. Ces analyses fournissent le dosage en ions chlorure mesuré sur des carottes ou des poudres de béton prélevées sur les ouvrages. Sur la base de ces analyses chimiques, les deux paramètres du modèle D et J sont déterminés itérativement de manière à ce que la concentration « modélisée » des ions chlorure soit la plus proche possible de la concentration empirique. (voir en annexe 3 page 65 le détail concernant la méthode adoptée pour le calage du modèle)

2.3.3- Généralisation du modèle

Le modèle tel qu'il a été mis au point nécessite la connaissance des paramètres (C , D et J) pour que l'on soit en mesure de l'exploiter. Lorsqu'on dispose de diagnostics, la quantification de ces paramètres se fait directement en utilisant les données expérimentales. AREA souhaite toutefois disposer d'un modèle lui permettant d'avoir **une estimation de la profondeur de pénétration des ions chlorures** dans les parements en béton et ce même dans le cas où on ne possède pas de diagnostic sur l'ouvrage.

Afin de répondre à ce besoin, j'ai procédé comme suit :

- Pour le paramètre C : enrobage moyen des aciers

Dans le cas où on n'a pas d'information sur l'enrobage des aciers, on considère par défaut une valeur de $C = 3 \text{ cm}$. En effet, les mesures effectuées sur les ouvrages donnent souvent une valeur moyenne de l'enrobage de l'ordre de 3 cm. Il est à noter tout de même qu'il est possible (à travers l'outil que j'ai conçu pour la modélisation de pénétration des chlorures) de modifier cette valeur en fonction de la connaissance dont on dispose vis-à-vis de ce paramètre.

- Pour le paramètre **D** : coefficient de diffusion apparent

A l'issue de l'exploitation des diagnostics pour le calage du modèle, il s'est avéré que pour l'ensemble des composants en béton armé diagnostiqués, le coefficient de diffusion varie dans l'intervalle $[8 \times 10^{-13}; 2 \times 10^{-12}]$. Cette homogénéité globale constatée sur les valeurs de **D** estimées peut être justifiée par le fait que la plupart des ouvrages du réseau AREA ont été construits à la même époque et par le fait que la plupart des bétons sont issus d'une même usine (matériaux et formulations similaires). De ce fait, pour les parements d'ouvrage dont on ne connaît pas la valeur du coefficient de diffusion, on prend par défaut la valeur moyenne des deux bornes de l'intervalle précédent, soit : **$D = 1.4 \times 10^{-12} m^2/s$**

- Pour le paramètre **J** : flux massique de sel absorbé

Ce paramètre représente la quantité de sel absorbée par un parement en béton exposé aux sels de déverglaçage (par unité de temps et de surface). Cette quantité dépend a priori d'un certain nombre de variables qui conditionnent le niveau d'exposition du parement, notamment :

- La distance à la voie : plus le parement est proche de la chaussée, plus il est susceptible de capter une quantité importante de sel issu des projections générées par les saleuses, combinée au passage des véhicules. Cette donnée est accessible dans la base de données AREA qui fournit pour chaque composant d'ouvrage en béton sa distance par rapport à la voie.
- La quantité de sel utilisée pour le déneigement des chaussées : il s'agit d'une donnée moyenne par centre d'entretien. Cette quantité varie d'un centre à un autre (d'une part en fonction des conditions climatiques et d'autre part en fonction des pratiques de salage).
- L'altitude : les parties du réseau situées en hautes altitudes sont plus exposées aux sels par rapport aux parties en basses altitudes.
- Le trafic : plus le trafic est dense, plus la fréquence des projections chargées en sels générées par le passage des véhicules est élevée.

Afin de pouvoir quantifier les corrélations entre le paramètre **J** et ces quatre types de données, j'ai exploité les résultats issus du calage du modèle pour certains composants, notamment les longrines, les corniches et piles/piédroits. Le tableau ci-dessous contient les données relatives aux ouvrages pour lesquels on dispose de diagnostics sur les piles ou les piédroits :

Données issues de la base OA AREA									Données issues de : Diagnostics + modèle	
Ouvrage	Année de construction	Age (ans)	Centre d'entretien	Trafic ⁷	Altitude ouvrage (m)	Quantité de sel ⁸ moyenne par m2 de chaussée (kg/m2.an)	Composant diagnostiqué	distance à la voie (m)	Paramètre J issu du calage du modèle (g/m2.an)	Age diagnostic (ans)
PS302	1971	45	Chesnes	52900	200	1,18	pile de rive	3	13,75	33
							pile en TPC	3	9,25	
PS313b	1974	42	Chesnes	10000	265	1,18	pile de rive	1,5	10,5	30
PS394	1973	43	Nances	20400	345	1,68	pile de rive	1,5	12	36
PI3001	1975	41	Nances	9200	249	1,68	piédroit	2,5	9,25	35
PS3028	1977	39	Nances	15600	386	2	pile de rive	1,5	14	27
							pile en TPC	1,5	12,5	
PS3055	1977	39	Nances	15400	356	1,68	pile en TPC	1,5	12,75	27
PI855	1974	42	Rives	6800	194	1,92	piédroit	2	9,75	39
PI856	1975	41	Rives	3300	194	1,92	piédroit	1,5	9,25	38
PS5030	1997	19	Le Crozet	11000	268	2,25	pile en TPC	3	9,75	18
PS5040	1997	19	Le Crozet	11000	276	2,25	pile de rive	2,5	10	16
PS5190	2004	12	Le Crozet	3000	814	2,25	pile en TPC	0,6	21,25	9
PS5200	2004	12	Le Crozet	3000	862	2,25	pile en TPC	0,6	22,25	9
PI144	1989	27	Aiton	3500	266	2,77	piédroit	2,5	10,25	24
PS3090	1975	41	Annecy	10100	477	3,39	pile de rive	2	13,75	29
PS3153	1980	36	Annecy	11200	615	3	pile de rive	1,5	17	24
							pile en TPC	0,8	17,5	

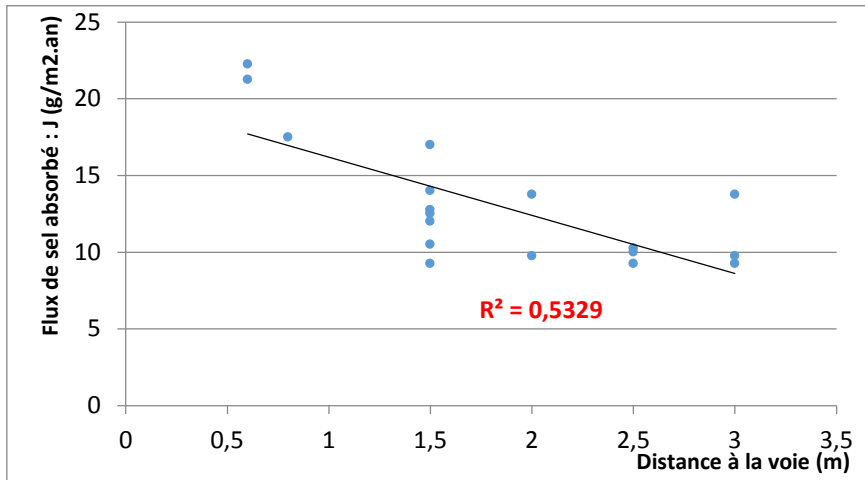
Tableau 2 Données relatives aux piles et pieds droits d'ouvrages pour lesquels on dispose de diagnostics

⁷ Il s'agit du trafic moyen de la voie à laquelle est exposé le parement (en véhicule/jour/sens)

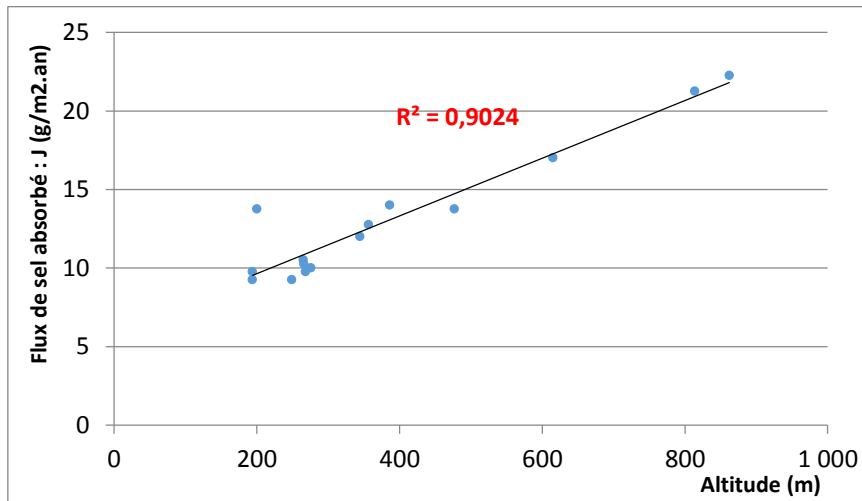
⁸ Pour chaque centre d'entretien, on dispose des quantités de sel totales utilisées annuellement (de 2000 à 2015). Ces quantités ont été ramenées à un mètre carré de chaussée (en divisant la masse totale de sel par le linéaire d'autoroutes gérées par chaque centre)

Les données du tableau précédent m'ont permis par la suite d'appréhender les paramètres principaux pour la modélisation à travers les courbes de corrélation suivantes :

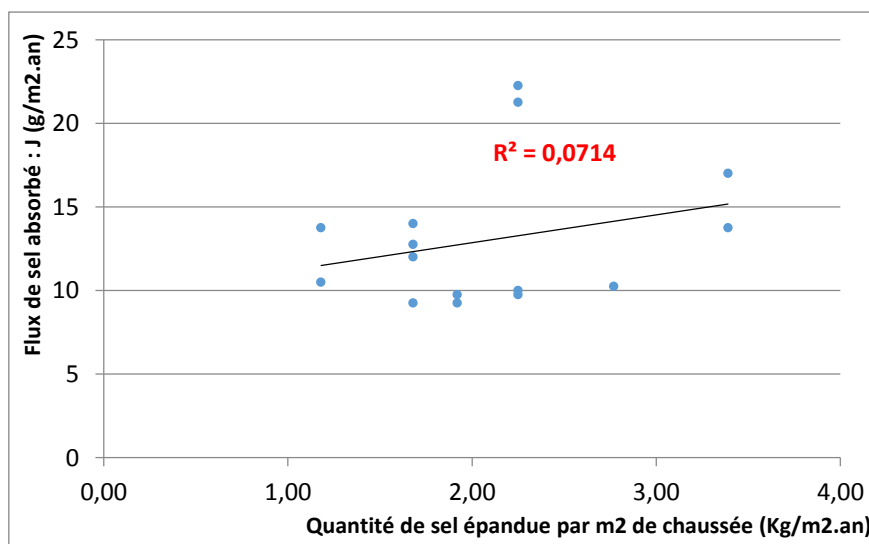
- Corrélation entre le paramètre J et la distance à la voie :



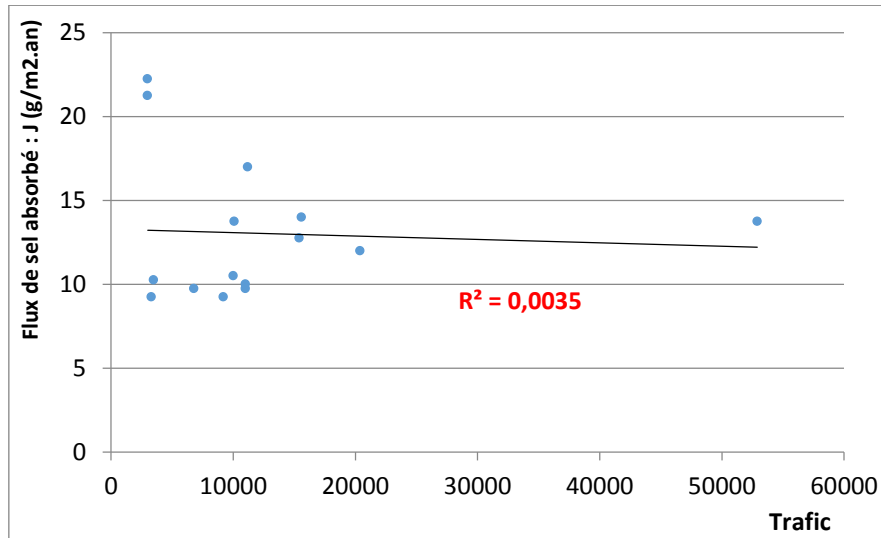
- Corrélation entre le paramètre J et l'altitude :



- Corrélation entre le paramètre J et la quantité de sel moyenne (par centre d'entretien) épanchée sur la chaussée :



- Corrélation entre le paramètre J et le trafic de la voie :



A travers les courbes précédentes, il s'avère que le paramètre J (estimé via le calage du modèle par rapport aux données expérimentales) est significativement corrélé avec l'**altitude** et la **distance à la voie**, tandis que les coefficients de corrélation relatifs aux deux autres paramètres (trafic et quantité de sel moyenne par centre d'entretien) sont relativement faibles.

A la lumière de ces résultats, je me suis proposé d'établir une relation permettant d'approcher le paramètre J en fonction des deux variables : **altitude** et **distance à la voie**. Pour ce faire, j'ai eu recours à une régression linéaire multiple (à deux variables) qui m'a permis d'aboutir à une approximation du paramètre J sous la forme :

$$\tilde{J} = a \times \text{Altitude} + b \times \text{distance à la voie}$$

a et **b** étant des coefficients issus de la régression linéaire effectuée.

Il est à noter que cette démarche a été menée sur d'autres composants d'ouvrages (longrines, corniches, trottoirs). Pour ces composants, il a été également constaté que l'altitude et la distance à la voie sont les deux variables les plus corrélées au paramètre J .

2.3.4- Synthèse

Le schéma ci-dessous résume le principe de la méthodologie adoptée pour la modélisation du vieillissement des parements en béton armés exposés aux agressions salines :

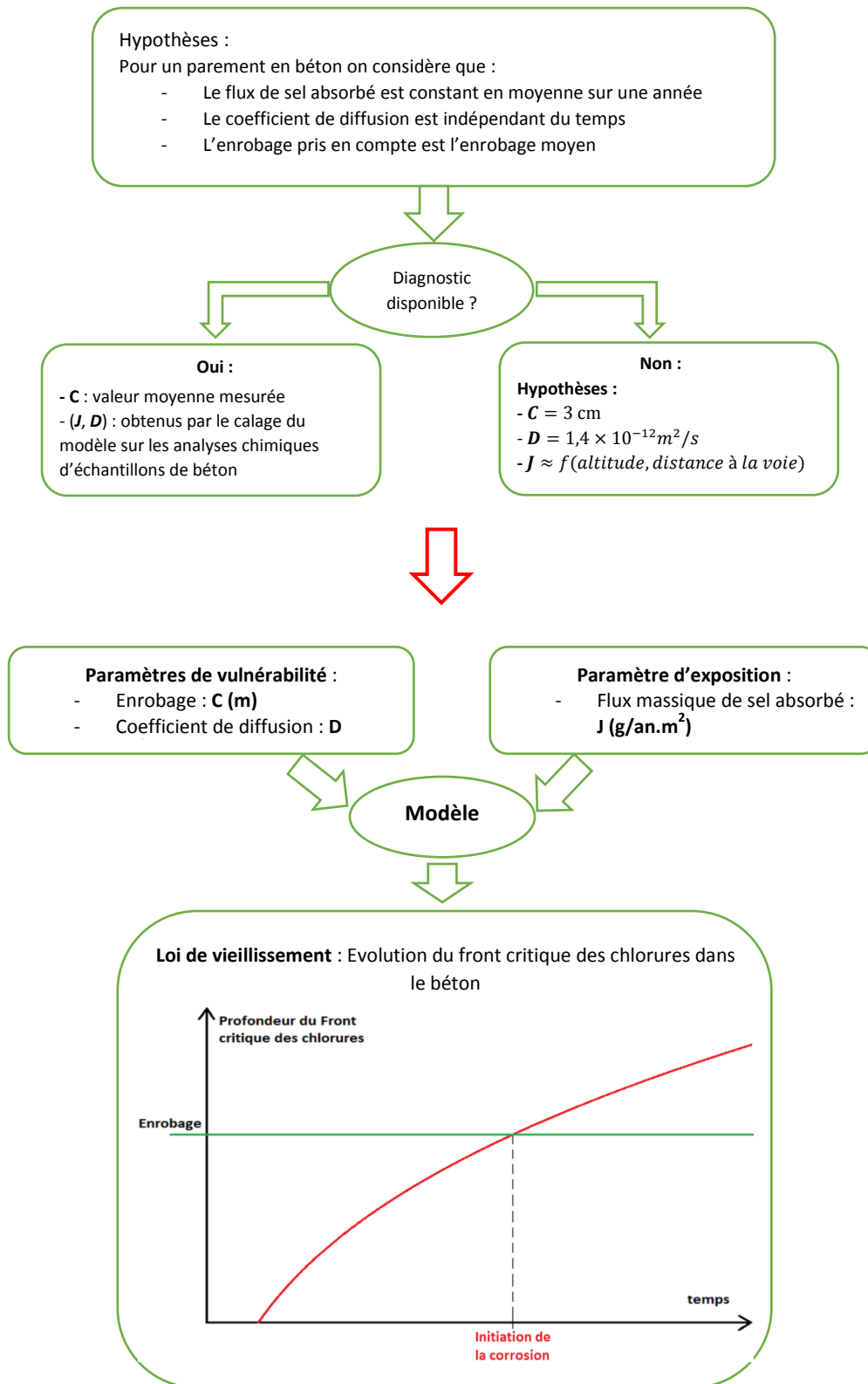


Figure 17 Synthèse de la démarche adoptée pour modéliser le vieillissement des bétons exposés aux agressions salines

III- Deuxième phase du TFE : développement d'outils d'aide à la gestion de la maintenance du patrimoine OA

Dans le cadre de la gestion du patrimoine, l'ingénieur OA sollicite des budgets auprès de la direction de la société concessionnaire d'autoroutes pour financer les opérations de maintenance des ouvrages d'art. A défaut de disposer d'outils de pilotage adéquats, il est difficile de quantifier les besoins de maintenance nécessaires pour répondre aux obligations du contrat de concession.

Confrontée aux problématiques liées au vieillissement de son patrimoine OA, AREA souhaite disposer d'outils d'aide à la décision lui permettant d'optimiser la gestion de son patrimoine. Ces outils serviront d'une part en interne au Pôle OA pour anticiper les besoins de maintenance et d'autre part en externe pour communiquer et rendre accessible les résultats, issus de l'exploitation de ces outils, aux dirigeants de la société (de formation financière, juridique ...).

Les objectifs in fine des outils développés au cours de cette deuxième partie du TFE sont :

- La modélisation du vieillissement des ouvrages et des composants d'ouvrages
- La simulation de scénaris de maintenance différents en fonction d'indicateurs cibles à imposer en fin de concession (2035)
- L'affectation des opérations et des budgets de maintenance de manière optimale en priorisant les ouvrages par rapport à chacun des objectifs orientant la stratégie de maintenance au sein d'AREA, à savoir : la sécurité des usagers, la disponibilité des ouvrages et le maintien des ouvrages en bon état d'entretien
- La présentation des résultats sous forme d'interfaces graphiques facilitant la lecture et la communication des informations

Pour aborder cette mission, j'ai été amené dans un premier temps à exploiter la base de données du Pôle OA. Cela m'a permis d'une part de prendre connaissance de l'ensemble des informations dont se sert le Pôle OA pour la gestion du patrimoine d'ouvrages d'art et d'autre part, d'identifier les données nécessaires dont j'avais besoin pour le développement des outils demandés par AREA.

Dans un deuxième temps, j'ai mené des recherches documentaires et des réflexions qui m'ont orienté vers deux approches permettant d'exploiter les **systèmes de notations** utilisés par le Pôle OA pour évaluer l'état des ouvrages. Je me suis appuyé par ailleurs tout au long de cette partie du TFE sur des échanges que j'ai pu avoir avec plusieurs acteurs (Bureau d'études, Centres d'Entretien, ingénieurs du Pôle OA). Les deux approches que j'ai retenues pour aborder cette phase du stage sont les suivantes :

- La première approche se base sur la notion du risque. Il s'agit d'une méthode qui permet de hiérarchiser les actions de maintenance selon le niveau de risque atteint par chaque ouvrage ou partie d'ouvrage. La quantification du niveau de risque se base sur deux variables : La fréquence d'occurrence de la défaillance (**le danger**) et les conséquences de la défaillance (**la gravité**).
- La deuxième approche que j'ai eu l'initiative d'exploiter se base sur la théorie des **chaînes de Markov** pour modéliser l'évolution de la performance des ouvrages dans le temps. Cette approche probabiliste est appliquée non pas pour traduire l'évolution des propriétés structurelles mais pour traduire l'évolution d'un **indice visuel global** de l'ouvrage (note IQOA).

Cette partie est organisée comme suit :

Dans un premier temps, les systèmes de notations utilisés par AREA pour évaluer l'état des ouvrages vont être présentés. Ensuite, les deux méthodes développées ainsi que les outils associés seront traités en détail.

1- Evaluation de l'état des ouvrages

Pour gérer son patrimoine ouvrages d'art, AREA définit des actions de maintenance en se basant sur des indices d'état affectés aux ouvrages à partir d'inspections visuelles (inspections détaillées et visites annuelles). L'évaluation de l'état des ouvrages est basée sur deux types de notation : **l'indice IQOA** et **les indices internes AREA**. Ces indices sont archivés et valorisés dans la base de données ouvrages d'art.

1.1- Indice IQOA

Le système de notation IQOA (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art) est un outil qui a été mis en place en 1994 par la Direction des Routes pour lui permettre de suivre l'évolution de son patrimoine d'ouvrage d'art. Après la mise en concession des autoroutes françaises, l'état a imposé aux sociétés concessionnaires de continuer à utiliser l'IQOA dans le cadre de la surveillance du patrimoine d'ouvrage d'art des réseaux concédés.

La notation IQOA concerne les ouvrages de franchissement d'une longueur supérieure à 2m qui peuvent être des ponts en maçonnerie, en béton armé, en béton précontraint, en métal ou mixte. Le principe d'IQOA est d'attribuer des notes aux ponts suivant l'état **visuel** dans lequel ils se trouvent.

Il existe 5 niveaux IQOA, croissants en fonction de l'urgence des réparations et une 6ème flottante (mention S) applicable à l'une quelconque des classes précédentes. Cette dernière permet de prendre en compte un risque pour l'usager même si l'ouvrage est en bon état structurellement, par exemple, un défaut sur les éléments de protection.

Les états correspondants aux 5 classes sont explicités dans le tableau suivant :

Classe 1	Ouvrage en bon état apparent relevant de l'entretien courant au sens de l'Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art.
Classe 2	Ouvrage, – dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts, – ou dont la structure présente des défauts mineurs, et qui nécessite un entretien spécialisé sans caractère d'urgence.
Classe 2E	Ouvrage, – dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts, – ou dont la structure présente des défauts mineurs, et qui nécessite un entretien spécialisé URGENT pour prévenir le développement rapide de désordres dans la structure et son classement ultérieur en 3.
Classe 3	Ouvrage dont la structure est altérée et qui nécessite des travaux de réparation mais sans caractère d'urgence.
Classe 3U	Ouvrage dont la structure est gravement altérée, et qui nécessite des travaux de réparation URGENTS liés à l'insuffisance de capacité portante de l'ouvrage ou à la rapidité d'évolution des désordres pouvant y conduire à brève échéance.

Tableau 3 Définition des classes IQOA

La base de données ouvrages d'art contient l'historique des notes IQOA de l'ensemble des ouvrages depuis 1997.

La notation IQOA donne une évaluation globale de l'état des ouvrages et permet de suivre l'évolution de l'état général d'un ouvrage dans le temps. Toutefois, pour définir un plan d'actions de maintenance, le Pôle OA AREA se base dans le cadre de la gestion de patrimoine sur un système de notation décliné par parties d'ouvrage. Ce système d'indices AREA permet de quantifier de manière plus fine l'état de l'ouvrage à partir de l'état de chacun de ses composants.

1.2- Indice interne AREA

Chaque ouvrage est scindé en composants. A chaque composant correspond un indicateur d'état. Au total, il existe 11 indices qui sont renseignés pour chaque pont. Ces indices sont les suivants :

- Indices tablier : 4 indices (A- Chaussée ; B- Bord libre ; C- About tablier D- Intrados) : Ces Indices permettent de quantifier le niveau des désordres sur le tablier ainsi que le degré de protection de l'étanchéité du tablier
- Indices appuis : 2 indices (PP- Piles et Piédroits ; AA- Appareils d'Appui) : Ces Indices permettent de quantifier le niveau des désordres des appuis de l'ouvrage
- Indices équipement : 3 indices (DR- Dispositif de retenue ; JC- Joint de chaussée ; AS- dispositif antisismique) : Ces Indices permettent de quantifier le niveau des désordres des principaux équipements des ouvrages
- Indices environnement : 2 indices (Gliss- Mouvement géotechnique de glissement ou d'affouillement ; Tass- Mouvement de tassement de l'ouvrage) : Ces Indices portent sur l'influence de l'environnement direct de l'ouvrage sur la pérennité de tout ou partie de sa structure.

La note associée à chaque indice varie de 1 (état comme neuf) à 4 (état très dégradé) en fonction de l'état du composant et de la nature de l'ouvrage.

Les schémas suivant explicitent le composants d'ouvrages ainsi que les indicateurs qui leurs sont associés :

• Indices Tablier	A / B / C / D
• Indices Appuis	PP / AA
• Indices Equipement	DR / JC / AS
• Indices Environnement	Gliss / Tass

- 1 – CORNICHE
- 2 – DISPOSITIF DE RETENUE
- 3 – TROTTOIR
- 4 – BORDURE DE TROTTOIR
- 5 – CANIVEAU
- 6 – COUCHE DE ROULEMENT
- 7 – CHAPE D'ETANCHEITE
- 8 – JOINT DE CHAUSSEE
- 9 – JOINT DE TROTTOIR

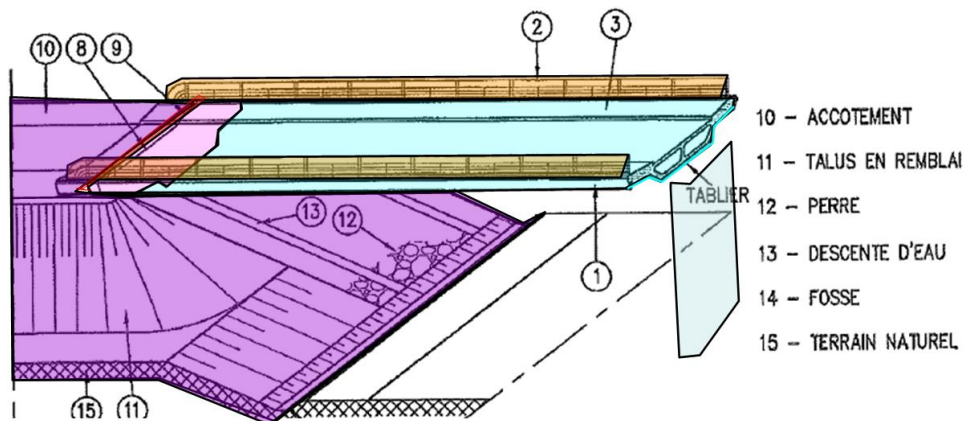
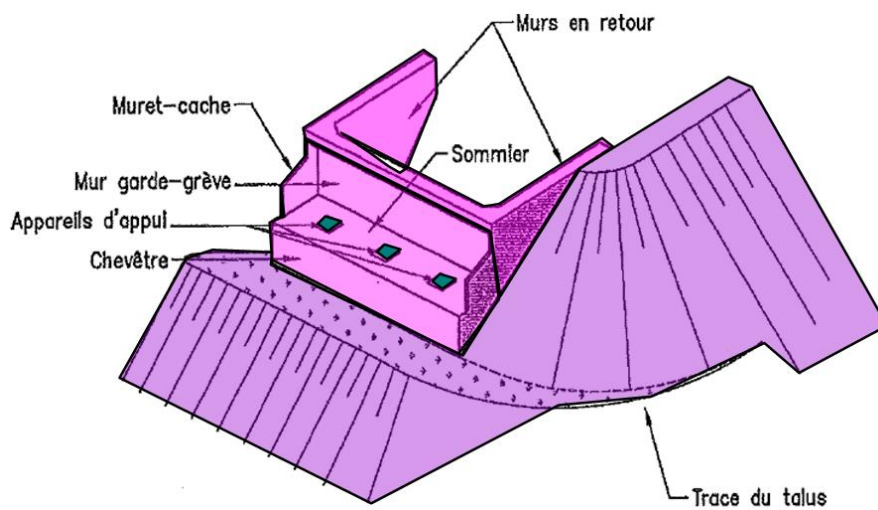
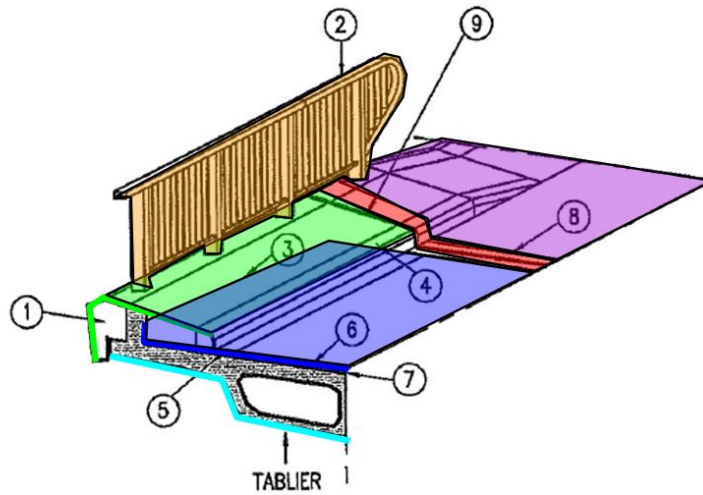
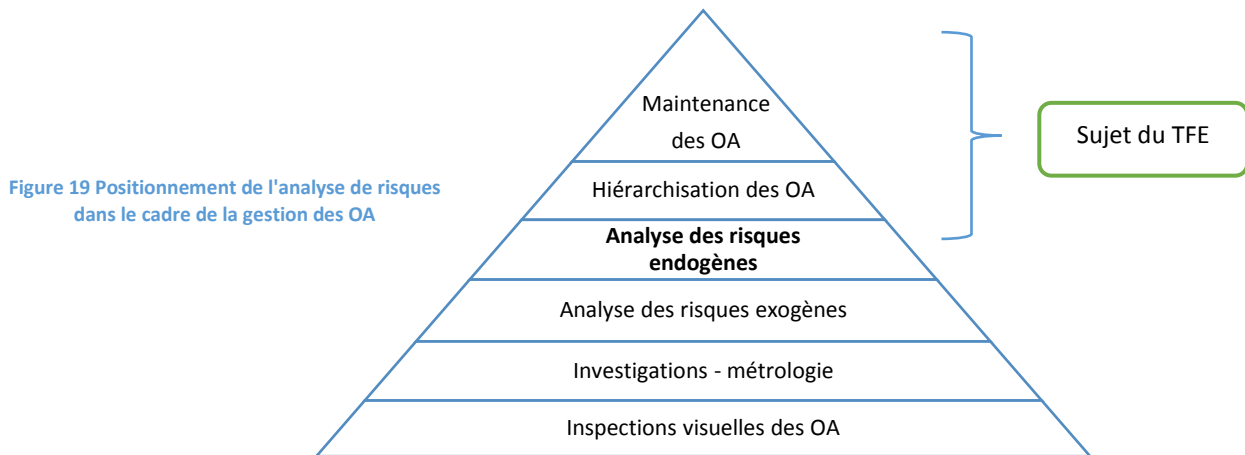


Figure 18 Descriptifs des différents composants d'ouvrages et des indicateurs d'état associés

2- Outil basé sur une approche d'analyse par le risque

Pour optimiser la programmation de la maintenance de ses ouvrages, AREA a initié depuis quelques années une réflexion par le risque. Il s'agit d'une approche qui vise à identifier et à quantifier les risques potentiels de défaillance non détectable par une inspection visuelle. Cette méthode est utilisée notamment pour analyser les **risques exogènes**, c'est à dire les risques dont la source est extérieure vis-à-vis de la structure étudiée (risques naturels ; séisme, risque hydraulique... ainsi que les risques d'exploitation : choc de véhicules...)

Actuellement, AREA souhaite déployer cette approche pour étudier le **risque** de détérioration **endogène** des structures à savoir le risque de vieillissement des ouvrages.



Pour mener cette phase du TFE, je me suis appuyé sur la compétence d'un bureau d'étude⁹ spécialisé dans la gestion de patrimoine par le risque, qui m'a assisté dans cette partie du stage grâce à son expertise dans ce domaine.

Après avoir présenté le principe de l'analyse par le risque, nous verrons comment cette méthode a été appliquée pour traiter le risque lié au vieillissement des ouvrages.

2.1- Méthode de l'analyse par le risque

Le risque est défini comme étant la probabilité que surviennent à la fois un événement considéré comme dangereux ainsi que ses conséquences redoutées.

La notion de risque est une grandeur à deux variables, incluant d'une part le **danger** et d'autre part les conséquences de la réalisation du danger : **la gravité**.

Le risque de vieillissement d'un composant d'ouvrage peut être exprimé par la relation suivante :

$$\text{Risque} = \text{Danger} \times \text{Gravité}$$

Où : La **Gravité** rend compte des conséquences associées à la défaillance du composant par rapport à un **objectif de gestion donné (disponibilité, sécurité, pérennité)**

Le **Danger** traduit la probabilité d'occurrence de la défaillance d'un composant d'ouvrage

Dans notre cas d'étude, le **danger est identifié à la détérioration d'un composant d'ouvrage due à son vieillissement**. La **gravité quant à elle correspondra à une quantification des conséquences, suivant l'objectif de disponibilité de l'ouvrage et l'objectif de sécurité des usagers**, si le danger se réalise.

- La gravité est une grandeur qui permet de quantifier l'ampleur des conséquences liées à l'occurrence d'un danger. C'est une grandeur qui traduit donc la valeur stratégique de l'ouvrage en combinant plusieurs critères : financiers, techniques et de sécurité.
- Le danger peut quant à lui s'exprimer comme le produit de deux facteurs :

$$\text{Danger} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité}$$

Où : L'**Aléa** traduit l'**Exposition** du composant d'ouvrage aux agressions du milieu externe

La **Vulnérabilité** traduit la **Résistance** du composant vis-à-vis de ces agressions

⁹ Bureau d'études OXAND : C'est une entreprise multinationale qui intervient dans le domaine de gestion d'actifs. Il propose notamment des solutions dans le domaine de gestion de patrimoine à travers des méthodes basées sur la gestion par les risques.

Afin de mener une approche par le risque il faut donc déterminer pour chaque composant d'ouvrage :

- **La gravité**, déclinée par type d'objectif : sécurité des usagers et disponibilité des ouvrages
- **Le danger**, en quantifiant à la fois l'exposition et la vulnérabilité du composant

Une fois la gravité et le danger quantifiée, **un indice de risque** est affecté au composant étudié et ce pour tous les ouvrages. Ensuite, pour chacun des objectifs pris en compte par AREA dans le cadre de la gestion de patrimoine (sécurité et disponibilité), une hiérarchisation des ouvrages est effectuée par rapport à cet indice de risque. Enfin, les actions de maintenance sont affectées aux ouvrages selon l'état du composant en respectant la priorisation précédente (par rapport à l'indice de risque).

Le schéma suivant résume le principe de la démarche adoptée pour mener une analyse par le risque :

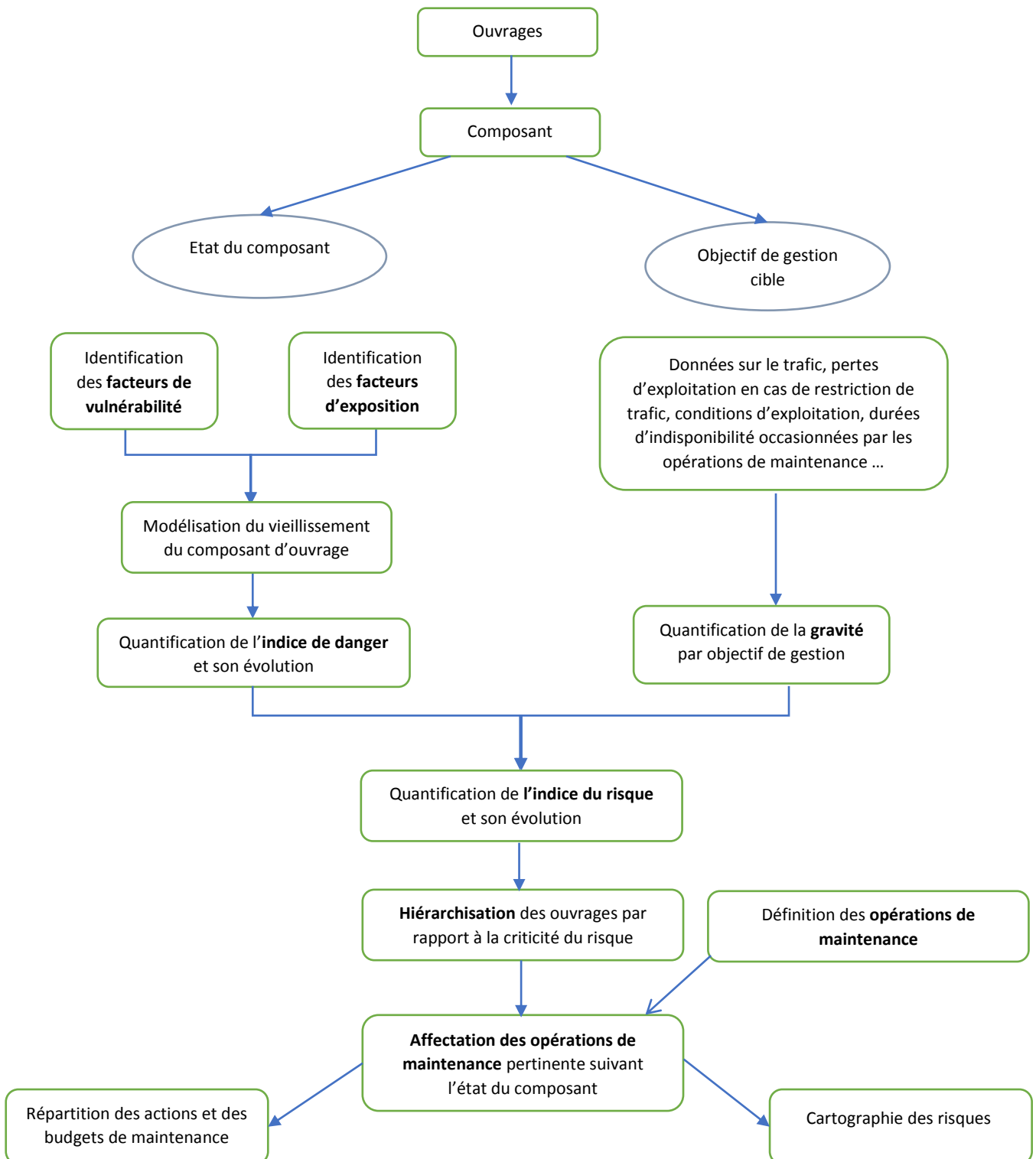


Figure 20 Démarche adoptée pour mener une analyse par le risque

2.2- Construction de l'outil d'analyse par le risque

L'objectif de cette partie étant de développer une méthode de gestion de la maintenance des ouvrages d'art par le risque, je me suis intéressé à un seul type de composant : **les piles et piédroits d'ouvrages**. Une fois que la méthode sera mise au point pour ce composant, le Pôle OA pourra ensuite la déployer sur les autres parties d'ouvrages.

Les piles et piédroits sont des parements en béton armé dont le vieillissement est dû principalement à la corrosion des aciers induite par la pénétration des chlorures dans le béton.

2.2.1- Quantification des risques

a) Quantification de l'indice de danger :

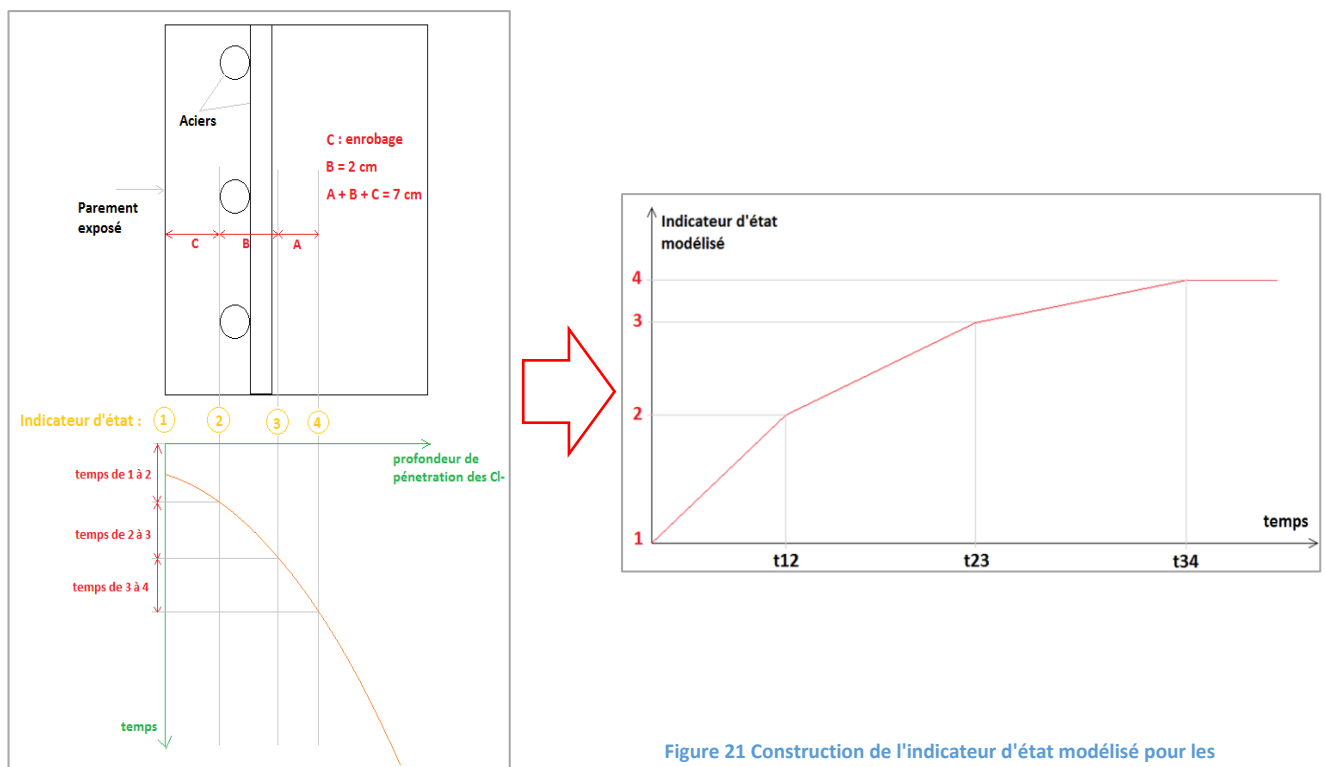
Pour les piles et piédroits des ouvrages, je me suis basé sur les résultats de la première phase du stage pour déterminer les lois caractérisant le vieillissement de ces types de composants.

Pour rappel, l'exploitation de l'ensemble des diagnostics réalisés sur les piles et piédroits des ouvrages nous a conduit à retenir comme paramètre de vulnérabilité¹⁰ : **l'enrobage** et comme paramètres d'exposition ; **l'altitude et la distance du parement par rapport à la voie**.

Afin de pouvoir caractériser l'état du matériau vis-à-vis des agressions salines, j'ai été amené à construire un indicateur à l'image de **l'indicateur d'état visuel** adopté par le pôle OA pour caractériser l'état d'une pile ou un piédroit. Cet **indicateur d'état modélisé** a été établi en fonction de la profondeur de pénétration des chlorures dans le béton à la lumière des données expérimentales disponibles et le retour d'expérience du Pôle OA :

Cet indicateur modélisé peut avoir une valeur comprise entre 1 et 4 :

- **Etat 1** : parement non pollué par les chlorures (parement neuf)
- **Etat entre 1 et 2** : les aciers sont toujours protégés (par le béton d'enrobage). Le temps de transition du 1 au 2 est le temps qu'il faut aux chlorures pour parcourir le béton d'enrobage.
- **Etat entre 2 et 3** : dès que les chlorures atteignent le premier lit d'armatures, l'indicateur prend une valeur de 2. Une fois les chlorures ont dépassé de 2 cm le premier lit d'armatures, l'indicateur passe à 3.
- **Etat entre 3 et 4** : l'indicateur progresse de 3 à 4 au moment où les chlorures ont atteint une profondeur de 7 cm depuis la surface exposée du parement.



¹⁰ Dans la première partie, nous avons identifié le coefficient de corrosion comme paramètre de vulnérabilité. Toutefois, l'exploitation des diagnostics disponibles a montré une faible variation de ce coefficient, ce qui nous a amené à le considérer constant (voir page 21).

Les durées de transition entre deux états sont fonction d'une part, des paramètres de vulnérabilité et d'autre part, des paramètres d'exposition. Le schéma suivant résume la méthode adoptée pour le calcul de l'indicateur d'état modélisé :

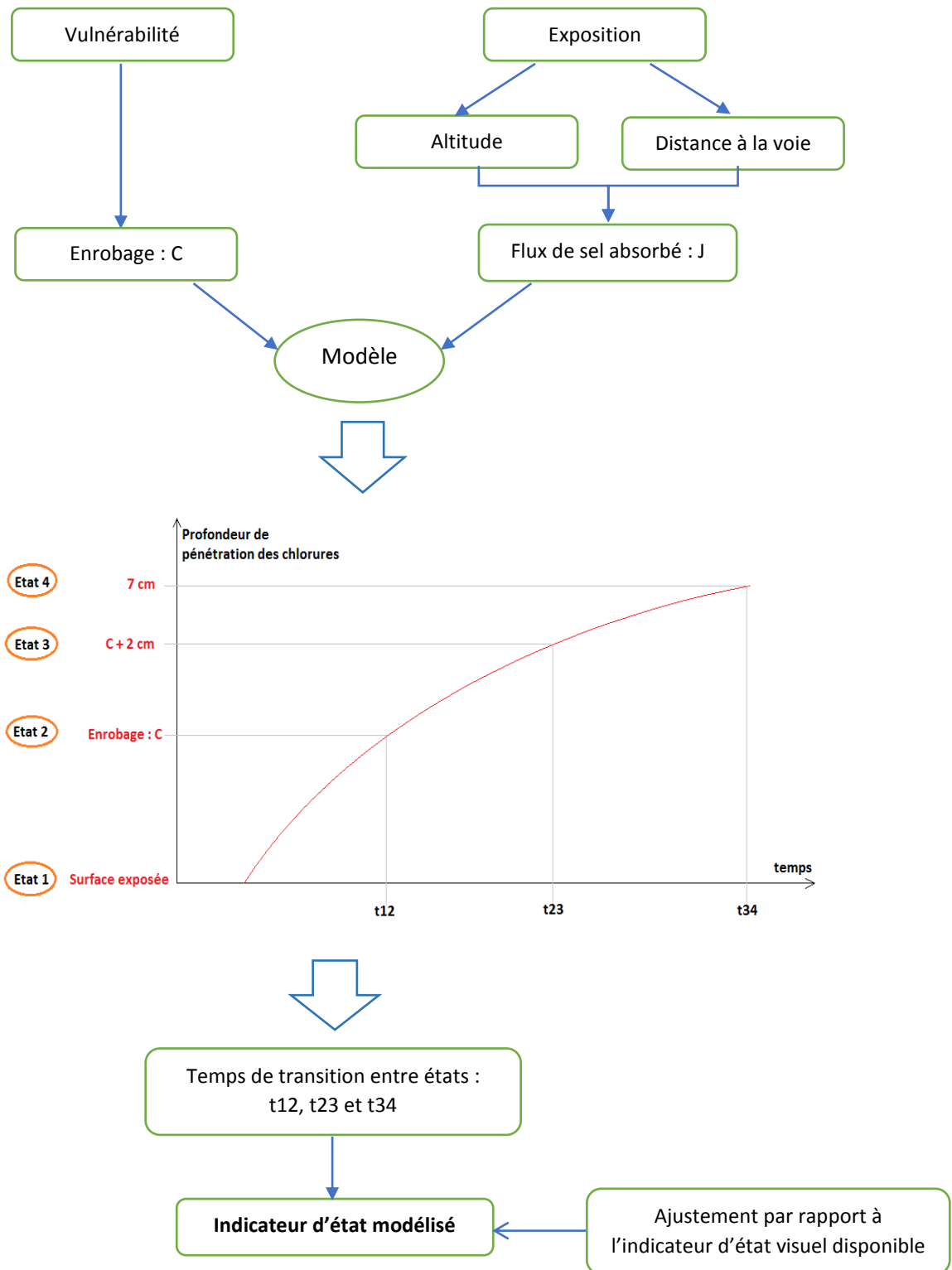


Figure 22 Démarche permettant de déterminer les temps de transition entre états

Une fois l'**indicateur d'état modélisé** (qui donne une indication sur l'état du matériau et qui peut varier de 1 à 4) est connu, celui-ci est multiplié par un coefficient qui rend compte de la **vulnérabilité structurelle** de l'ouvrage vis-à-vis de la perte de section d'acier.

En effet, il existe des ouvrages dont la stabilité structurelle dépend peu des aciers tels les ouvrages voûtes. Si on considère deux ouvrages qui présentent une exposition similaire et qui sont de natures différentes (par exemple un ouvrage voûte et un ouvrage à tablier), la probabilité de défaillance de la voûte est plus faible que celle des piles de l'ouvrage à tablier. Ainsi il paraît pertinent de discriminer les ouvrages par rapport à la vulnérabilité structurelle en multipliant l'indicateur d'état modélisé défini précédemment par un coefficient. Ces coefficients sont fixés de manière à obtenir un **indice de danger** (qui rend compte de la vulnérabilité du matériau et de la vulnérabilité structurelle) variant entre 1 et 6.

Type d'ouvrage	Coefficient de vulnérabilité structurelle
Viaduc	1,5
Ouvrage à tablier	1,5
Ouvrage - portique	1,25
Voûte	1

Tableau 4 Coefficients de vulnérabilité structurelle par type d'ouvrage

Le schéma suivant explicite les étapes permettant de quantifier l'indice de danger du composant étudié :

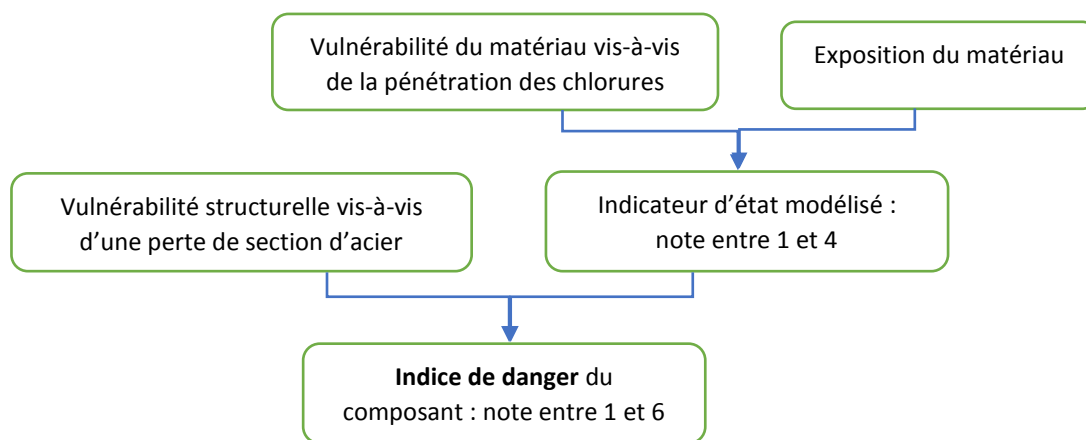


Figure 23 Démarche pour déterminer l'indice de danger pour les composants structurels d'un OA

Il est à noter que pour les composants qui ne jouent pas un rôle structurel dans l'ouvrage, à savoir les équipements, on ne prend en compte que l'indicateur d'état (aspect matériau) pour la détermination de l'indice de danger.

b) Quantification de la gravité :

La gravité permet de mesurer les effets engendrés par la réalisation du risque.

A titre d'illustration, considérons deux passages supérieurs franchissant deux autoroutes, l'une caractérisée par un trafic plus fort que celui de l'autre. En cas de rupture des dispositifs de retenue des deux passages supérieurs, les conséquences pourraient être plus lourdes pour l'autoroute la plus fréquentée. En effet, en cas d'échappement d'un véhicule traversant un passage supérieur, le risque de chute sur les véhicules circulant sur l'autoroute franchie sera d'autant plus élevé que le trafic est important.



A 43 – PS 305
40000 véhicules/jour/sens



A 51 – PS 5001
3000 véhicules/jour/sens

Figure 24 Deux autoroutes AREA avec des densités de trafic différentes

Les conséquences de la détérioration d'un composant d'ouvrage sont mesurées par rapport à l'objectif de sécurité et à l'objectif de disponibilité. Selon le type du composant, l'objectif cible peut être soit la disponibilité, soit la sécurité soit les deux en même temps.

- **Gravité associée à l'objectif de disponibilité :**

L'indisponibilité d'une infrastructure routière induit des pertes financières liées à l'exploitation des réseaux desservis. Dans le cas du réseau autoroutier, l'indisponibilité d'un ouvrage d'art génère des impacts, d'une part sur l'autoroute et d'autre part sur le réseau secondaire porté ou franchi par l'ouvrage.

Afin de quantifier l'impact de l'indisponibilité (partielle ou totale) d'un ouvrage sur les réseaux autoroutier et secondaire, plusieurs critères ont été pris en considération :

- Le trafic de l'autoroute
- Le trafic du réseau secondaire
- La durée de gêne occasionnée par les opérations de maintenance (pour remettre l'ouvrage en service normal)
- L'impact des opérations de maintenance sur les conditions d'exploitation (gêne aux clients, réduction de capacité ou coupure)

Les données de trafic sont disponibles dans la base de données ouvrages d'art.

Les durées de gêne et l'impact sur les conditions d'exploitation des opérations de maintenance ont été fixées pour chaque composant d'ouvrage, en se basant sur le retour d'expérience des ingénieurs du Pôle Ouvrages d'Art.

Le schéma suivant explicite la démarche adoptée pour quantifier la gravité disponibilité :

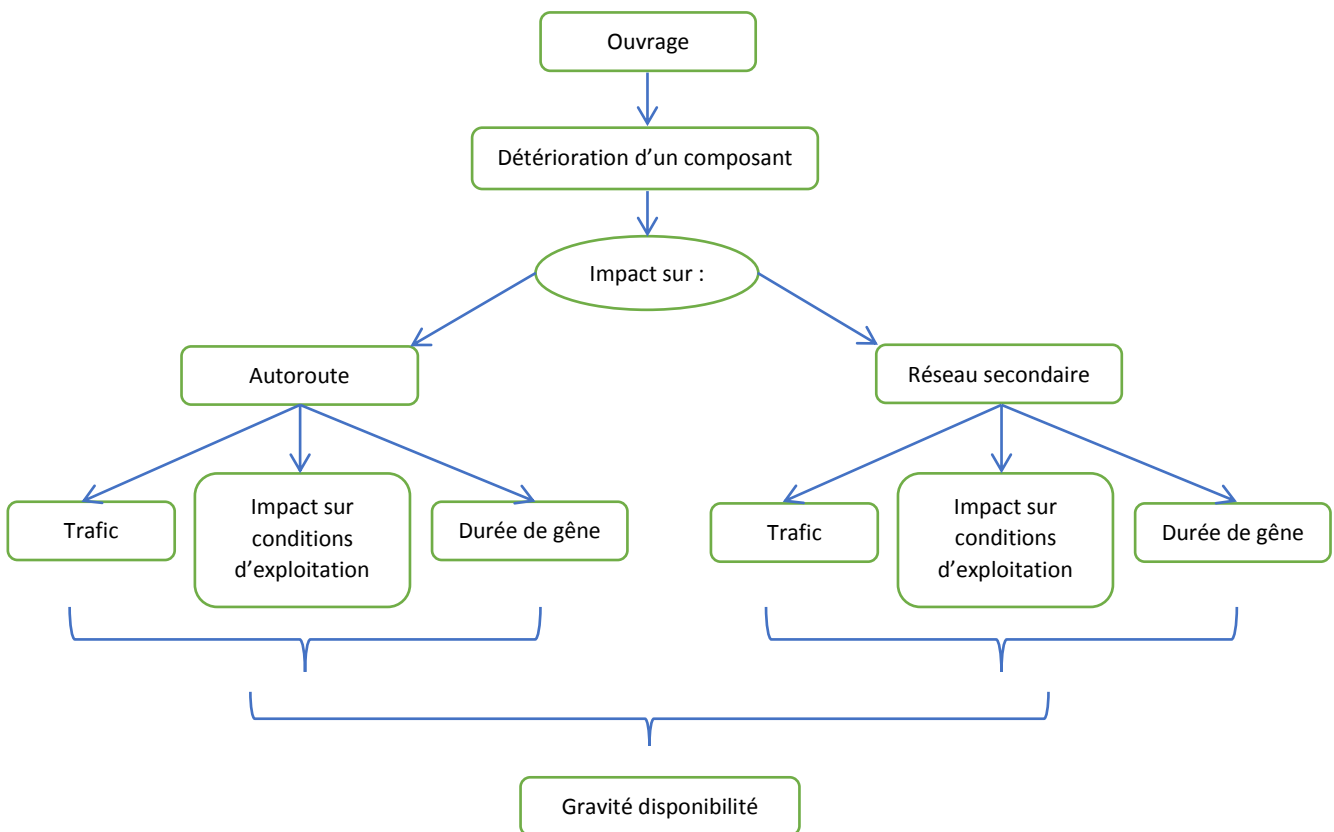


Figure 25 Démarche permettant de quantifier la gravité-disponibilité

- La quantification de la gravité disponibilité se base sur des matrices issues du retour d'expérience du Pôle OA ainsi que de données communiquées par des bureaux d'études. La méthode de calcul de cette gravité est fournie en annexe 4 page 71.

- **Gravité associée à l'objectif de sécurité :**

La détérioration d'un composant d'ouvrage a des conséquences non seulement sur la disponibilité de l'ouvrage mais également vis-à-vis de la sécurité des usagers de l'autoroute et du réseau secondaire. Pour quantifier la gravité associée à l'objectif de sécurité, deux paramètres ont été pris en compte : le trafic et la distance du composant à la voie (pour certains composants).

- Exemple 1 : dispositif de retenue

Plus le trafic de la voie franchie est important, plus les conséquences seront lourdes en cas d'échappement d'un véhicule du tablier

- Exemple 2 : pile ou piédroit

La détérioration d'une pile ou piédroit d'ouvrage se traduit le plus souvent par des décrochements de blocs suite à l'éclatement du béton d'enrobage. En fonction du trafic de la voie la plus proche et de sa distance de la pile ou du piédroit, les conséquences de chutes de blocs de béton sur la sécurité des usagers peuvent varier.

- La quantification de la gravité sécurité se base sur une matrice prenant en compte le trafic et la distance à la voie. Cette matrice est fournie en annexe 4 page 71.

c) Quantification de la criticité du risque :

Une fois l'indice de danger associé au composant et les gravités (sécurité et disponibilité) déterminés, un indice de risque est affecté à l'ouvrage en croisant l'indice de danger avec la gravité suivant chaque objectif de gestion. Ce croisement se fait à l'aide d'une matrice dite **matrice de risque**.

La matrice de risque est paramétrable par le gestionnaire dans la mesure où il lui revient d'affecter un indice à chaque couple (indice de danger, gravité) et de définir les limites entre les différents niveaux de risque. Dans le cas de cette étude, nous avons opté pour la matrice suivante :

	gravité négligeable	gravité faible	gravité moyenne	gravité modérée	gravité forte	gravité très forte
Danger très élevé	26	27	33	34	35	36
Danger élevé	17	24	25	30	31	32
Danger modéré	15	16	22	23	28	29
Danger moyen	6	13	14	19	20	21
Danger faible	4	5	10	11	12	18
Danger négligeable	1	2	3	7	8	9

	Risque négligeable
--	--------------------

	Risque modéré
--	---------------

	Risque faible
--	---------------

	Risque élevé
--	--------------

Figure 26 Matrice de criticité du risque

2.2.2- Définition des opérations de maintenance

L'objectif de toute opération de maintenance est de réduire le risque caractérisant un ouvrage par rapport à un objectif de gestion donné, de manière à ce risque soit ramené à un niveau acceptable.

Pour réduire le niveau de risque, on peut penser a priori à réduire soit le danger, soit la gravité. La gravité dépend en grande partie du trafic. Diminuer la gravité reviendrait donc à réduire le trafic en créant des ouvrages secondaires permettant d'alléger le trafic sur les ouvrages. Cette alternative n'étant pas envisageable par AREA, la seule possibilité pour baisser le niveau de risque est de réduire le niveau de danger. Les opérations de maintenance permettent donc de réduire le risque en améliorant l'état des composants d'ouvrages défectueux.

La méthode de l'analyse par le risque, telle que nous l'avons mise au point, nécessite la définition, pour chaque composant d'ouvrage, les différentes opérations de maintenance permettant d'améliorer l'état du composant.

Pour ce qui concerne les opérations de maintenance menées par le Pôle OA AREA sur les piles et piédroits des ouvrages, celles-ci sont identifiées et décrites dans les deux tableaux suivant :

- Cas des piles :

	Description	Indicateur d'état		Coût unitaire (k€ par m2 de pile)	
		Etat avant	Etat après	Pile de rive	Pile TPC
Actions	Préventif : mise en place d'une protection ¹¹ sur 2,5 m et un silane ¹² sur 2,5 m	$1 < i \leq 2$	1	0,22	0,2
	« Intermédiaire » : réparation sur 1,25 m et protection sur 3,75 m	$2 < i \leq 3$	1	0,74	0,55
	Correctif : Réparation sur 2,5 m et protection sur 2,5 m	$3 < i \leq 4$	1	1,47	1,11

Tableau 5 Définition des opérations de maintenance sur les piles d'ouvrages

- Cas des piédroits :

	Description	Indicateur d'état		Coût unitaire (k€ par ml de piédroit)
		Etat avant	Etat après	
Actions	Préventif : mise en place d'une protection sur 2,5 m et un silane sur 2,5 m	$1 < i \leq 2$	1	0,25
	« Intermédiaire » : réparation sur 1,25 m et protection sur 3,75 m	$2 < i \leq 3$	1	1,1
	Correctif : Réparation sur 2,5 m et protection sur 2,5 m	$3 < i \leq 4$	1	2,2

Tableau 6 Définition des opérations de maintenance sur piédroits d'ouvrages

Le schéma suivant illustre l'effet de chaque type d'opération sur l'évolution de l'indicateur d'état de ce composant :

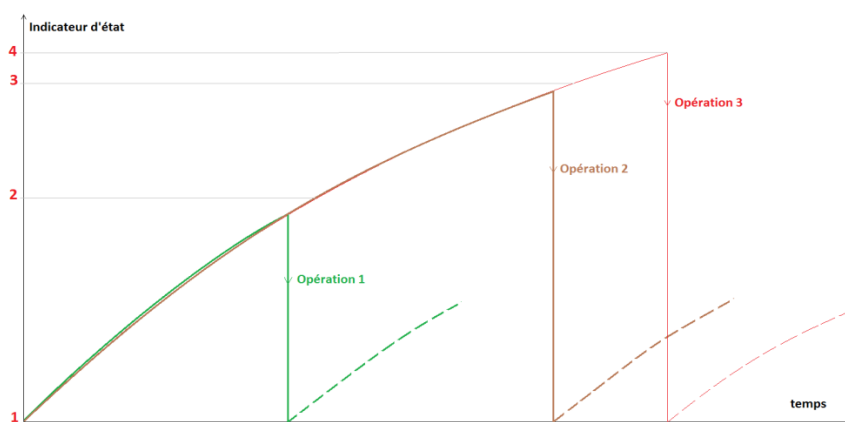


Figure 27 Effet des 3 types de maintenance sur l'état du composant PP

¹¹ Il s'agit généralement de la mise en place d'une substance étanche sur le parement. Les durées de vie de ces étanchéités varient selon le type de matériau qui les constitue

¹² Il s'agit du composé chimique de formule SiH_4 . C'est un produit hydrofuge (qui obstrue les pores du béton) que l'on utilise pour protéger les parements exposés.

Les images suivantes illustrent quelques exemples d'opérations de maintenance réalisées sur des piles et piédroits d'ouvrages d'art :



A 43 – PS 385
Travaux de réparation sur les piles - 2010



A 43 – PI 3001
Travaux de réparation sur les piédroits - 2010

Figure 28 Illustration de quelques opérations de réparation sur les piles et piédroits d'OA

2.2.3- Hiérarchisation des ouvrages et programmation des opérations de maintenance

La programmation des opérations de maintenance revient à faire des choix. Jusqu'à maintenant, le Pôle OA AREA s'appuie essentiellement sur les données issues de la surveillance des ouvrages pour la prise des décisions relatives à l'entretien de son patrimoine.

Souhaitant disposer d'une approche plus objective et d'une vision à long terme, AREA a besoin, au-delà des données des inspections d'ouvrages, de moyens lui permettant d'une part d'imposer des objectifs à l'horizon de 2035 (date de fin de concession) et d'autre part de prévoir les besoins en termes de maintenance nécessaires pour l'atteinte de ces objectifs.

Au terme de cette partie du stage, nous avons pu développer un outil permettant de hiérarchiser les ouvrages et de programmer les opérations de maintenance d'ici 2035 vis-à-vis de :

- L'enjeu de sécurité : hiérarchisation des ouvrages par rapport à l'indice de risque sécurité
- L'enjeu de disponibilité : hiérarchisation des ouvrages par rapport à l'indice de risque disponibilité
- L'enjeu « contractuel » : hiérarchisation des ouvrages par rapport à l'indicateur d'état

L'outil tel qu'il a été construit, donne une image de l'état du patrimoine d'ouvrages d'art à des instants différents; en 2016, 2020, 2025, 2030 et en 2035.

L'outil développé sous **VBA Excel** se compose de quatre modules complémentaires :

- Un module par composant permettant de calculer pour chaque ouvrage la loi de vieillissement du composant (c'est-à-dire l'évolution de l'indicateur d'état modélisé du composant jusqu'à 2035) ainsi que les gravités liées aux objectifs de sécurité et de disponibilité. Ce module permet également de prendre en compte l'effet d'une opération de maintenance sur l'état du composant, qu'elle soit imposée « manuellement » par l'utilisateur, ou affectée automatiquement via les macros sur lesquelles se base l'outil.
- Un module permettant de paramétrer les lois de vieillissement pour l'ensemble des composants d'ouvrage et notamment les durées de transitions entre états (t12, t23 et t34).
- Un module dans lequel on définit l'ensemble des opérations de maintenances que le Pôle AREA pourrait envisager pour chacun des composants d'ouvrage. (état avant, état après, coûts unitaires ; voir exemple p.35)
- Un module de pilotage (tableau de bord) à travers lequel l'utilisateur peut imposer des contraintes (en termes de budgets ou de nombre maximal d'ouvrages à traiter par période) et visualiser les résultats sous forme de graphiques et de cartographies.

Le principe de la hiérarchisation des ouvrages est le suivant :

- Pour les enjeux de sécurité et de disponibilité, les ouvrages sont dans un premier temps hiérarchisés par rapport à l'indice de risque (indice issu du croisement entre l'indicateur d'état et de la gravité associée à l'objectif ciblé). Dans un deuxième temps, les ouvrages ayant un même indice de risque sont reclassés par rapport à l'indicateur d'état du composant étudié. Une fois tous les ouvrages classifiés, les opérations de maintenance sont affectées selon l'indicateur d'état du composant en respectant la classification précédente. Le processus d'affectation des actions de maintenance s'arrête une fois la contrainte imposée (budget ou nombre d'ouvrage à traiter) est atteinte.

Le schéma fourni en page 38, explicite la démarche dans le cas où les budgets par périodes sont imposés.

- Pour l'enjeu contractuel, seul l'état des ouvrages compte, indépendamment des considérations liées à la sécurité ou à la disponibilité. Dans ce cas, l'utilisateur peut imposer pour un composant donné et pour chaque ouvrage un état cible en 2035 (une note de 1 à 4). En fonction de ces états cibles, l'outil va déterminer automatiquement les opérations de maintenance les plus pertinentes tout en respectant les contraintes imposées (en termes de budget ou de nombre maximal d'ouvrage à traiter par période). Cette approche est intéressante dans la mesure où elle permettra au Pôle OA AREA de prévoir les besoins en terme de maintenance en fonction des contraintes (portant sur l'état dans lequel les ouvrages devraient être restitués en fin de concession) que pourraient lui imposer son concédant (l'Etat) d'ici 2035.

Le schéma fourni en page 39, explicite la démarche dans le cas où les budgets par périodes sont imposés.

Figure 29 Principe d'hierarchisation des ouvrages par rapport aux enjeux de disponibilité et de sécurité

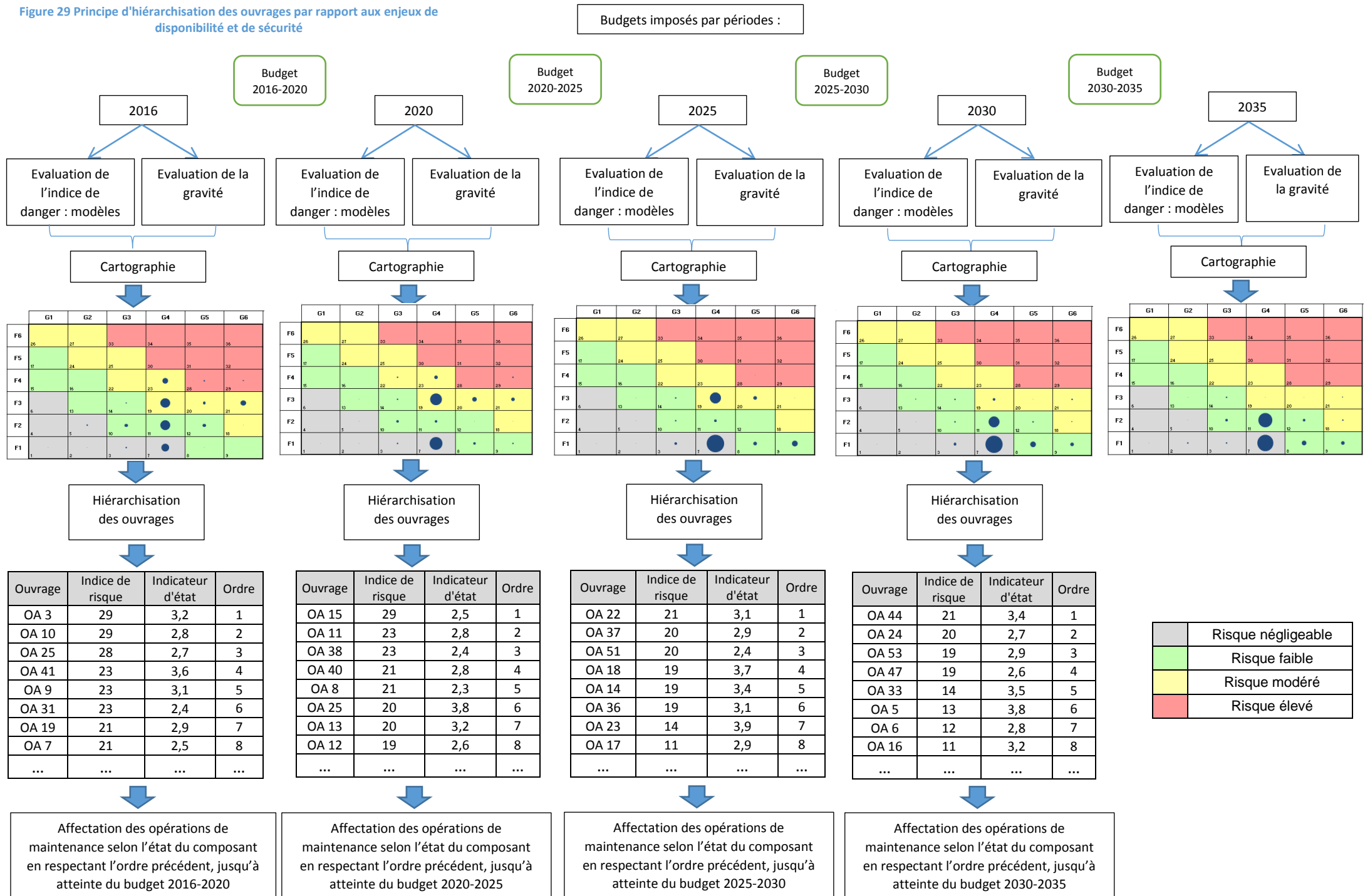
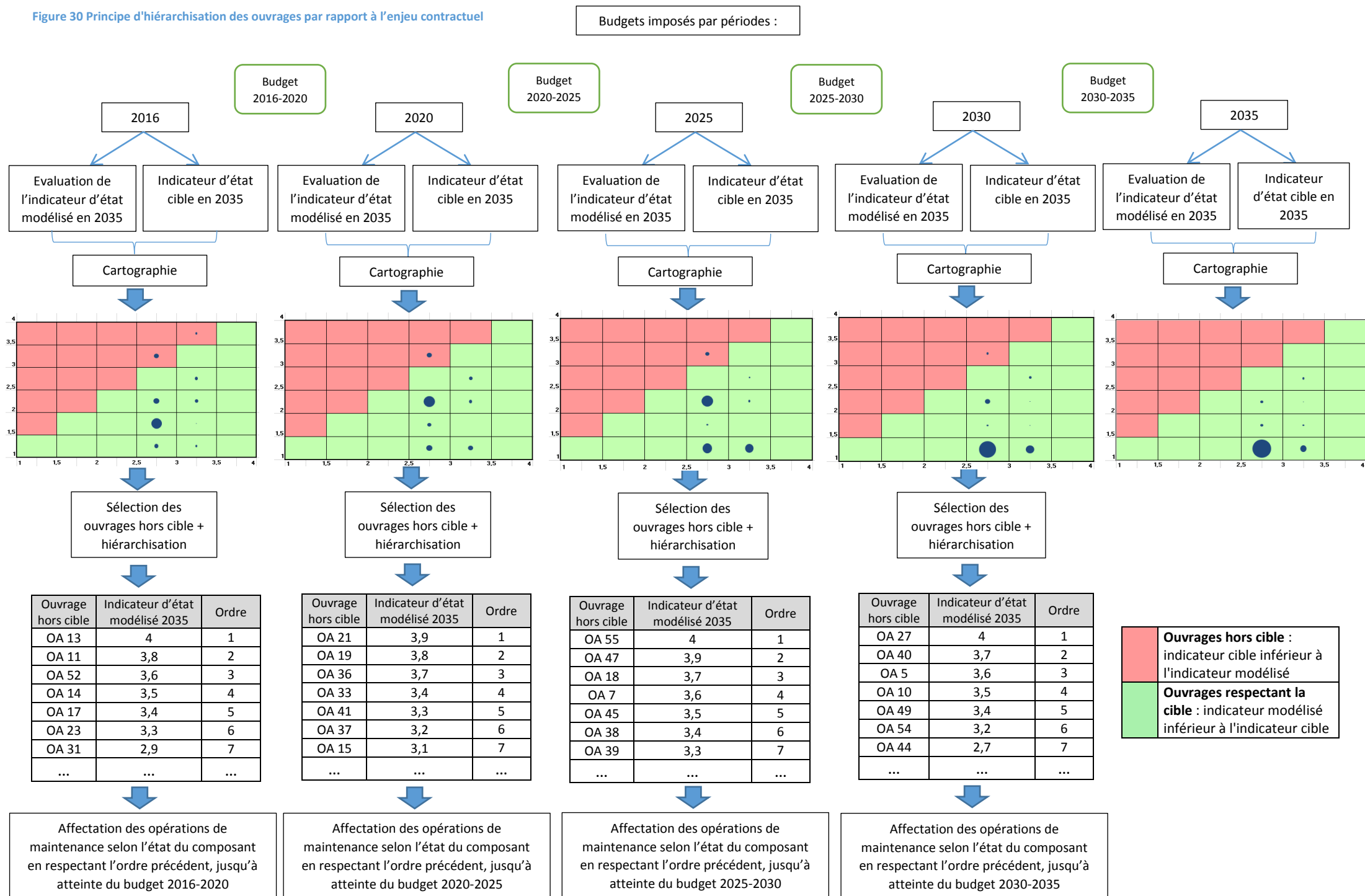


Figure 30 Principe d'hierarchisation des ouvrages par rapport à l'enjeu contractuel



3- Outil basé sur l'historique de la notation IQOA des ouvrages d'art

Le développement de modèles déterministes pour simuler la détérioration des ouvrages nécessite souvent la connaissance de paramètres physiques caractérisant la dégradation de la structure. Contrairement aux méthodes déterministes, les modèles probabilistes permettent de prévoir l'évolution de l'état d'un ouvrage sans avoir nécessairement d'informations sur les processus physiques de dégradation de la structure. Ces modèles se basent en effet sur des indicateurs globaux qui fournissent une appréciation générale de l'état de l'ouvrage.

Les ouvrages d'art du parc AREA sont inspectés périodiquement. Ces inspections permettent d'attribuer une note IQOA caractérisant l'état global des ouvrages. La base de données OA AREA contient l'historique des notes IQOA de tous les ouvrages AREA depuis 1997. L'objectif de cette partie du TFE a été d'exploiter l'historique de la notation IQOA afin de développer une méthode probabiliste permettant de modéliser la détérioration des ouvrages d'art.

Dans un premier temps, nous allons présenter la théorie des chaînes de Markov sur laquelle se base la méthode développée. Dans un deuxième temps nous intéresserons à la démarche qui a été adoptée pour construire l'outil de modélisation basé sur la notation IQOA.

3.1- Principe de la méthode : modélisation de la détérioration des ouvrages par les Chaînes de Markov

3.1.1- Présentation de l'approche probabiliste de la détérioration des ouvrages et des notations utilisées

Selon l'état de l'ouvrage, celui-ci est décrit par une note IQOA qui peut être égale à 1, 2, 2E, 3 ou 3U (voir tableau page 26). Dans la suite et pour simplifier les notations, on considérera les correspondances suivantes :

Etat IQOA	Notation
1	1
2	2
2E	3
3	4
3U	5

(état comme neuf)

(très mauvais état)

On adoptera également les notations suivantes :

- $E = \{1, 2, 3, 4, 5\}$: L'ensemble des états de la notation IQOA (issue de l'inspection visuelle de l'ouvrage)
- $\underline{V} = (1, 2, 3, 4, 5)$: Le vecteur ligne des états IQOA
- Δt : C'est le temps séparant deux inspections détaillées successives de l'ouvrage. Ce temps peut varier d'un ouvrage à un autre, mais en général il est égal en moyenne à 5 ans
- X_t : Variable aléatoire à l'instant t , dont la valeur appartient à l'ensemble $E = \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- $p_i(t)$: La probabilité que l'ouvrage soit dans un état i à l'instant t avec $p_i(t) \in [0, 1]$.
Si pour chaque instant $t + k.\Delta t$ l'ouvrage est dans un état $X_{t+k.\Delta t} = j_k$, avec $j_k \in E$ alors :
 $p_i(t + n\Delta t) = p(X_t = j_0, X_{t+\Delta t} = j_1, \dots, X_{t+n\Delta t} = i)$
- \bar{X}_t : Valeur moyenne de la variable X_t ; c'est l'état « moyen » de l'ouvrage à l'instant t : $\bar{X}_t = \sum_{i=1}^5 p_i(t) \times i$
- $\underline{P}(t) = (p_1(t); p_2(t); p_3(t); p_4(t); p_5(t))$: Le vecteur de probabilité caractérisant l'état de l'ouvrage à l'instant t
- $p(X_{t+\Delta t} = i | X_t = j)$: Probabilité que l'ouvrage soit dans un état i à l'instant $t + \Delta t$ sachant qu'il était en état j à l'instant t ; il s'agit d'une probabilité conditionnelle¹³
- $p(X_{t+n\Delta t} = i | X_{t+(n-1)\Delta t} = j_{n-1}, \dots, X_t = j_0)$: Probabilité que l'ouvrage soit dans un état i à l'instant $t + n\Delta t$ sachant l'historique de la notation de l'ouvrage $\{j_0, j_1, \dots, j_{n-1}\}$ depuis l'instant t jusqu'à $t + (n-1)\Delta t$:
- $\underline{Q}(t) = \{p(X_{t+\Delta t} = i | X_t = j)\}_{1 \leq i, j \leq 5}$: La matrice de probabilités conditionnelles appelée aussi matrice de transition d'états

¹³ Si A et B sont deux événements d'un espace probabilisé, alors la probabilité conditionnelle de l'évènement A, sachant qu'un autre évènement B de probabilité non nulle s'est réalisé (probabilité de A sachant B) est : $P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$

L'état d'un ouvrage à un instant donné est caractérisé par une note IQOA. Cette note peut augmenter comme conséquence du vieillissement de la structure ou diminuer dans le cas où l'état de l'ouvrage connaît une amélioration suite à une opération de maintenance ou de réparation. Cette note peut donc être assimilée à une **variable aléatoire** en fonction du temps. Dans notre cas, la note IQOA peut être modélisée par une variable aléatoire à **temps discret** (puisque l'évaluation de l'état d'un ouvrage ne se fait que par intervalles de temps ; Δt) et à **valeurs discrètes** (puisque les états possibles constituent un ensemble fini ; E).

Le schéma suivant explicite le principe d'une modélisation probabiliste de l'évolution de l'état d'une structure :

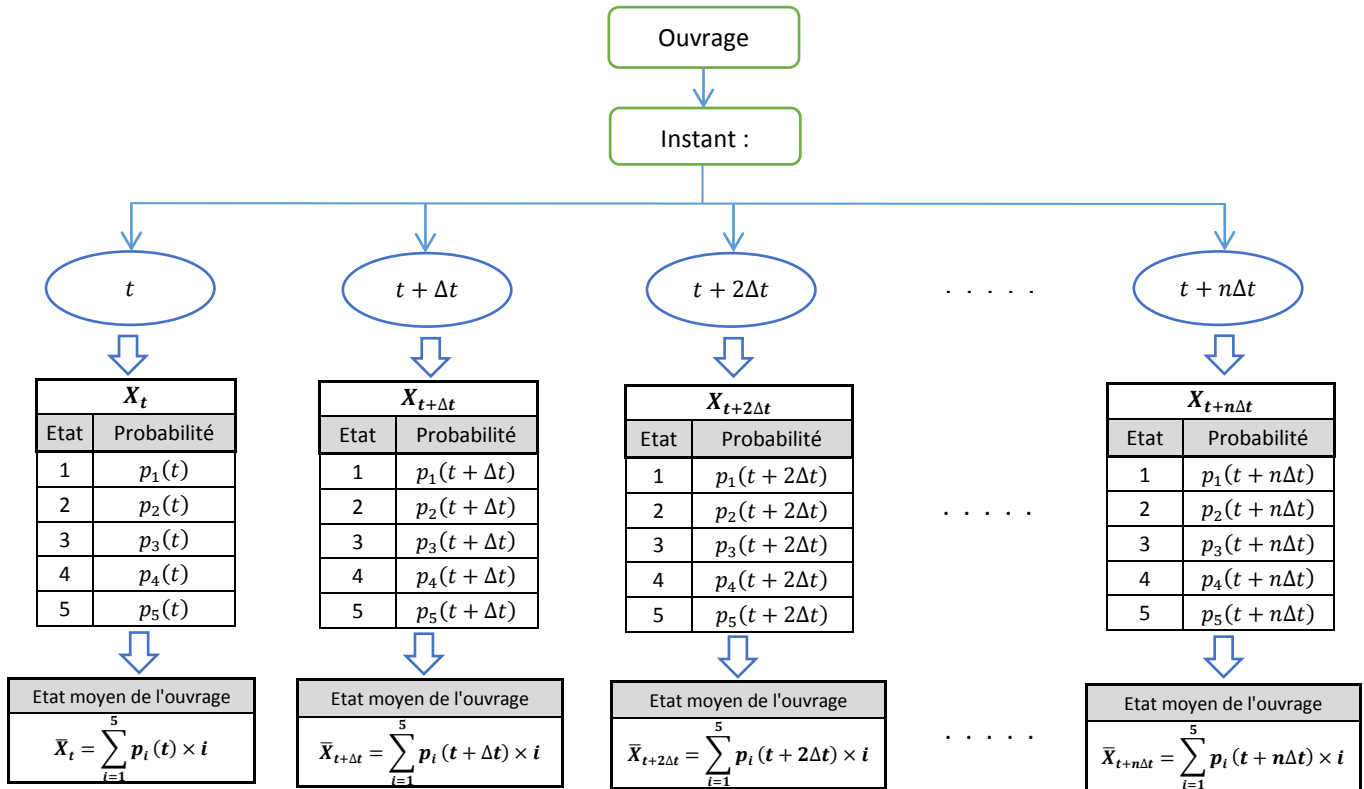


Figure 31 Principe de la modélisation probabiliste de l'évolution de l'état des structures

Le schéma précédent se traduit par la figure suivante :

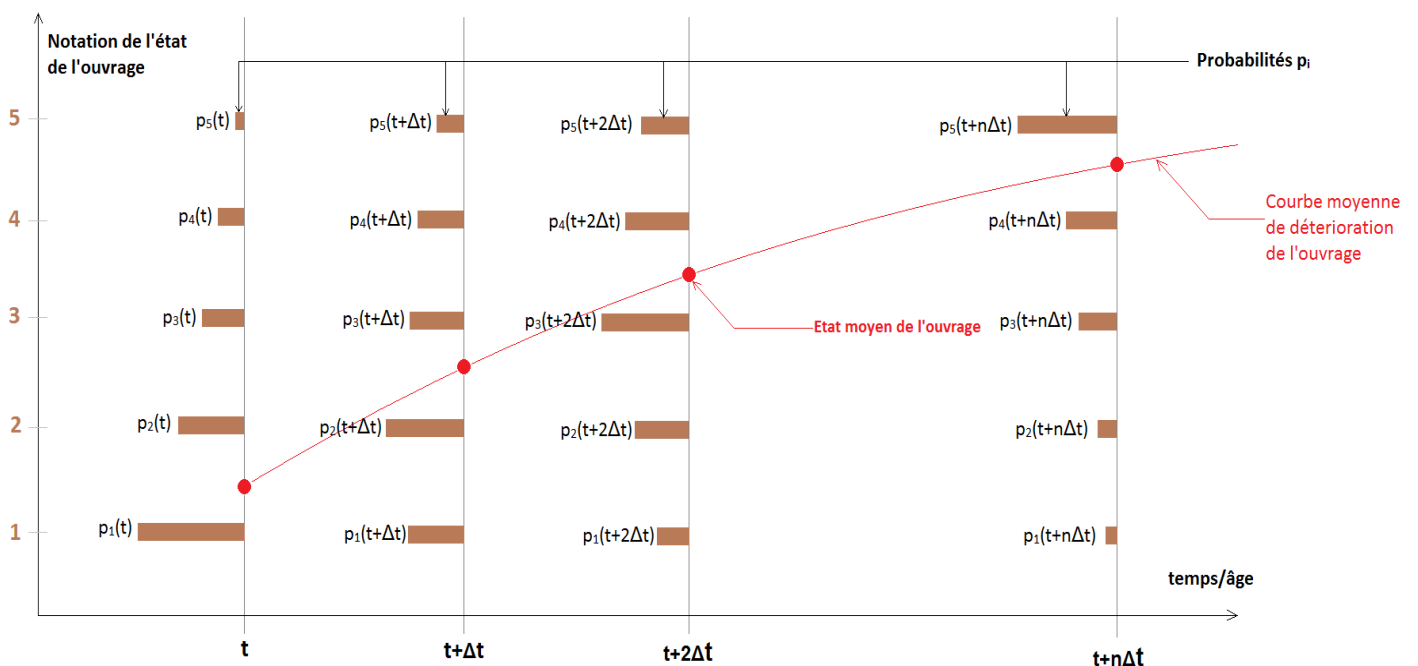


Figure 32 Interprétation graphique de la modélisation probabiliste de la détérioration des structures

3.1.2- Définitions

- Une variable aléatoire discrète est une variable aléatoire qui ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs.
- **Une chaîne de Markov à temps discret** est une suite de variables aléatoires discrètes $(X_{t_0}, X_{t_1}, X_{t_2} \dots)$ qui vérifie pour chaque entier n la relation suivante :

$$p(X_{t_n} = j_n | X_{t_0} = j_0, \dots, X_{t_{n-1}} = j_{n-1}) = p(X_{t_n} = j_n | X_{t_{n-1}} = j_{n-1}) \quad (1)$$

En utilisant les notations de la page 40, l'expression précédente est équivalente à :

$$p(X_{t_n} = j_n | X_{t_0} = j_0, \dots, X_{t_{n-1}} = j_{n-1}) = \underline{Q}(t_n)$$

Cette propriété se traduit par le fait que la prédiction de l'état futur du processus à modéliser ne dépend que de l'état présent. Pour un ouvrage d'art par exemple, cette hypothèse consiste à énoncer que la probabilité pour que l'ouvrage soit dans un état donné à la campagne n ne dépend que de l'état dans lequel il était à la campagne $n - 1$ et non des campagnes précédentes. En d'autres termes, seul l'état présent compte pour déterminer les états futurs.

- Une chaîne de Markov à temps discret est dite **homogène** si pour tout entier n , la probabilité conditionnelle $p(X_{t_n} = j_n | X_{t_{n-1}} = j_{n-1})$ ne dépend pas de n . Cela revient à dire que la matrice de transition d'états $\underline{Q}(t)$ ne dépend pas du temps : $\underline{Q}(t) = \underline{Q} \quad (2)$

Dans la suite, nous utiliserons les chaînes de Markov homogènes pour modéliser la détérioration des ouvrages d'art. La justification des deux hypothèses (1) et (2) a été faite en exploitant l'historique des notes IQOA de l'ensemble des ouvrages AREA. Le détail de la justification des deux hypothèses est présenté en annexe 5 page 72.

3.1.3- Modélisation de l'évolution de l'état d'un ouvrage par les chaînes de Markov :

La modélisation probabiliste de la détérioration d'un ouvrage revient à établir une relation permettant de calculer le vecteur de probabilité de l'ouvrage ; $\underline{P}(t) = (p_1(t); p_2(t); p_3(t); p_4(t); p_5(t))$ en fonction du temps et de l'état initial de l'ouvrage.

Considérons un ouvrage ayant un historique $\{(t, j_0); (t + \Delta t, j_1); \dots; (t + n\Delta t, j_{n-1})\}$ entre t et $t + n\Delta t$.

Pour déterminer une telle relation, commençons par exprimer la probabilité que l'ouvrage soit dans un état i à l'instant $t + k\Delta t$, en fonction des probabilités à l'instant $t + (k - 1)\Delta t$ avec k variant entre 1 et n :

D'après la Loi de Bayes¹⁴, nous pouvons écrire en utilisant les notations de la page 40 :

- De l'instant t à $t + \Delta t$:

$$p_i(t + \Delta t) = \sum_{j=1}^5 p_j(t) \times p(X_{t+\Delta t} = i | X_t = j)$$

Et d'après l'hypothèse d'homogénéité ; $p(X_{t+\Delta t} = i | X_t = j) = \langle \underline{Q} \rangle_{ij}$ avec \underline{Q} une matrice indépendante du temps.

Cette écriture peut être généralisée pour tout le vecteur de probabilité de l'ouvrage à l'instant $t + \Delta t$ à travers la relation matricielle :

$$\underline{P}(t + \Delta t) = \underline{P}(t) \cdot \underline{Q} \quad (3)$$

¹⁴ Si $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ est une partition d'un espace probabilisé Ω ($i \neq j \rightarrow A_i \cap A_j = \emptyset$ et $\bigcup_{i=1}^n A_i = \Omega$), et B un évènement donné, alors : $P(B) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \times P(B|A_i)$

- De l'instant $t + \Delta t$ à $t + 2\Delta t$:

$$p_i(t + 2\Delta t) = \sum_{j=1}^5 p_j(t + \Delta t) \times p(X_{t+2\Delta t} = i | X_{t+\Delta t} = j, X_t = j_0)$$

D'après l'hypothèse de Markov ; $p(X_{t+2\Delta t} = i | X_{t+\Delta t} = j, X_t = j_0) = p(X_{t+2\Delta t} = i | X_{t+\Delta t} = j)$

Et d'après l'hypothèse d'homogénéité ; $p(X_{t+2\Delta t} = i | X_{t+\Delta t} = j) = p(X_{t+\Delta t} = i | X_t = j) = \langle \underline{Q} \rangle_{i,j}$

Cette écriture peut être généralisée pour tout le vecteur de probabilité de l'ouvrage à l'instant $t + 2\Delta t$ à travers la relation matricielle :

$$\underline{P}(t + 2\Delta t) = \underline{P}(t + \Delta t) \cdot \underline{Q} \quad (4)$$

En combinant les deux égalités (3) et (4), on trouve : $\underline{P}(t + 2\Delta t) = \underline{P}(t) \cdot \underline{Q} \cdot \underline{Q} = \underline{P}(t) \cdot \underline{Q}^2$

En raisonnant par récurrence jusqu'à l'ordre n , on aboutit à la relation suivante : $\underline{P}(t + n\Delta t) = \underline{P}(t) \cdot \underline{Q}^n \quad (5)$

La relation (5) permet donc d'estimer vecteur de probabilité à l'instant $t + n\Delta t$ (c'est-à-dire les probabilités de l'ouvrage d'être dans chaque état à l'instant $t + n\Delta t$) en fonction du vecteur de probabilité à l'instant t .

- A partir de ce qui précède, pour un ouvrage donné dont on ne connaît que l'état initial $\underline{P}(t)$, il est possible de prévoir l'évolution de son état dans le temps à travers la relation (5), à condition que l'on sache les coefficients de la matrice \underline{Q} .

Afin de pouvoir exploiter cette méthode, il est donc nécessaire de déterminer la matrice de transition d'états \underline{Q} . Dans la partie suivante, nous allons voir comment on peut construire cette matrice à partir de l'historique de la notation IQOA des ouvrages d'art (base de données ouvrages d'art)

3.2- Construction de l'outil

3.2.1- Définition de la matrice de transition d'état : probabilisation de la note IQOA

Une fois les deux hypothèses d'application des chaînes de Markov sont vérifiées, il est possible de quantifier la probabilité pour un ouvrage d'être dans chacune des classes IQOA pour les années à venir. En effet, si on arrive à déterminer tous les termes de la matrice de transition d'états \underline{Q} , il est possible de prévoir l'évolution de l'état d'un ouvrage à partir d'un état initial vers un état futur au cours d'un intervalle de temps Δt ¹⁵ comme nous l'avons montré dans le paragraphe précédent (page 42, relation (3)).

La matrice \underline{Q} est de la forme suivante :

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} & p_{1,4} & p_{1,5} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,3} & p_{2,4} & p_{2,5} \\ p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} & p_{3,4} & p_{3,5} \\ p_{4,1} & p_{4,2} & p_{4,3} & p_{4,4} & p_{4,5} \\ p_{5,1} & p_{5,2} & p_{5,3} & p_{5,4} & p_{5,5} \end{bmatrix}$$

Exemple :

Considérons un ouvrage à un instant t dans un état IQOA 1. Le vecteur de probabilité pour cet ouvrage à l'instant t peut être exprimé de la manière suivante : $\underline{P}(t) = (1; 0; 0; 0; 0)$. En suppose aussi que la matrice de transition d'états est la suivante :

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} 0,6 & 0,4 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,7 & 0,3 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,8 & 0,2 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,5 & 0,5 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 1,0 \end{bmatrix}$$

¹⁵ Dans notre cas, cette intervalle est fixé à 5 ans, puisque les l'évaluation de l'état d'un ouvrage à travers les inspections détaillées se fait en moyenne tous les 5 ans

On peut prévoir l'état de l'ouvrage à l'instant $t + \Delta t$ en écrivant : $\underline{P}(t + \Delta t) = \underline{P}(t) \cdot \underline{Q}$

$$\underline{P}(t + \Delta t) = (1; 0; 0; 0; 0) \cdot \begin{bmatrix} 0,6 & 0,4 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,7 & 0,3 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,8 & 0,2 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,5 & 0,5 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 1,0 \end{bmatrix} = (0,6; 0,4; 0; 0; 0)$$

Cela signifie qu'à l'instant $t + \Delta t$, l'ouvrage a une probabilité de **60 %** qu'il reste dans l'état 1 et une probabilité de **40 %** qu'il passe à l'état 2.

L'état moyen de l'ouvrage à $t + \Delta t$ serait donc : $1 \times 0,6 + 2 \times 0,4 + 3 \times 0 + 4 \times 0 + 5 \times 0 = 1,4$ qui peut être interprété comme un état intermédiaire entre les états IQOA 1 et 2.

Détermination de la matrice de transition :

Le principe permettant de calculer la matrice de transition est le suivant : ayant à disposition l'ensemble des notes IQOA pour chaque ouvrage de 1997 à 2015, la probabilité sur la période entre 1997 et 2015, de passer d'un état i à un état j , est égale à la surface totale des ouvrages qui sont notés i à une inspection donnée (inspection m) et notés j à l'inspection suivante (inspection $m + 1$), sur la surface totale des ouvrages qui sont notés i à l'issue de l'inspection initiale (inspection m). Ce concept est traduit mathématiquement comme suit :

$$p_{i,j} = \frac{S(i,j)}{\sum_{j=1}^5 S(i,j)}$$

- $S(i,j)$: est la surface totale des ouvrages qui ont été inspectés au moins deux fois et qui ont une note i à une inspection donnée et une note j à l'inspection suivante, entre les années 1997 et 2015.
- $\sum_{j=1}^5 S(i,j)$: est la surface totale des ouvrages qui ont été inspectés au moins deux fois et qui ont une note i à une inspection donnée entre les années 1997 et 2015 (quel que soit leur état à l'inspection suivante)

La matrice obtenue en appliquant ce raisonnement à l'ensemble des ouvrages en exploitant les données IQOA relatives au parc OA AREA entre 1997 et 2015 est la suivante :

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} 0,56 & 0,42 & 0,02 & 0,00 & 0,00 \\ 0,02 & 0,87 & 0,11 & 0,00 & 0,00 \\ 0,01 & 0,40 & 0,54 & 0,04 & 0,01 \\ 0,00 & 0,69 & 0,00 & 0,25 & 0,06 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Cette matrice donne l'évolution moyenne d'un ouvrage appartenant au parc OA AREA. Elle tient donc compte à la fois de la détérioration due au vieillissement des ouvrages ainsi que de l'ensemble des actions de maintenance qui ont été effectuées jusqu'à présent sur le patrimoine.

Pour illustrer ce que nous venons d'énoncer, considérons un ouvrage du parc OA AREA ayant à un instant donné t une note IQOA 2E (c'est-à-dire une note 3 selon la notation adoptée, voir page 40). Le vecteur probabilité de cet ouvrage à l'instant t est donc : $\underline{P}(t) = (0; 0; 1; 0; 0)$. L'état de l'ouvrage à l'instant $t + \Delta t$ est alors décrit par le vecteur :

$$\underline{P}(t + \Delta t) = (0; 0; 1; 0; 0) \cdot \underline{Q} = (0,01; 0,40; 0,54; 0,04; 0,01)$$

Cela revient à dire qu'un ouvrage dans un état 2E à :

- Une probabilité de **40 %** pour qu'il soit ramené à l'état IQOA 2 au cours de l'intervalle Δt ; il s'agit de l'effet de la maintenance sur l'état d'ouvrage
- Une probabilité de **54 %** pour qu'il reste à l'état IQOA 2 au cours de l'intervalle Δt
- Une probabilité de **4 %** pour qu'il passe à l'état IQOA 3 au cours de l'intervalle Δt ; il s'agit ici d'une détérioration de l'ouvrage

De manière générale, la matrice de transition d'état \underline{Q} peut être interprétée de la manière suivante :

- La partie au-dessus de la diagonale (diagonale incluse) rend compte de la détérioration pure de l'ouvrage, puisqu'il s'agit des probabilités pour que l'ouvrage passe d'un état i à un état j avec $i \leq j$, c'est-à-dire d'un état donné à un état plus détérioré. Cette partie correspond aux cellules en rouge de la matrice ci-dessous.

- La partie au-dessous de la diagonale rend compte des actions qui ont permis d'améliorer l'état de l'ouvrage, c'est-à-dire les actions de maintenance. Cette partie de la matrice correspond aux probabilités pour que l'ouvrage passe d'un état i à un état j avec $i > j$ et $i \geq 2$, c'est-à-dire d'un état donné à un état moins détérioré. Cette partie correspond aux cellules en vert de la matrice ci-dessous.

0,56	0,42	0,02	0,00	0,00
0,02	0,87	0,11	0,00	0,00
0,01	0,40	0,54	0,04	0,01
0,00	0,69	0,00	0,25	0,06
0,00	0,00	0,00	1,00	0,00

On peut donc dire que la matrice de transition \underline{Q} rend compte à la fois du vieillissement caractérisant le patrimoine OA ainsi que « la politique de maintenance » adoptée par le gestionnaire du patrimoine.

Dans la suite de l'étude, l'objectif étant de rechercher les actions de maintenance optimales à effectuer, il convient de ne tenir compte que de la dégradation des ouvrages et non plus de la maintenance annuelle puisque les ouvrages pris individuellement ne sont a priori pas entretenus entre deux interventions. Pour chaque ligne de la matrice \underline{Q} donnée dans l'expression (6), les termes sous la diagonale sont donc ajoutés au terme diagonal. La matrice devient alors une matrice diagonale supérieure de **dégradation pure** s'exprimant ainsi :

$$\underline{Q}_D = \begin{bmatrix} 0,56 & 0,42 & 0,02 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,89 & 0,11 & 0,01 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,95 & 0,04 & 0,01 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,94 & 0,06 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Détermination de la matrice de transition par familles d'ouvrages :

Il est possible d'affiner la matrice de transition suivant la nature des ouvrages que l'on souhaite étudier, en extrayant de la base de données les notes pour les différentes catégories d'ouvrages. A titre d'illustration, chacune des matrices de transition d'états suivante correspond à une famille d'ouvrages :

$$\underline{Q}_{D_1} = \begin{bmatrix} 0,35 & 0,64 & 0,01 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,81 & 0,19 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,98 & 0,02 & 0,11 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} : \text{ouvrages à Dalle Précontrainte}$$

$$\underline{Q}_{D_2} = \begin{bmatrix} 0,02 & 0,95 & 0,00 & 0,03 & 0,00 \\ 0,00 & 0,76 & 0,23 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,97 & 0,03 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} : \text{ouvrages à Caisson Précontraint}$$

$$\underline{Q}_{D_3} = \begin{bmatrix} 0,59 & 0,39 & 0,02 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,97 & 0,03 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,96 & 0,04 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} : \text{ouvrages en Portique}$$

$$\underline{Q}_{D_4} = \begin{bmatrix} 0,10 & 0,90 & 0,02 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,91 & 0,09 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,95 & 0,05 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix} : \text{ouvrages à Dalle Elégie}$$

3.2.2- Prise en compte des opérations de maintenance : matrices de maintenance

Afin de pouvoir prendre compte de l'effet des actions de maintenance sur l'évolution de l'état des ouvrages dans le cadre de la méthode de modélisation par les chaînes de Markov, il est important de définir la notion de **matrice de maintenance**.

L'effet des actions de maintenance est modélisé par des matrices de transition qui sont propres à chaque action de maintenance. Ces matrices sont de la forme suivante :

$$\underline{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_{2,1} & 1 - m_{2,1} & 0 & 0 & 0 \\ m_{3,1} & m_{3,2} & 1 - \sum_{j=1}^2 m_{3,j} & 0 & 0 \\ m_{4,1} & m_{4,2} & m_{4,3} & 1 - \sum_{j=1}^3 m_{4,j} & 0 \\ m_{5,1} & m_{5,2} & m_{5,3} & m_{5,4} & 1 - \sum_{j=1}^4 m_{5,j} \end{pmatrix}$$

Pour chaque i et j entre 1 et 5 tel que $i > j$ et $i \geq 2$, le terme $m_{i,j}$ est égale au pourcentage en terme de surface d'ouvrages à maintenir pour passer de l'état i à l'état j .

Les termes de cette matrices sont tels que :

- $m_{i,j} \geq 0$ pour $1 \leq i, j \leq 5$
- $m_{1,1} = 1$
- $m_{i,j} = 0$ pour $j > i$
- $\sum_{j=1}^{i-1} m_{i,j} \leq 1$ pour $2 \leq i \leq 5$

Par exemple, la matrice \underline{M}_1 correspond au passage de l'état IQOA 2E à l'état 2 et traduit une action de maintenance d'équipement sur l'ouvrage. La matrice \underline{M}_2 correspond au passage de l'état IQOA 3 à 2, ce qui correspond à une action de maintenance structurale.

$$\underline{M}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Si un ouvrage est dans un état 2E à un instant donné, c'est-à-dire décrit par le vecteur $\underline{P}_{avant} = (0; 0; 1; 0; 0)$, alors la prise en compte de l'action de maintenance \underline{M}_1 revient à écrire : $\underline{P}_{après} = \underline{P}_{avant} \cdot \underline{M}_1 = (0; 1; 0; 0; 0)$: l'ouvrage est passé de l'état 2E à l'état 2.

$$\underline{M}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Si un ouvrage est dans un état 3 à un instant donné, c'est-à-dire décrit par le vecteur $\underline{P}_{avant} = (0; 0; 0; 1; 0)$, alors la prise en compte de l'action de maintenance \underline{M}_2 revient à écrire : $\underline{P}_{après} = \underline{P}_{avant} \cdot \underline{M}_2 = (0; 1; 0; 0; 0)$: l'ouvrage est passé de l'état 3 à l'état 2.

La matrice \underline{M}_3 quant à elle, fait passer l'ouvrage dans la classe IQOA 2 s'il est en 2E et dans la classe IQOA 2 s'il est en 3, ce qui correspond à une maintenance d'équipement à laquelle s'ajoute une action de maintenance structurale. Pour ce qui concerne la matrice \underline{M}_4 , celle-ci permet de passer les états dégradés (2E, 3 et 3u) en IQOA 2 et ce qui correspond à une réhabilitation de l'ouvrage.

$$\underline{M}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\underline{M}_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

3.2.3- Définition de la matrice des coûts de maintenance

Afin de pouvoir optimiser la gestion de la maintenance des ouvrages d'art, il est d'abord nécessaire de connaître le coût de chaque type d'action de maintenance envisageable sur ces ouvrages. Puisqu'on désire développer une méthode de gestion en se basant sur le système de notation IQOA, il est pertinent de définir les coûts des opérations de maintenance suivant leur effet sur la note IQOA des ouvrages. Ainsi, on peut représenter les coûts de maintenance sous la forme d'une matrice :

		Etat après maintenance				
		1	2	2E	3	3U
Etat avant maintenance	1	0	0	0	0	0
	2	$C_{2,1}$	0	0	0	0
	2E	$C_{3,1}$	$C_{3,2}$	0	0	0
	3	$C_{4,1}$	$C_{4,2}$	$C_{4,3}$	0	0
	3U	$C_{5,1}$	$C_{5,2}$	$C_{5,3}$	$C_{5,4}$	0

Tableau 7 Forme de la matrice des coûts de maintenance

Avec $C_{i,j}$, (i et j des entiers compris entre 1 et 5 tels que $i > j$) est le coût de maintenance unitaire moyen par m^2 d'ouvrage nécessaire pour passer de l'état i à l'état j .

Cette matrice dépend de la famille d'ouvrages considérée. Celle-ci peut être déterminée en se basant sur le retour d'expérience des ingénieurs responsables de la maintenance des ouvrages ainsi qu'en exploitant l'historique des opérations de maintenances qui ont été déjà réalisées par le passé. En effet, la base de données OA AREA contient les rapports de travaux menés sur le patrimoine. Dans ces rapports on trouve notamment les coûts de réparation des ouvrages.

La matrice suivante donne à titre illustratif les coûts de maintenance unitaires moyens (en €/m² d'ouvrage) pour un ouvrage d'art quelconque :

0	0	0	0	0
350	0	0	0	0
750	400	0	0	0
1250	800	500	0	0
1500	900	600	250	0

A travers l'outil que nous avons développé dans le cadre la présente approche, l'utilisateur peut définir ou modifier les termes de la matrice des coûts de maintenance en fonction des familles d'ouvrages qu'il souhaite étudier.

3.2.4- Structuration de l'outil, définitions d'objectifs et optimisation

L'objectif principal de l'outil que nous avons développé dans cette partie du stage est de pouvoir prédire l'évolution de l'état des ouvrages (jusqu'en 2035) en raisonnant par familles d'ouvrages, à travers une approche probabiliste.

Considérons une famille F que l'on désire étudier. Comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe 3.1.3, la modélisation de l'évolution de l'état des structures par les chaînes de Markov nécessite la connaissance de deux informations de base :

- Le vecteur de probabilité initial (qui décrit l'état d'un ouvrage à l'instant initial)
- La matrice de transition d'état spécifique à la famille d'ouvrages qui nous intéresse

○ **Vecteur de probabilité initial :**

Puisque l'on désire raisonner par familles d'ouvrages, le vecteur de probabilité initial doit décrire l'état moyen de la famille d'ouvrage. Pour ce qui concerne cette étude, nous nous sommes fixé comme instant initial l'année de **2015**. Pour une famille d'ouvrages **F**, le vecteur de probabilité initial **P(2015)** est calculé de la manière suivante :

$$\underline{P}(2015) = (p_1(2015); p_2(2015); p_{2E}(2015); p_3(2015); p_{3U}(2015))$$

$p_j(2015)$ étant le rapport entre la surface totale des ouvrages de la famille **F** ayant une note IQOA égale à **j**, sur la surface totale des ouvrages de la famille **F** :

$$p_j(2015) = \frac{\sum_{k=1}^n S_k(IQOA = j)}{\sum_{k=1}^n S_k}$$

Avec :

$$F = \{OA_1, OA_2, \dots, OA_n\}$$

S_k : Surface de l'ouvrage OA_k

$$S_k(IQOA = j) = \begin{cases} S_k, & \text{si la note IQOA de l'ouvrage } OA_k \text{ est égale à } j \\ 0, & \text{si la note IQOA de l'ouvrage } OA_k \text{ est } \neq \text{ de } j \end{cases}$$

○ **Matrice de transition d'état :**

La matrice de transition d'états \underline{Q}_{D_F} relative à la famille d'ouvrages **F** est calculée comme il a été expliqué dans le paragraphe 3.2.1 page 47. Nous rappelons que cette matrice donne les probabilités d'évolution d'un état **i** à un instant **t** donné vers un état **j** à un instant **t + Δt**. Nous rappelons également que dans le cadre de cette étude, l'intervalle de temps **Δt** est égal 5 ans.

○ **Prise en compte des opérations de maintenance :**

Comme nous l'avons présenté dans le paragraphe 3.2.2 page 50, la prise en compte des opérations de maintenance dans le cadre de la présente approche probabiliste est possible grâce à la notion de matrice de maintenance. Pour ce qui concerne cette étude, nous avons adopté un raisonnement par intervalles de 5 ans ; 2015, 2020, 2025, 2030 et 2035. Nous avons donc défini **4** matrices de maintenance : \underline{M}_{2020} , \underline{M}_{2025} , \underline{M}_{2030} et \underline{M}_{2035}

\underline{M}_{2020} : matrice des opérations de maintenance à mener sur la famille d'ouvrages **F** avant **2020**

\underline{M}_{2025} : matrice des opérations de maintenance à mener sur la famille d'ouvrages **F** entre **2021** et **2025**

\underline{M}_{2030} : matrice des opérations de maintenance à mener sur la famille d'ouvrages **F** entre **2026** et **2030**

\underline{M}_{2035} : matrice des opérations de maintenance à mener sur la famille d'ouvrages **F** entre **2031** et **2035**

○ **Prévision de l'état des ouvrages en 2035 :**

En exploitant ce qui a été présenté dans le paragraphe 3.1.3 pages 46 et 47, il est possible à travers la modélisation par les chaînes de Markov de prévoir l'état¹⁶ des structures d'une famille d'ouvrages **F** à l'horizon **2035** en adoptant le raisonnement suivant :

A partir de l'état initial des ouvrages de la famille **F** en **2015**, on peut prévoir l'état des ouvrages de cette famille en **2020** via la relation suivante :

$$\underline{P}(2020)_{\text{avant maintenance}} = \underline{P}(2015) \cdot \underline{Q}_{D_F} \quad (8)$$

¹⁶ En termes de note IQOA

La réalisation d'opérations de maintenance sur les ouvrages de la famille considérée en **2020** aura un effet sur l'état des ouvrages qui se traduit mathématiquement par la relation suivante :

$$\underline{P}(2020)_{\text{après maintenance}} = \underline{P}(2020)_{\text{avant maintenance}} \cdot \underline{M}_{2020} \quad (9)$$

En combinant les deux expressions (8) et (9) nous obtenons l'égalité suivante :

$$\underline{P}(2020)_{\text{après maintenance}} = \underline{P}(2015) \cdot (\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2020})$$

En raisonnant de la même façon et de manière itérative (entre 2020 et 2025 puis entre 2025 et 2030 et enfin entre 2030 et 2035) nous aboutissons à l'égalité suivante :

$$\underline{P}(2035)_{\text{après maintenance}} = \underline{P}(2015) \cdot (\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2020}) \cdot (\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2025}) \cdot (\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2030}) \cdot (\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2035}) \quad (10)$$

Le schéma ci-dessous explicite la démarche permettant de modéliser l'évolution de l'état des ouvrages d'une famille ainsi que les données nécessaires pour cette modélisation :

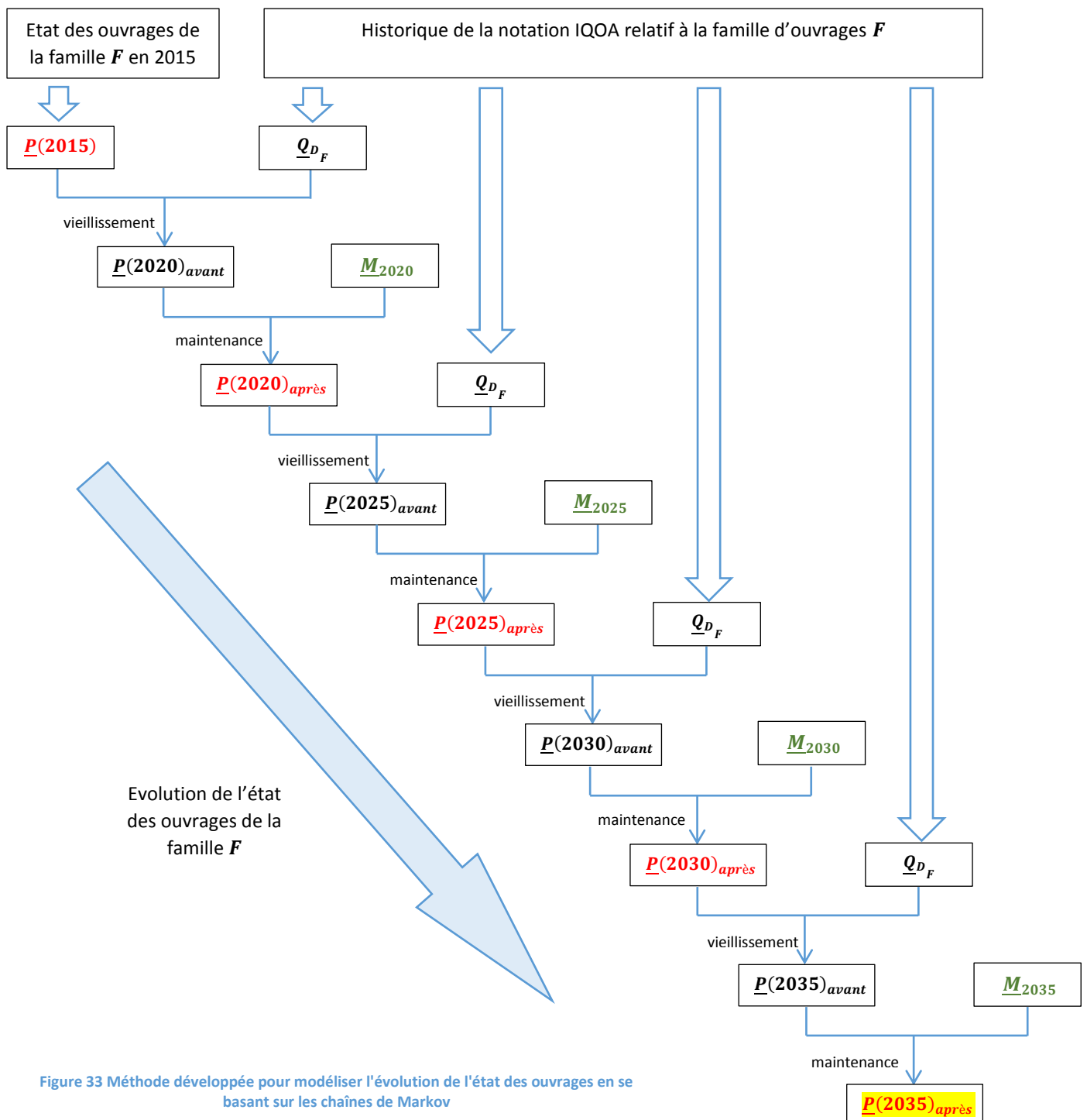


Figure 33 Méthode développée pour modéliser l'évolution de l'état des ouvrages en se basant sur les chaînes de Markov

L'état des ouvrages d'art en fin de concession en 2035 dépendra des opérations de maintenance qui seront menées sur le patrimoine d'ici 2035. Ceci est formulé mathématiquement à travers la relation (10).

Ainsi, à chaque jeu de matrices ($\underline{M}_{2020}, \underline{M}_{2025}, \underline{M}_{2030}, \underline{M}_{2035}$) correspondra un scénario de maintenance.

➤ A titre d'exemple, si l'on considère le scénario où l'on n'effectue aucune opération de maintenance d'ici 2035, cela revient à considérer des matrices de maintenance égales à la matrice identité d'ordre 5 ; \underline{Id}_5

Ainsi pour le jeu de matrices suivant : ($\underline{Id}_5, \underline{Id}_5, \underline{Id}_5, \underline{Id}_5$), on obtient :

$$\underline{P}(2035)_{\text{après maintenance}} = \underline{P}(2015) \cdot \underline{Q}_{D_F}^4$$

Cette dernière égalité signifie que dans le cas du « scénario sans maintenance », l'état des ouvrages va se détériorer sous l'effet d'une dégradation pure (aucune action de maintenance).

○ **Expression du coût total de maintenance des ouvrages :**

On considère les notations suivantes :

$(C_{i,j})_{1 \leq i,j \leq 5}$: la matrice de coûts associée aux actions de maintenance relatives à la famille d'ouvrages F

S_F : la surface totale des ouvrages de la famille F

$\underline{P}_i = (p_1(i); p_2(i); p_3(i); p_4(i); p_5(i))$: le vecteur de probabilité caractérisant la famille d'ouvrage à l'année i (p.48)

$\underline{M}_{2020} = (m_{2020_{i,j}})_{1 \leq i,j \leq 5}$: matrice des actions de maintenance en 2020

$\underline{M}_{2025} = (m_{2025_{i,j}})_{1 \leq i,j \leq 5}$: matrice des actions de maintenance en 2025

$\underline{M}_{2030} = (m_{2030_{i,j}})_{1 \leq i,j \leq 5}$: matrice des actions de maintenance en 2030

$\underline{M}_{2035} = (m_{2035_{i,j}})_{1 \leq i,j \leq 5}$: matrice des actions de maintenance en 2035

$\underline{Q}_{D_F} = (q_{i,j})_{1 \leq i,j \leq 5}$: matrice de transition d'états (de dégradation pure) relative à la famille d'ouvrages F

C_i : coût total des opération de maintenance effectué à l'année i

En exploitant cette notation, nous pouvons déterminer l'expression du coût total des opérations de maintenance, en : 2020, 2025, 2030 et 2035 :

• **En 2020 :**

$$C_{2020} = S_F \cdot \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 p_i(2015) \times C_{i,j} \times m_{2020_{i,j}}$$

• **En 2025 :**

$$C_{2025} = S_F \cdot \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 p_i(2020) \times C_{i,j} \times m_{2025_{i,j}}$$

Avec : $p_i(2020) = \left[\underline{P}(2015) \cdot (\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2020}) \right]_i$

- **En 2030 :**

$$C_{2030} = S_F \cdot \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 p_i(2025) \times C_{i,j} \times m2030_{i,j}$$

$$\text{Avec : } p_i(2025) = \left[\underline{P}(2020) \cdot \left(\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2025} \right) \right]_i = \left[\underline{P}(2015) \cdot \left(\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2020} \right) \cdot \left(\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2025} \right) \right]_i$$

- **En 2035 :**

$$C_{2035} = S_F \cdot \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 p_i(2030) \times C_{i,j} \times m2035_{i,j}$$

$$\text{Avec : } p_i(2030) = \left[\underline{P}(2025) \cdot \left(\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2030} \right) \right]_i = \left[\underline{P}(2015) \cdot \left(\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2020} \right) \cdot \left(\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2025} \right) \cdot \left(\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2030} \right) \right]_i$$

Le coût de maintenance total d'ici 2035 s'écrit donc comme suit :

$$C_{Total} = C_{2020} + C_{2025} + C_{2030} + C_{2035}$$

Il est très important de constater que ce coût est une fonction des coefficients des matrices de maintenance :

$$C_{Total} = f \left((m2020_{i,j})_{1 \leq i,j \leq 5}; (m2025_{i,j})_{1 \leq i,j \leq 5}; (m2030_{i,j})_{1 \leq i,j \leq 5}; (m2035_{i,j})_{1 \leq i,j \leq 5} \right)$$

- **Formulation de problèmes d'optimisation :**

Maintenant que nous avons l'expression du coût total de maintenance en fonction des coefficients des matrices de maintenance, il est possible de formuler des problèmes d'optimisation, en imposant des contraintes.

Contraintes issues de la structure des matrices de maintenance :

Les termes des matrices de maintenance $\underline{M}_k = (mk_{i,j})_{1 \leq i,j \leq 5}$ telles que nous les avons définies dans le paragraphe 3.2.2 page 50, vérifient les inéquations suivantes :

- $mk_{i,j} \geq 0$ pour $1 \leq i, j \leq 5$
- $mk_{1,1} = 1$
- $mk_{i,j} = 0$ pour $j > i$
- $\sum_{j=1}^{i-1} mk_{i,j} \leq 1$ pour $2 \leq i \leq 5$

Contraintes que l'on peut imposer :

Dans le cadre de la gestion du patrimoine OA, le Pôle OA AREA souhaite être en mesure d'imposer les pourcentages¹⁷ de chaque classe IQOA à l'horizon 2035. Pour répondre à ce besoin, nous avons développé l'outil de telle manière à ce que l'on est la possibilité de définir des objectifs portant sur la proportion de chaque classe IQOA.

Un exemple de contrainte que l'on peut imposer en termes de pourcentages vis-à-vis de la notation IQOA est représenté sous la forme du tableau suivant :

Etat IQOA	1	2	2E	3	3U
% souhaités en 2035	30	60	5	3	2

Dans la suite on fera référence à ce type de contrainte par le vecteur suivant :

$$\underline{P}(2035)_{imposé} = (p_1(imposé); p_2(imposé); p_{2E}(imposé); p_3(imposé); p_{3U}(imposé))$$

¹⁷ En termes de surfaces d'ouvrages que l'on souhaite avoir pour chaque classe IQOA

On fera référence aussi au vecteur $\underline{P}(2035)_{\text{après maintenance}}$ par $\underline{P}(2035)_{\text{modélisé}}$

D'après l'expression (10), nous avons :

$$\underline{P}(2035)_{\text{modélisé}} = \underline{P}(2015) \cdot (\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2020}) \cdot (\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2025}) \cdot (\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2030}) \cdot (\underline{Q}_{D_F} \cdot \underline{M}_{2035})$$

Dans le problème d'optimisation, nous allons chercher les matrices ($\underline{M}_{2020}, \underline{M}_{2025}, \underline{M}_{2030}, \underline{M}_{2035}$) permettant d'avoir un vecteur modélisé $\underline{P}(2035)_{\text{modélisé}}$ s'approchant le plus possible du vecteur imposé $\underline{P}(2035)_{\text{imposé}}$.

Problème d'optimisation :

Un problème d'optimisation consiste à minimiser ou à maximiser une fonction sur un domaine connu, en imposant des contraintes portant sur les variables dont dépend cette fonction. En d'autres termes, il s'agit d'un problème où l'on cherche les valeurs des variables pour lesquels la fonction atteint un optimum.

En exploitant les éléments précédents, il est possible de formuler le problème d'optimisation suivant :

$$\begin{array}{l}
 \text{Minimiser } C_{Total} \\
 \text{(Pb) } \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Sous contraintes} \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 mk_{ij} \geq 0 \text{ pour } 1 \leq i, j \leq 5 \\
 mk_{1,1} = 1 \\
 mk_{ij} = 0 \text{ pour } j > i \\
 \sum_{j=1}^{i-1} mk_{ij} \leq 1 \text{ pour } 2 \leq i \leq 5
 \end{array} \right\}; k \in \{2020; 2025; 2030; 2035\} \\
 \|\underline{P}(2035)_{\text{modélisé}} - \underline{P}(2035)_{\text{imposé}}\| \leq \varepsilon
 \end{array} \right.
 \end{array} \quad (18)$$

En analysant de l'expression de C_{Total} , on s'aperçoit qu'elle est constituée de termes non linéaires, sous forme de produits des coefficients des matrices $\underline{M}_{2020}, \underline{M}_{2025}, \underline{M}_{2030}$ et \underline{M}_{2035} . Le problème (Pb) est donc un problème d'optimisation non linéaire.

Pour trouver une solution au problème (Pb) nous pouvons donc exploiter des algorithmes d'optimisation non linéaires. Dans le cas de cette étude, nous avons utilisé l'outil **Solveur Excel**¹⁹ pour déterminer une solution permettant de minimiser le coût de maintenance C_{Total} .

Il est à noter que l'outil que nous avons développé dans le cadre de cette partie du TFE permet de prendre en charge d'autres problèmes d'optimisation. Nous citons par exemple le problème où l'on peut imposer les budgets de maintenances par période de 5 ans (en 2020, 2025, 2030 et 2035) et où l'on cherche à minimiser la note IQOA moyenne modélisée²⁰ de la famille d'ouvrage étudiée.

¹⁸

- $\|\underline{P}(2035)_{\text{modélisé}} - \underline{P}(2035)_{\text{imposé}}\|$ est une mesure de l'écart entre les deux vecteurs imposé et modélisé. On peut écrire par exemple : $\|\underline{P}(2035)_{\text{modélisé}} - \underline{P}(2035)_{\text{imposé}}\| = \sum_{i=1}^5 |p_i(\text{imposé}) - p_i(\text{modélisé})|$
- ε étant un réel strictement positif « suffisamment petit »

¹⁹ Plus précisément, nous avons eu recours à la méthode de résolution du **GRC non linéaire** *Generalized Reduced Gradient algorithm*

²⁰ Si on note $\underline{P}(2035)_{\text{modélisé}} = (p_1; p_2; p_{2E}; p_3; p_{3U})$ alors la note IQOA moyenne modélisée est égale à :

$$IQOA_{\text{moyenne}} = 1 \times p_1 + 2 \times p_2 + 3 \times p_{2E} + 4 \times p_3 + 5 \times p_{3U}$$

3.2.5- Limites du modèle

La méthode de modélisation probabiliste basée sur les chaînes de Markov est un outil qui peut être très utile pour avoir une vision sur l'évolution de l'état des ouvrages d'art dans le futur. Toutefois, cette méthode présente des limites liées à la fiabilité des données relatives à la notation IQOA.

Ces limitations proviennent des considérations suivantes :

- La fréquence entre les inspections peuvent varier (d'un ouvrage à un autre, voire parfois pour un même ouvrage), et donc l'hypothèse de considérer un intervalle de temps constant entre deux campagnes IQOA peut être remise en question.
- La note IQOA est attribuée à un ouvrage en se basant uniquement sur l'inspection visuelle de la structure. L'état de l'ouvrage est évalué en respectant des guides techniques détaillés qui explicitent les critères de notation des ouvrages. Cependant, du fait de la subjectivité des agents qui réalisent ces inspections, il se peut que la note IQOA attribuée ne soit pas pertinente vis-à-vis de l'état effectif de l'ouvrage inspecté.
- La matrice de transition d'état est calculée à partir des notes IQOA relative à des ouvrages dont les âges ne dépassent pas 45 ans (peu d'ouvrages classés 3 et 3U). L'utilisation de cette matrice pour prédire l'évolution de l'état des ouvrages d'ici 20 ans peut être remise en question puisque nous ne disposons pas actuellement de données suffisantes pour quantifier les probabilités de passage d'un état IQOA donné aux états dégradés 3 et 3U.
- Il existe des opérations de maintenance que l'on réalise sur les ouvrages d'art sans que celle-ci soient prise en compte dans la notation IQOA. A titre d'exemple, La mise en place d'une étanchéité pour protéger un parement dans le cadre de la maintenance préventive, n'est pas prise en compte dans la notation IQOA. De manière générale, la méthode basée sur l'historique de la note IQOA n'est pas adaptée pour la prise en compte de la maintenance préventive.

IV- Synthèse et conclusion

Un modèle prédictif de détérioration des parements en béton armé

A travers la première partie de ce Travail de Fin d'Etude j'ai pu mettre en place une méthodologie d'approche prédictive permettant de modéliser le vieillissement des parements en béton armé soumis aux sels de déverglaçage. Grâce à ce modèle, les ingénieurs du Pôle OA AREA seront en mesure d'anticiper l'évolution de l'état de corrosion des aciers de ces parements. Cela leur permettra d'intervenir en amont sur les ouvrages d'art à travers des actions de maintenance préventive, réduisant ainsi les risques liés à la détérioration de ces structures. Pour construire cette approche, je me suis basé d'une part sur des données empiriques issues de mesures réalisées sur un certain nombre d'ouvrages, ainsi que sur un modèle mathématique moyennant des hypothèses.

Des outils d'aide à la décision

Dans la seconde partie de cette étude, je me suis intéressé à la mise en place d'outils d'aide à la gestion de la maintenance du parc d'ouvrages d'art AREA. L'objectif de ces outils est double ; d'une part anticiper les besoins de maintenance et quantifier les budgets nécessaires en fonction d'objectifs que l'on peut imposer d'ici 2035 et d'autre part permettre aux ingénieurs d'AREA de communiquer avec la direction de l'entreprise pour lui proposer des scénarios de maintenance ou pour justifier les actions et les coûts de maintenance.

➤ **Un outil basé sur une approche d'analyse par les risques**

Dans cette approche, un ouvrage d'art est assimilé à un système constitué de plusieurs composants. La défaillance de l'un de ces composant pourrait avoir des conséquences sur la disponibilité de l'ouvrage ou/et sur la sécurité des usagers empruntant l'ouvrage considéré. La méthode développée est structurée en trois étapes : la quantification du niveau de risque de défaillance relatif à un composant d'ouvrage, la hiérarchisation des ouvrages vis-à-vis de la criticité du risque considéré et finalement l'affectation des actions de maintenance en respectant des contraintes (notamment en termes de budgets) ou des objectifs imposés (indicateurs d'état cibles). Afin de construire cet outil, je me suis intéressé à un seul type de composant d'ouvrages à savoir les piles et piédroits. Dans cette partie de TFE, je me suis appuyé sur l'expertise du bureau d'étude OXAND dans le domaine de la gestion par les risques.

➤ **Un outil basé sur une méthode probabiliste pour prédire l'évolution de l'état des ouvrages**

Les ouvrages d'art du parc AREA sont inspectés périodiquement. Ces inspections permettent d'attribuer une note IQOA caractérisant l'état global des ouvrages. La base de données OA AREA contient l'historique des notes IQOA de tous les ouvrages AREA depuis 1997. L'objectif de cette partie du TFE a été d'exploiter l'historique de la notation IQOA afin de développer une méthode probabiliste permettant de modéliser la détérioration des ouvrages d'art. La méthode se base sur le concept mathématique des chaînes de Markov pour modéliser l'évolution futur de la notation IQOA des ouvrages en se basant sur l'historique de cette notation. En plus de la notion des chaînes de Markov, j'ai introduit la notion de matrice de maintenance afin de pouvoir prendre en compte l'effet des actions de maintenance sur l'évolution de la note IQOA des ouvrages. L'ensemble de ces éléments a été exploité par la suite pour formuler des scénarios de maintenance, qui se traduisent mathématiquement par des problèmes d'optimisation.

Ouverture

Comme ouverture à ce TFE, il serait intéressant de généraliser l'outil basé sur l'analyse par les risques pour traiter les autres composants d'ouvrages. Pour atteindre cet objectif, il va falloir d'abord développer des modèles de vieillissement pertinents pour chaque composant.

Par ailleurs, dans le cadre du rapprochement²¹ des deux Direction d'Exploitation APRR et AREA, il serait intéressant de déployer les outils développés à l'issue de ce TFE pour prendre en compte l'ensemble des ouvrages d'art des deux réseaux APRR et AREA. En effet, le réseau APRR étant conséquent (1820 Km), la prise en compte des ouvrages d'art APRR permettra certainement d'affiner les outils et les modèles mis au point.

²¹ Il s'agit d'un projet de restructuration (projet intitulé Synergie DEX) visant à rapprocher les directions d'exploitation APRR et AREA. En effet, depuis le 1^{er} septembre 2016, la gestion des infrastructures des deux réseaux est assurée par une seule direction : la Direction Infrastructure, Patrimoine et Péage.

Bibliographie

« *Chloride penetration into concrete, State of Art ; Transport process, corrosion initiation, test methods and prediction models* », L.O Nilsson, E. Poulsen, P. Sandberg, H.E. Sorensen, O. Klinghoffer - HETEK, Road Directorate, 1996

« *IQA, Image de la Qualité des Ouvrages d'Art ; Classification des ouvrages* », SETRA, Mai 1996

« *Etude de la performance des réseaux d'ouvrages d'art et détermination des stratégies de gestion optimales* », André Orcesi - Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Ecole Doctorale Modes, Septembre 2009

« *Statistical inference and hypothesis testing for Markov Chains with interval censoring, Application to bridge condition data in the Netherlands* », Monika Skuriat-Olechnowska - Thèse, Delft University of Technology, 2005

« *Gestion du patrimoine des ouvrages d'art* », Laurent KUSMIEREK, CETE de Lyon – DLL, 2012

« *La concession d'autoroutes, une mission de service public* » ASFA (Association des Sociétés françaises d'autoroutes)

« *Nouvelle approche de la durabilité du béton. Indicateurs et méthodes* », Veronique BAROGHEL-BOUNY, Dr de l'ENPC

Annexes

Annexe 1 : Extrait de diagnostic réalisé sur un ouvrage d'art

Annexe 2 : Observations à propos de l'étude 2013

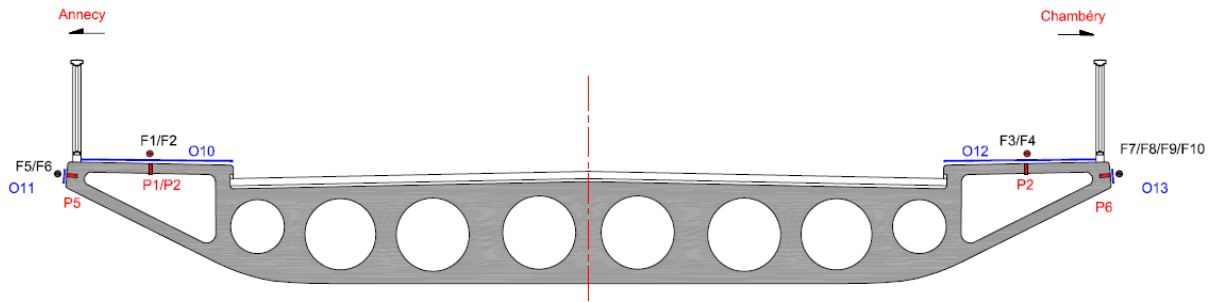
Annexe 3 : Construction d'un modèle de vieillissement des parements en béton soumis aux agressions salines

Annexe 4 : Calcul des gravités liées aux objectifs de disponibilité et de sécurité

Annexe 5 : Justification des hypothèses de Markov et d'homogénéité

Annexe 6 : Exemple de scénarios issus de l'exploitation de l'outil basé sur l'analyse par les risques

Annexe 1 : Extrait de diagnostic réalisé sur un ouvrage d'art



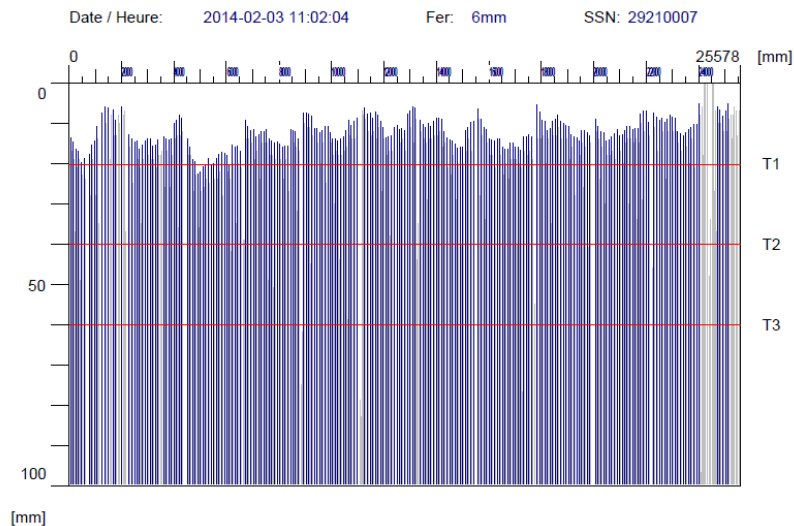
LEGENDE :

- O2 Cartographie des potentiels
- P1 Prélèvement de poudres béton
- F1 Mesures d'enrobage des armatures

Résultats d'analyse chimique d'échantillons de béton prélevés sur l'ouvrage :

PS 3022		Profondeur d'analyse (cm)	P1	P2
Trottoir côté Annecy	PX-1	0-1	<0.01	<0.01
	PX-2	1-2	0.029	0.026
	PX-3	2-4	0.020	0.019
	PX-4	4-6	0.020	0.010
	PX-5	6-9	<0.01	<0.01

Mesure de l'enrobage des aciers :



Statistique Quickscan:

Profondeur minimum: 5 mm		T1: 20 mm
Profondeur maximum: 23 mm	Nb de fers au dessus de T1:	223
Moyenne des fers: 12 mm	Nb de fers au dessus de T2:	40 mm
Ecart-type: 4 mm	Nb de fers au dessus de T3:	226
Coupure: 100 mm	T3:	60 mm
Nb de fers au dessus de la coupure: 226	Nb de fers au dessus de T3:	226

Rappel à propos de la modélisation de la pénétration des chlorures dans le béton :

La modélisation de la pénétration des chlorures dans le béton repose sur la seconde loi de Fick :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

C : concentration en chlorures dans le béton, dépendante de la profondeur *x* et du temps *t*

D : coefficient de diffusion apparent des chlorures en mètre carré par seconde (m²/s)

Le coefficient de diffusion apparent est une grandeur qui rend compte des propriétés intrinsèques du matériau (porosité, état de fissuration et composition chimique du béton).

En se fixant des hypothèses sur les conditions aux limites du système étudié et sur le coefficient de diffusion, on aboutit à la résolution de l'équation précédente. Ces conditions traduisent d'une part l'exposition de l'ouvrage étudié (ou bien la partie d'ouvrage étudiée) à savoir des conditions portant sur la concentration en chlorure au niveau de la surface ou bien sur le flux d'ions chlorures absorbés (quantité de chlorures par unité de temps et de surface) et d'autre part les caractéristiques intrinsèques du matériau béton lui-même tel le coefficient de diffusion apparent.

Hypothèses du modèle développé en 2013 :

Le modèle qui a été mis en place dans le cadre d'un stage au sein d'AREA en 2013 se base sur les hypothèses suivantes :

- Le coefficient de diffusion apparent *D* est indépendant du temps (mais peut varier d'un ouvrage à un autre ou d'une partie d'ouvrage à une autre)
- Les conditions aux limites sont définies en termes de concentration en chlorures au niveau de la surface du parement étudié. Le modèle considère une concentration surfacique en chlorures de forme : $C_s(t) = W \cdot t + C_s$, *W* étant l'apport d'ions chlorure par unité de surface de parement et par unité de temps et *C_s* un terme constant

➤ **Conséquences :**

Le modèle tel qu'il a été conçu se base sur des conditions aux limites exprimées en termes de concentration d'ions chlorure au niveau de la surface exposée du parement en béton. L'hypothèse qui consiste à considérer cette concentration comme fonction affine du temps est très difficile à vérifier expérimentalement. En effet, les premiers centimètres de la surface exposée sont soumis à des cycles de séchage et d'humidification qui entraînent des fluctuations importantes de cette concentration au cours du temps, rendant ainsi difficile la vérification de toute hypothèse portant sur la concentration surfacique en ions chlorure.

Remarques sur la construction du modèle :

a- Construction du modèle :

Le modèle qui a été proposé est une combinaison de deux lois, chacune correspondant à un type d'exposition. En effet, dans le cas d'ouvrages en béton armé soumis aux sels de déverglaçage, les parements sont exposés à des cycles d'humidification/séchage ce qui modifie la teneur en chlorures au niveau de la surface. Afin de prendre en compte ces deux phénomènes, le modèle a été posé sous la forme : $C(x, t) = 0.5C_1(x, t) + 0.5C_2(x', t)$ où :

- $C_1(x, t)$ modélise le profil de teneur en chlorures en zone immergée en permanence : **(1)**
Dans ce cas, la concentration surfacique en ions chlorure est considérée comme constante : *C_s*

$$C(x,t) = C_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \text{avec} \quad X = \frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}$$

C_s : concentration en chlorures à la surface du béton

D : coefficient de diffusion apparent des chlorures (m^2/s)

x : profondeur dans le béton (m)

t : temps (s)

erfc : fonction erreur complémentaire

- $C_2(x', t)$ est une loi censée modéliser le profil de chlorures dans une zone de marnage, d'éclaboussure ou d'embruns. L'expression qui a été adoptée pour modéliser ce type d'exposition a été recueillie d'un rapport²² du CETMEF ; « Altération du béton en site maritime » : **(2)**

$$C(x,t) = 2 \cdot W \cdot \left[\frac{2 \cdot t' \cdot X'}{\sqrt{\pi}} e^{-X'^2} - 2 \cdot t' \cdot X' \cdot \operatorname{erfc}(X') \right] \quad X' = \frac{x'^2}{4 \cdot D \cdot t'}$$

W : paramètre d'exposition définissant la quantité d'ions chlorure accumulée en surface par unité de temps.

$x' = x + 0.01$ (m)

t' : temps (mois)

Dans ce cas, la concentration surfacique en chlorures pour cette dernière a été considérée comme fonction linéaire du temps sous la forme $C_s(t) = W \cdot t$ avec W étant la quantité d'ions chlorures ayant pénétré dans le béton par unité de temps.

b- Analyse de l'équation (2) :

En procédant par une analyse dimensionnelle l'expression **(2)**, il s'avère que celle-ci contient une erreur. En effet, la quantité $C_1'(x, t)$ a pour dimension : $\frac{[M]}{[L]^3}$ et peut donc être exprimée en g/m^3 . Le terme de droite de l'expression a par contre une dimension : $[T] \cdot [M] \cdot [L]^2$.

Afin de me renseigner sur cette formule, j'ai contacté l'un des relecteurs²³ du rapport du CETMEF. Celui-ci m'a mis en contact par la suite avec un thésard qui réalise un travail de recherche à l'IFSTTAR par rapport à la thématique de la modélisation de la diffusion des chlorures dans les matériaux. Après un échange avec le chercheur, celui-ci m'a confirmé la présence d'une erreur dans l'expression **(2)** et m'a fourni la bonne équation²⁴. Celle-ci est donnée ci-dessous :

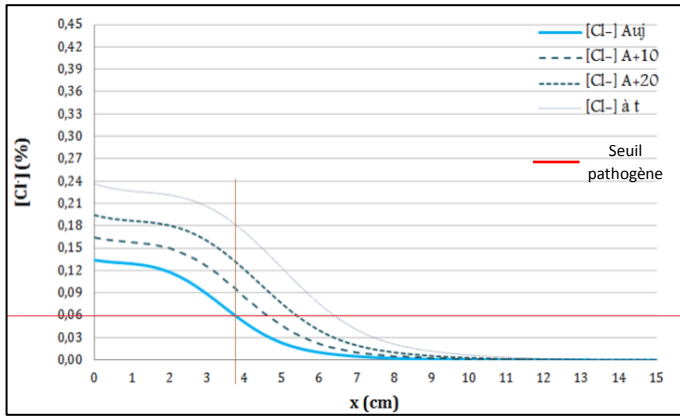
$$C(x, t) = Wt \left[\left(1 + \frac{x^2}{2Dt} \right) \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} - \frac{x}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \left\{ -x^2/4Dt \right\} \right]$$

La prise en compte de cette formule dans les fichiers Excel de l'étude de 2013 a eu un effet très remarquable sur l'allure des profils de chlorures. Les figures suivantes représentent un exemple de profils de chlorures d'un ouvrage d'art, avant et après modification de la formule **(2)** :

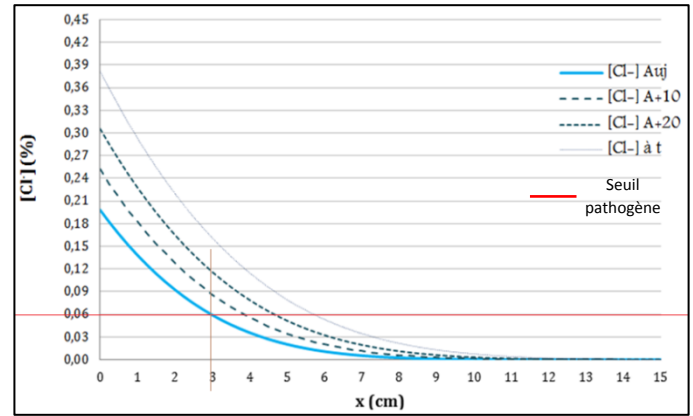
²² *Altération du béton en site maritime*, octobre 2011, CETMEF – page 34

²³ Bruno Godart, Directeur-adjoint du département Matériaux et Structures à l'IFSTTAR

²⁴ Equation tirée de l'ouvrage : « *The Mathematics of Diffusion* », John Crank, 1975, page 33



Allure des profils de chlorures avant correction de la formule (2)



Allure des profils de chlorures après correction de la formule (2)

c- Remarques sur la méthodologie de calage du modèle :

La modélisation de la pénétration des chlorures dans le béton a pour objectif de prévoir l'évolution dans le temps de la teneur en ions chlorure au sein du béton dans le but de pouvoir évaluer le temps d'initiation de la corrosion des armatures et donc d'anticiper les désordres qui peuvent survenir dans le béton.

Afin d'adapter le modèle à chaque type de parement d'ouvrage, le stagiaire s'est basée sur deux paramètres de calibrage : le flux massique de chlorures W et le coefficient de diffusion apparent D . Les données expérimentales exploitées pour calibrer le modèle sont les résultats de diagnostics qui correspondent aux mesures de la teneur en chlorures dans le béton à différentes profondeurs.

Le principe est de chercher W et le D de manière à ce que le modèle permette d'avoir un profil de chlorures à la date du diagnostic s'approchant le plus possible du profil expérimental obtenu par diagnostique (carottage ou poudre). Ces deux paramètres sont déterminés en procédant par une itération de tâtonnements : on fait varier « manuellement » ces deux paramètres jusqu'à ce que la courbe de concentration théorique s'approche le maximum possible de la courbe de concentration empirique (c'est-à-dire la courbe issue des dosages de la concentration des ions chlorure à différentes profondeurs de l'échantillon prélevé sur ouvrage).

Cette démarche présente deux inconvénients :

- La procédure par tâtonnement peut nécessiter un temps très important
- Le choix fait sur W et D peut ne pas être le choix optimal, c'est-à-dire celui qui mène au minimum d'écart entre les données du diagnostic et la modélisation

Annexe 3 : Construction d'un modèle de vieillissement des parements en béton soumis aux agressions salines :

Comme nous l'avons explicité en annexe 2, le modèle de pénétration d'ions chlorures développé en 2013 pour AREA se base sur une hypothèse portant sur la concentration en ion chlorure au niveau de la surface exposée d'un parement. Du fait de la fluctuation de cette concentration dans le temps sous l'action de cycles de séchage et d'humidification de la surface exposée, il est très difficile de vérifier cette hypothèse en se basant sur des données expérimentales.

Par ailleurs, le raisonnement basé sur la concentration d'une espèce chimique n'est pas évident, puisque par définition la concentration est le rapport entre une quantité de matière et un volume. En effet, sachant que le volume peut varier dans le temps (suite à l'évaporation d'une partie de l'eau interstitielle présente dans les pores du béton), cela peut mener à une augmentation ou une diminution de la concentration de l'espèce chimique étudiée, indépendamment du phénomène de diffusion sur lequel se base les modèles de pénétration des ions chlorure.

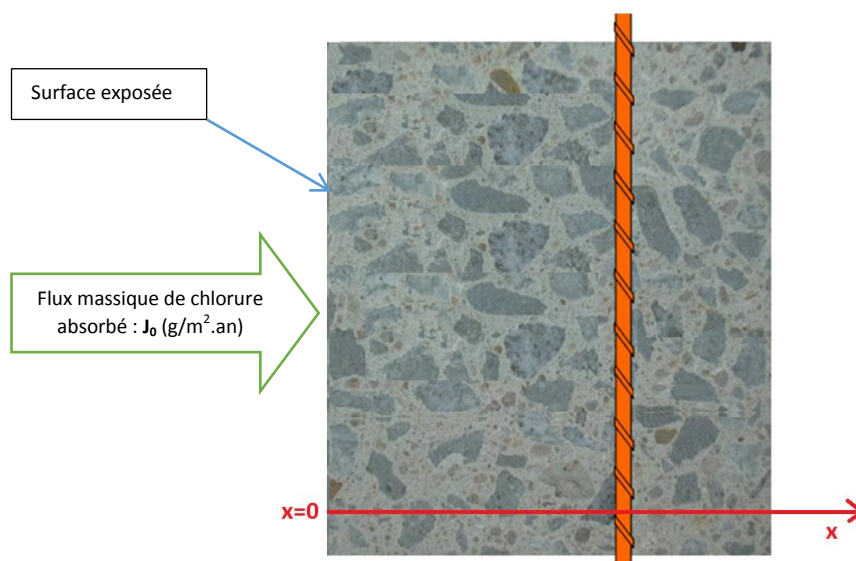
Ces considérations nous ont poussées à chercher une autre approche pour modéliser le phénomène de pénétration des ions chlorure dans le béton.

1- Elaboration du modèle :

Au lieu de raisonner en termes de concentration surfacique en ions chlorure, nous avons choisi de raisonner en termes de quantité de sel absorbée par unité de temps et de surface d'un parement exposé. L'avantage de cette approche c'est qu'elle nous évitera les difficultés citées précédemment.

○ Hypothèses du modèle :

- Modèle basé sur la loi de diffusion de Fick
- Au-delà d'une certaine profondeur (de l'ordre de quelques millimètres), le béton est saturé et le transport des ions chlorures se fait par diffusion
- Le coefficient de diffusion des ions chlorure dans le béton est constant dans le temps
- La quantité de sel **absorbée** par unité de temps et unité de surface du parement exposé est constante dans le temps
- La concentration des ions chlorure dans le béton est négligeable au moment de la construction du parement



Nous allons considérer les définitions et notations suivantes :

- $\underline{J} = J \cdot \underline{e}_x$: Le flux massique d'ions chlorure absorbé un parement exposé ; si Δm est la masse d'ions chlorure absorbée par une surface S durant un temps Δt , alors : $J = \frac{\Delta m}{S \cdot \Delta t}$
 - $c(x, t)$: est la concentration d'ions chlorures dans le béton à une profondeur x de la surface exposée et l'instant t
 - D : Coefficient de diffusion des ions chlorure dans le béton qui est un paramètre intrinsèque du matériau
- Construction du modèle :

La loi de Fick s'exprime de la manière suivante : $\underline{J}(x, t) = -D \cdot \underline{grad}(c(x, t))$

Cette équation est équivalente à : $\underline{J}(x, t) = -D \cdot \frac{\partial c(x, t)}{\partial x}$ (1)

La loi de conservation de la matière permet d'écrire : $\frac{\partial c(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial J(x, t)}{\partial x}$ (2)

En combinant les deux équations (1) et (2) nous obtenons : $\frac{\partial c(x, t)}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c(x, t)}{\partial x^2}$ (3)

La condition initiale s'exprime comme suit : $c(x, 0) = 0$ (C1)

Les conditions aux limites ($x=0$) sont exprimées de la manière suivante :

$$x = 0 \quad : \quad -D \cdot \left. \frac{\partial c(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = J_0 = cte \quad (C2)$$

$$x = +\infty \quad : \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} c(x, t) = 0 \quad (C3)$$

Nous utilisons par la suite la Transformation de Laplace pour résoudre l'équation différentielle (3) en respectant les conditions (C1), (C2) et (C3)

En appliquant la Transformée de Laplace²⁵ à la variable t (le temps) dans l'équation (3) on obtient :

$$p \cdot C(x, p) - c(x, 0) = D \cdot \frac{d^2 C(x, p)}{d^2 x}$$

La condition (C1) permet d'écrire :

$$p \cdot C(x, p) = D \cdot \frac{d^2 C(x, p)}{d^2 x}$$

Cette équation est équivalente à :

$$\frac{d^2 C(x, p)}{d^2 x} - \frac{p}{D} C(x, p) = 0 \quad (4)$$

Si on considère que le paramètre p est un réel positif alors, la solution générale l'équation (4) est de la forme :

$$C(x, p) = k_1 \exp\left(-x \sqrt{\frac{p}{D}}\right) + k_2 \exp\left(+x \sqrt{\frac{p}{D}}\right) \quad (5)$$

Avec k_1 et k_2 des constantes d'intégration.

En appliquant la transformée de Laplace à la condition aux limites (C3), nous obtenons :

²⁵ La transformée de Laplace de la fonction $(x, t) \rightarrow c(x, t)$ est définie par : $C(x, p) = L\{c\} = \int_0^{+\infty} e^{-pt} c(x, t) dt$, p étant une variable complexe.

Parmi les propriétés de la transformée de Laplace, nous avons : $L\left\{\frac{\partial c(x, t)}{\partial t}\right\} = L\{c(x, t)\} - c(x, 0)$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} C(x, p) = 0$$

La seule possibilité pour que cette équation soit vérifiée est d'avoir $k_2 = 0$

Ainsi l'équation (5) se simplifie en :

$$C(x, p) = k_1 \exp\left(-x \sqrt{\frac{p}{D}}\right) \quad (6)$$

Pour déterminer la constante k_1 , nous exploitons la condition aux limites (C2) : en appliquant la transformée de Laplace à cette condition, nous obtenons :

$$D \cdot \frac{\partial C(x, p)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{J_0}{p}$$

En dérivant l'équation (6), on obtient :

$$\frac{\partial C(x, p)}{\partial x} \Big|_{x=0} = k_1 \sqrt{\frac{p}{D}} \exp\left(-x \sqrt{\frac{p}{D}}\right) \Big|_{x=0} = -k_1 \sqrt{\frac{p}{D}}$$

Ainsi :

$$k_1 = \frac{J_0}{s^{3/2} \sqrt{D}}$$

En remplaçant l'expression de k_1 dans l'équation (6), on obtient :

$$C(x, p) = \frac{J_0}{s^{3/2} \sqrt{D}} \exp\left(-x \sqrt{\frac{p}{D}}\right) \quad (7)$$

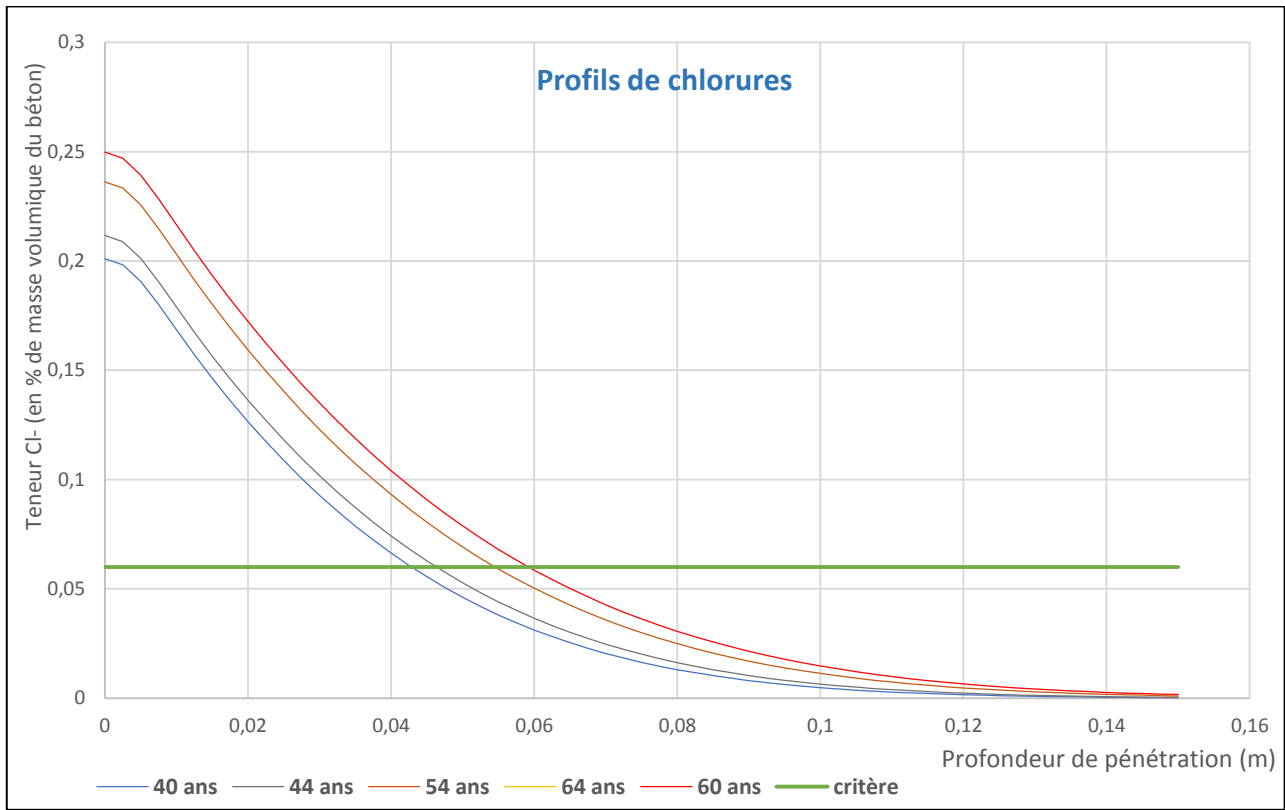
Finalement en appliquant la transformée inverse à l'équation (7), nous aboutissant à l'expression recherchée de la concentration en fonction du temps t et de la profondeur x :

$$c(x, t) = 2 \cdot J_0 \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi \cdot D}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}\right) - \frac{J_0}{D} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) \quad (8)^{26}$$

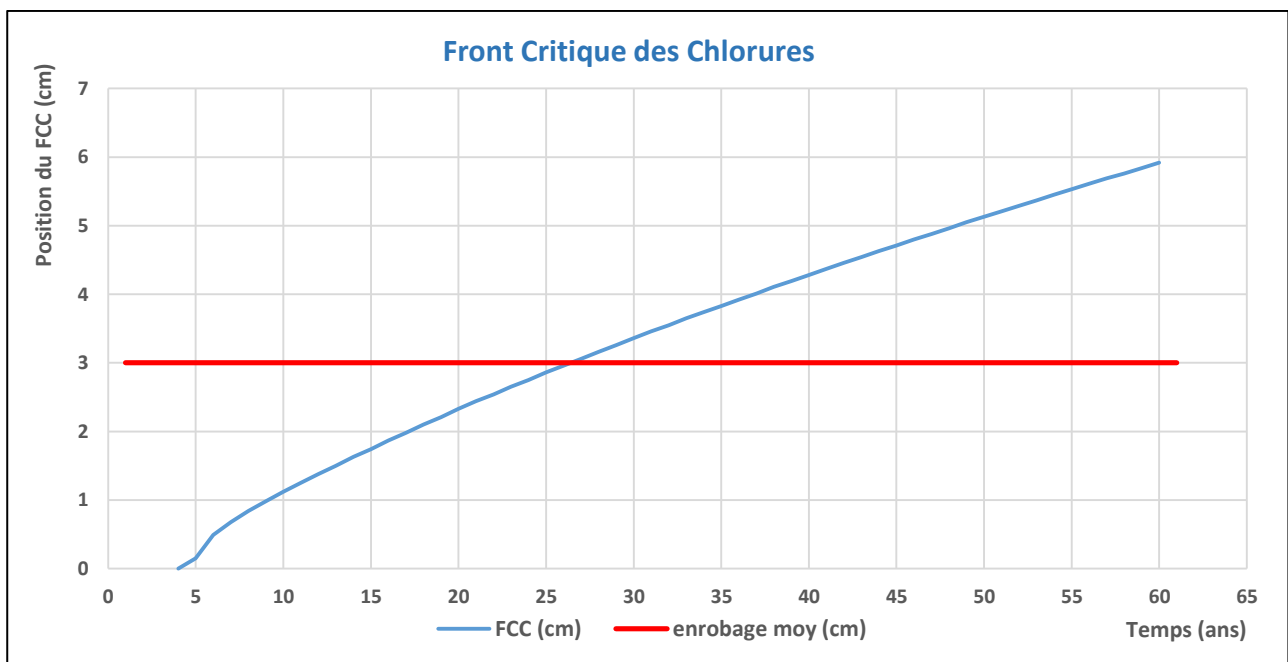
²⁶ La fonction *erfc* est définie implicitement par : $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2} dt$

Le modèle (8) nous permet de visualiser deux types de courbes :

- Les Profils de Chlorures : il s'agit de courbes qui donnent à des instants différents, la concentration des ions chlorure en fonction de la profondeur à partir de la surface exposée du parement. La concentration est exprimée en pourcentage de la masse volumique du béton :



- Le Front Critique des Chlorures (FCC) : c'est une courbe qui donne en fonction du temps l'évolution de la profondeur au niveau de laquelle la concentration en ions chlorure est égale à un seuil considéré comme pathogène²⁷, c'est-à-dire au-delà duquel la corrosion est susceptible de s'initier :



²⁷ La dépassivation des aciers d'armatures s'amorce lorsque les ions chlorures atteignent une concentration critique au niveau du premier lit d'armatures, après avoir traversé le béton d'enrobage. Cette concentration est fixée par l'expérience au taux de 0,4% de chlorures par rapport à la masse de ciment dans $1m^2$ de béton, soit à 0,06 % de la masse volumique du béton ($0,4 \times \frac{350}{2400} \approx 0,06$)

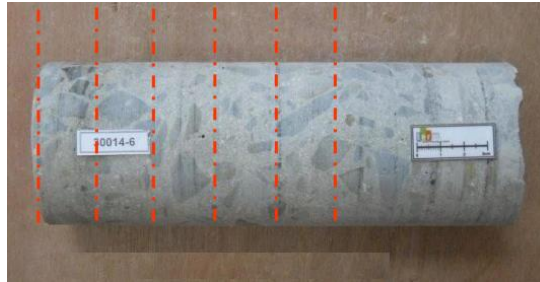
2- Démarche adoptée pour caler le modèle : détermination des paramètres J_0 et D

Pour les parements d'ouvrages pour lesquels on dispose de diagnostics chimiques, la détermination des deux paramètres du modèle se base sur les concentrations empiriques des chlorures mesurées à des profondeurs différentes sur des échantillons prélevés sur l'ouvrage (carottes, poudre de béton).

La démarche adoptée permettant de caler le modèle théorique aux données empiriques est illustrée à travers l'exemple suivant :

- Détermination empirique de la position du FCC : profondeur au niveau de laquelle $[Cl^-] = 0,06$:

Nous exploitons les résultats d'analyse chimique d'échantillons de béton. L'exemple ci-dessous représente les résultats de dosage de la concentration d'ion chlorure sur 3 carottes prélevées sur une corniche d'un ouvrage d'art :



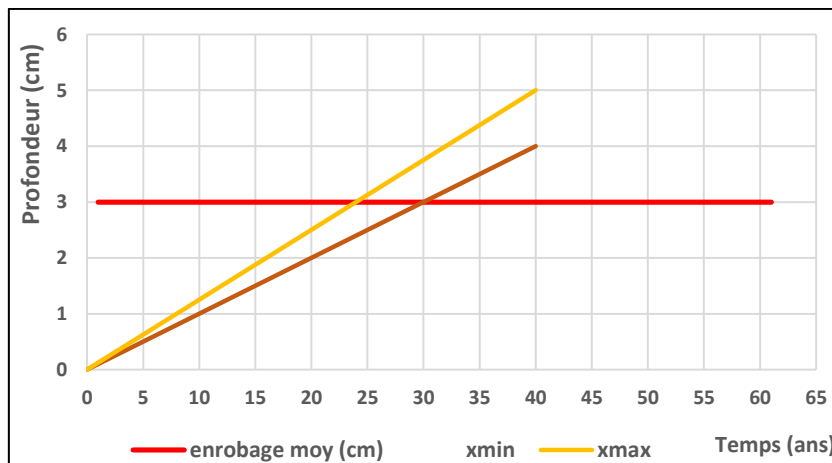
A partir des données des résultats du diagnostic, nous calculons la concentration moyenne des chlorures :

PI 353		Profondeur d'analyse (cm)	C1	C2	C3	$[Cl^-]_{moy}$
TRAVEE C0-P1 CORNIC HE	PX-1	0-3	0.058	0.062	0.082	0.067
	PX-2	3-6	0.032	0.037	0.041	0.036
	PX-3	6-9	0.011	0.021	0.019	0.017

Ensuite nous déterminons la position approximative du FCC à travers le tableau suivant :

Découpage du prélèvement	Valeur moyenne $[Cl^-]$ en % ⁵	Position FCC
Tranches de 2 cm	$0 \leq [Cl^-]_{moy} < 0.035$	Dans le 1 ^{er} centimètre de la tranche étudiée
	$0.035 \leq [Cl^-]_{moy} < 0.065$	Entre le 1 ^{er} et le 2 ^{ème} centimètre de la tranche étudiée
Tranches de 3 cm	$0 \leq [Cl^-]_{moy} < 0.02$	Dans le 1 ^{er} centimètre de la tranche étudiée
	$0.02 \leq [Cl^-]_{moy} < 0.04$	Entre le 1 ^{er} et le 2 ^{ème} centimètre de la tranche étudiée
	$0.04 \leq [Cl^-]_{moy} < 0.065$	Entre le 2 ^{ème} et le 3 ^{ème} centimètre de la tranche étudiée
Tranches de 2cm (respectivement de 3 cm)	$[Cl^-]_{moy} \geq 0.065$	Au-delà du 2 ^{ème} centimètre (respectivement du 3 ^{ème} centimètre)

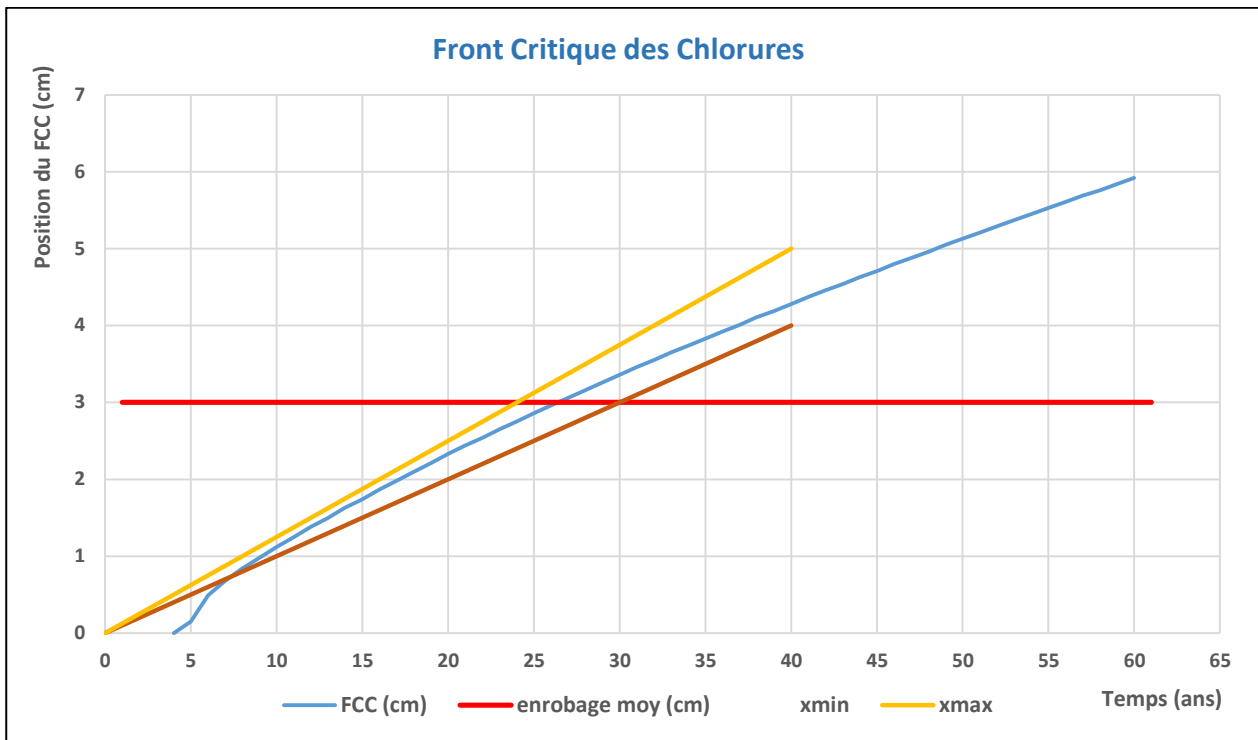
Nous déterminons ainsi le fuseau suivant :



- Calage automatique du modèle :

Afin de d'ajuster le modèle aux résultats empiriques précédents, nous procédons par itérations en faisant varier les deux paramètres J_0 et D dans des intervalles prédéfinis, jusqu'à ce que la courbe du FCC

Cet ajustement est effectué automatiquement à travers une macro développée sous VBA Excel.



Annexe 4 : Calcul des gravités liées aux objectifs de disponibilité et de sécurité

Le calcul des gravités des risques liés aux objectifs de disponibilité et de sécurité repose sur des matrices qui ont été établies en s'appuyant sur le retour d'expérience des ingénieurs ouvrages d'art AREA et sur l'expertise du bureau d'étude OXAND.

Quantification de la gravité-sécurité :

Cette gravité permet de mesurer les conséquences en cas de défaillance d'un composant d'ouvrage sur les utilisateurs de l'autoroute et du réseau secondaire porté ou franchi par l'ouvrage.

Pour un composant d'ouvrage donné, la gravité-sécurité peut prendre une valeur de **1** (gravité négligeable) à **6** (gravité très forte). Cette valeur est fonction de deux paramètres : le trafic et la distance du composant à la voie. Le trafic (en nombre de véhicules/jour/sens) et la distances à la voie (en mètre) sont exprimés sous forme de classes :

Classes de distance à la voie	
1	> 3 m
2	1,5 m - 3 m
3	1 m - 1,5 m
4	< 1 m

Classes de trafic	
1	0
2	3000
3	6000
4	12000
5	25000
6	30000

En croisant la classe de trafic avec la classe de distance à la voie, nous obtenons la note associée à la gravité-sécurité, à travers la matrice suivante :

		Classes de trafic					
		1	2	3	4	5	6
Classes de distance à la voie	1	1	1	2	2	3	3
	2	1	2	3	3	4	5
	3	2	3	4	4	5	6
	4	3	4	4	5	6	6

Quantification de la gravité-disponibilité :

Cette gravité permet de mesurer les conséquences en cas de défaillance d'un composant d'ouvrage sur la disponibilité de l'ouvrage et donc sur la disponibilité de l'autoroute et/ou de la voie du réseau secondaire portée ou franchie.

La quantification de cette gravité se base d'une part sur le trafic et d'autre part sur un indice qui prend en compte à la fois la durée d'indisponibilité et le niveau de gêne occasionné par les opérations de maintenance (visant à réinstaurer le niveau de disponibilité normal de l'ouvrage).

Cette gravité est calculée en utilisant la formule suivante, ramenée à une note de 1 à 6 :

$$G_d = PEX_{Aut} \times CEX_{Aut} \times pond_{Aut} + PEX_{2nd} \times CEX_{2nd} \times pond_{2nd}$$

IT_{Aut} et IT_{2nd} sont des coefficients qui prennent en compte l'impact du trafic sur les pertes de recette liées à l'exploitation à la fois de l'autoroute et du réseau secondaire : plus le trafic est fort plus ce coefficient est important.

CEX_{Aut} et CEX_{2nd} sont des coefficients qui rendent compte des conditions d'exploitation respectivement de l'autoroute et du réseau secondaire. Ces coefficients caractérisent le niveau d'indisponibilité de l'ouvrage durant les opérations de maintenance visant à remettre en état le composant défaillant de l'ouvrage. Ces coefficients dépendent de deux paramètres ; la durée de la gêne (aux utilisateurs des réseaux) occasionnée par les opérations de maintenance et le niveau de la gêne occasionnée (gêne mineure, réduction de capacité de l'ouvrage, coupure)

$pond_{Aut}$ et $pond_{2nd}$ des coefficients de pondération permettant au gestionnaire (AREA) de donner plus ou moins d'importance à l'autoroute et au réseau secondaire.

Annexe 5 : Justification des hypothèses de Markov et d'homogénéité

Test de l'homogénéité :

Il s'agit ici de vérifier si les données relatives à la notation IQOA dont on dispose vérifient l'hypothèse d'homogénéité ; c'est-à-dire que la matrice de transition d'état ne dépend pas du temps.

Dans la suite nous allons prendre en compte tous les ouvrages (toutes familles confondues) et nous assimilerons la matrice de transition d'état telle qu'elle est définie en pages 47 et 48, à la matrice de dégradation pure telle qu'elle est définie en page 49 : $\underline{Q}(t) = \underline{Q}_D(t) = \{p(X_{t+\Delta t} = i | X_t = j)\}_{1 \leq i, j \leq 5}$ (en d'autres termes, on ne considère que les termes de détérioration, c'est-à-dire les termes de la diagonales et ceux au-dessus de la diagonale)

Pour vérifier si cette matrice dépend ou pas du temps, nous allons la calculer pour des intervalles de temps différents :

- 1997 – 2002 : en ne prend en compte que des notes IQOA issues des inspections détaillées réalisées entre 1997 et 2002 pour construire la matrice de transition d'état : \underline{Q}_1
- 2002 – 2009 : en ne prend en compte que des notes IQOA issues des inspections détaillées réalisées entre 2002 et 2009 pour construire la matrice de transition d'état : \underline{Q}_2
- 2009 – 2015 : en ne prend en compte que des notes IQOA issues des inspections détaillées réalisées entre 2009 et 2015 pour construire la matrice de transition d'état : \underline{Q}_3

On calcule aussi la matrice de transition d'état sur toute la période 1997 – 2015 : \underline{Q}_3

Ensuite on compare ces différentes matrices :

- Le calcul des différentes matrices (en utilisant la définition de la page 48) donne :

$$\underline{Q}_1 = \begin{pmatrix} 0,596 & 0,383 & 0,021 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,931 & 0,068 & 0,001 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,930 & 0,200 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,800 & 0,200 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{pmatrix}$$

$$\underline{Q}_2 = \begin{pmatrix} 0,524 & 0,439 & 0,038 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,893 & 0,085 & 0,022 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,915 & 0,035 & 0,050 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,912 & 0,088 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{pmatrix}$$

$$\underline{Q}_3 = \begin{pmatrix} 0,621 & 0,321 & 0,058 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,901 & 0,078 & 0,021 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,891 & 0,051 & 0,058 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,921 & 0,079 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{pmatrix}$$

$$\underline{Q} = \begin{pmatrix} 0,563 & 0,416 & 0,016 & 0,005 & 0,000 \\ 0,000 & 0,886 & 0,105 & 0,009 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,947 & 0,040 & 0,013 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,938 & 0,063 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{pmatrix}$$

En comparant ces quatre matrices, nous nous apercevons que les termes $p_{i,j}$ pour chaque couple (i,j) ne sont pas significativement différents d'une matrice à une autre. De ce fait, nous pouvons ainsi admettre l'hypothèse de l'homogénéité de la matrice de transition.

Il est à noter que l'hypothèse d'homogénéité est à vérifier suivant la famille d'ouvrage si l'on veut mener une approche de modélisation par les chaînes de Markov.

Test de l'hypothèse de Markov :

Il s'agit ici de tester si les données relatives à la notation IQOA dont on dispose vérifient l'hypothèse suivante :

« L'état futur d'un ouvrage ne dépend que de son état présent, indépendamment de son état passé »

On considère ici que l'hypothèse d'homogénéité est vérifiée ; don on peut utiliser toutes les données IQOA (de 1997 à 2015) pour calculer les différentes fréquences que nous allons définir par la suite.

Pour vérifier cette hypothèse, nous nous sommes basés sur l'analyse des fréquences des séquences de transition entre état (STE).

Pour une séquence qui regroupe trois résultats d'inspection (état future, état présent, état passé)=(m,j,i), on calcule :

- Le nombre de fois d'occurrence de la séquence (m,j,i) : $Nbr(m, j, i)$
- Le nombre de fois d'occurrence de la séquence (j,i) : $Nbr(j, i)$
- La fréquence d'occurrence de la séquence (m, j, i) : $P(m, j, i) = \frac{Nbr(m, j, i)}{Nbr(j, i)}$

Pour un couple fixé (m, j) , c'est-à-dire pour un état présent et un état futur fixés, cette fréquence est calculée pour plusieurs valeurs de i , c'est-à-dire pour plusieurs états passés. Ensuite ces fréquences (pour un couple (m,j) fixé et pour des valeurs de i différentes) sont comparées entre elles.

L'exploitation de l'ensemble des données relatives à la notation IQOA nous a permis de constituer le tableau de la page suivante :

Etat présent : j	Etat futur : m		Etat passé : i				
			1	2	2E	3	3U
1	1	nbr séq (j,i)	347	29	5	0	0
		nbr séq (m,j,i)	120	11	2	0	0
		Rapport	0,346	0,379	0,4	²⁸	-
1	2	nbr séq (j,i)	347	29	5	0	0
		nbr séq (m,j,i)	79	6	1	0	0
		Rapport	0,228	0,207	0,2	-	-
1	2E	nbr séq (j,i)	347	29	5	0	0
		nbr séq (m,j,i)	3	0	0	0	0
		Rapport	0,009	0	0	-	-
1	3	nbr séq (j,i)	347	29	5	0	0
		nbr séq (m,j,i)	0	0	0	0	0
		Rapport	0	0	0	-	-
1	3U	nbr séq (j,i)	347	29	5	0	0
		nbr séq (m,j,i)	0	0	0	0	0
		Rapport	0	0	0	-	-
2	1	nbr séq (j,i)	256	661	29	6	0
		nbr séq (m,j,i)	11	26	0	0	0
		Rapport	0,043	0,039	0	0	-
2	2	nbr séq (j,i)	256	661	29	6	0
		nbr séq (m,j,i)	171	385	18	4	0
		Rapport	0,668	0,582	0,621	0,667	-
2	2E	nbr séq (j,i)	256	661	29	6	0
		nbr séq (m,j,i)	19	40	2	0	0
		Rapport	0,074	0,061	0,069	0	-
2	3	nbr séq (j,i)	256	661	29	6	0
		nbr séq (m,j,i)	0	3	0	0	0
		Rapport	0	0,005	0	0	-
2	3U	nbr séq (j,i)	256	661	29	6	0
		nbr séq (m,j,i)	0	0	0	0	0
		Rapport	0	0	0	0	-
2E	1	nbr séq (j,i)	10	82	39	3	0
		nbr séq (m,j,i)	0	1	0	0	0
		Rapport	0	0,012	0	0	-
2E	2	nbr séq (j,i)	10	82	39	3	0
		nbr séq (m,j,i)	1	10	5	0	0
		Rapport	0,1	0,122	0,128	0	-
2E	2E	nbr séq (j,i)	10	82	39	3	0
		nbr séq (m,j,i)	3	19	11	3	0
		Rapport	0,3	0,232	0,282	1	-

²⁸ Le tiret « - » signifie que la séquence (j,i) correspondante ne figure pas dans l'historique de la notation IQOA des ouvrages étudiés.

		Etat passé : i					
Etat présent : j	Etat futur : m		1	2	2E	3	3U
2E	3	nbr séq (j,i)	10	82	39	3	0
		nbr séq (m,j,i)	1	8	4	0	0
		Rapport	0,1	0,098	0,103	0	-
2E	3U	nbr séq (j,i)	10	82	39	3	0
		nbr séq (m,j,i)	0	1	0	0	0
		Rapport	0	0,012	0	0	-
3	1	nbr séq (j,i)	3	7	3	6	1
		nbr séq (m,j,i)	0	0	0	0	0
		Rapport	0	0	0	0	0
3	2	nbr séq (j,i)	3	7	3	6	1
		nbr séq (m,j,i)	1	2	1	0	0
		Rapport	0,333	0,286	0,333	0	0
3	2E	nbr séq (j,i)	3	7	3	6	1
		nbr séq (m,j,i)	0	1	0	0	0
		Rapport	0	0,143	0	0	0
3	3	nbr séq (j,i)	3	7	3	6	1
		nbr séq (m,j,i)	1	2	0	1	0
		Rapport	0,333	0,286	0	0,167	0
3	3U	nbr séq (j,i)	3	7	3	6	1
		nbr séq (m,j,i)	0	1	0	0	0
		Rapport	0	0,143	0	0	0
3U	1	nbr séq (j,i)	0	0	1	1	0
		nbr séq (m,j,i)	0	0	0	0	0
		Rapport	-	-	0	0	-
3U	2	nbr séq (j,i)	0	0	1	1	0
		nbr séq (m,j,i)	0	0	0	0	0
		Rapport	-	-	0	0	-
3U	2E	nbr séq (j,i)	0	0	1	1	0
		nbr séq (m,j,i)	0	0	0	0	0
		Rapport	-	-	0	0	-
3U	3	nbr séq (j,i)	0	0	1	1	0
		nbr séq (m,j,i)	0	0	0	0	0
		Rapport	-	-	0	0	-
3U	3U	nbr séq (j,i)	0	0	1	1	0
		nbr séq (m,j,i)	0	0	0	0	0
		Rapport	-	-	0	0	-

L'observation de ce tableau montre que pour un couple d'état (*futur, présent*) = (m,j), les fréquences relatives à des états passés différents ne pas significativement différentes les unes des autres.

Nous pouvons donc admettre, lorsque tous les ouvrages sont pris en compte, que l'hypothèse de Markov est vérifiée. Cependant, si l'on souhaite raisonner par familles d'ouvrages, il faut mener préalablement des analyses statistiques similaires à celle que l'on vient de présenter avant de pouvoir utiliser les chaînes de Markov pour modéliser l'évolution de l'état des ouvrages de la famille considérée.

[Annexe 6 : Exemple de scénarios issus de l'exploitation de l'outil basé sur l'analyse par les risques](#)

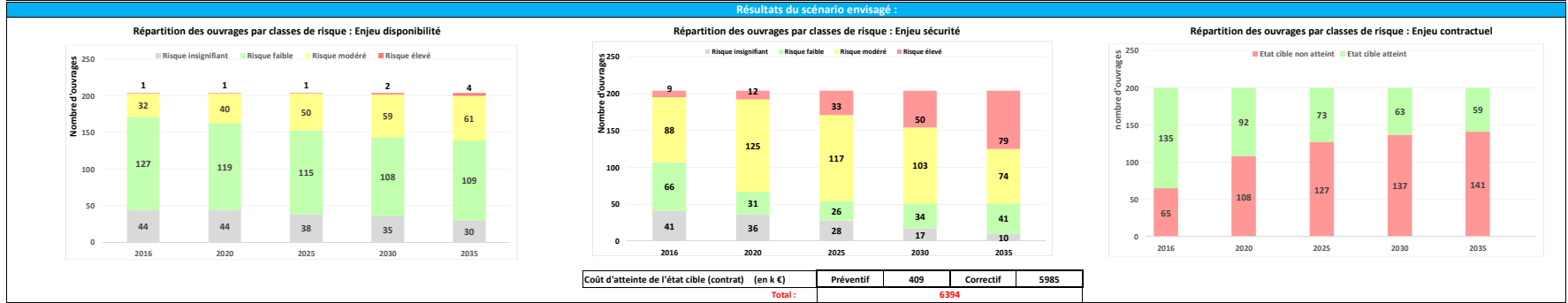
Scénario : Aucune opération de maintenance d'ici 2035

DEL OUV TAB : ouvrage courant à tablier PS : passage supérieur DP : dalle précontrainte Famille d'ouvrages : OUV TAB Nature des ouvrages : PS Type de tablier : DP	OUV S1 : ouvrage sol-structure sous chaussée P1 : passage inférieur P2 : dalle éléga PIPO : portique ouvert OH /OTH : ouvrage hydraulique PICF : cadre fermé PSVP /P1 : caisson précontraint	OUV S2 : ouvrage sol-structure enterré GT : galerie technique OA : Viaduc TC : tranchée couverte PSIOM : ouvrage à ossature métallique	BUSE : BUSE
---	--	--	-------------

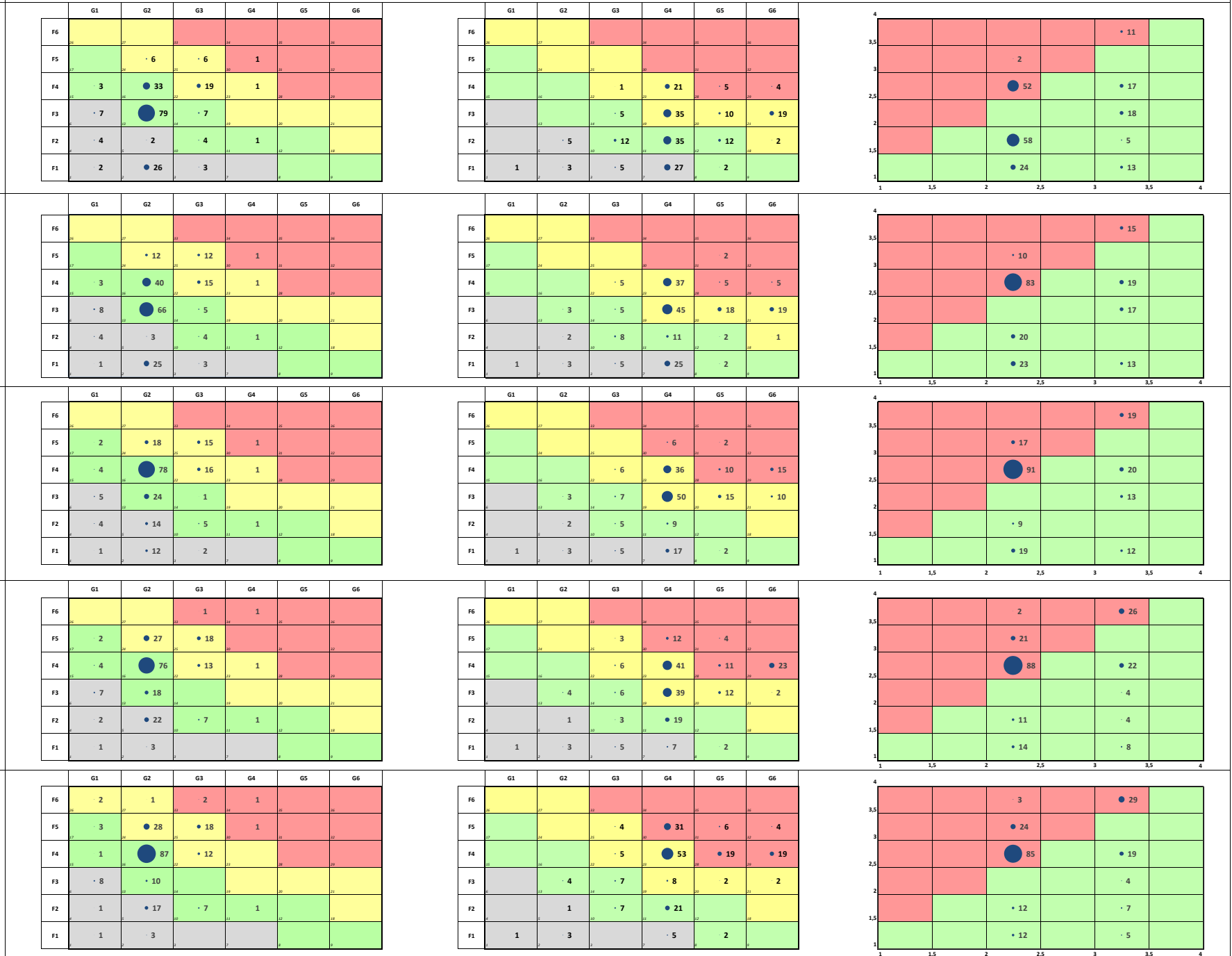
Budget par composant (en k €):

	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035
Préventif	0	0	0	0
Correctif	0	0	0	0

<p>ENJEU CIBLE - DISPONIBILITÉ (Hiérarchisation des ouvrages par rapport à la criticité du risque lié à la disponibilité)</p> <p>Affecter le budget automatiquement <input type="checkbox"/></p> <p>Imposer un nombre max d'ouvrages à traiter <input type="checkbox"/></p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>2016</td> <td>2020</td> <td>2025</td> <td>2030</td> <td>2035</td> </tr> <tr> <td>Risque élevé</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Risque modéré</td> <td>32</td> <td>40</td> <td>50</td> <td>59</td> <td>61</td> </tr> <tr> <td>Risque faible</td> <td>127</td> <td>119</td> <td>115</td> <td>108</td> <td>109</td> </tr> <tr> <td>Risque insignifiant</td> <td>44</td> <td>44</td> <td>38</td> <td>35</td> <td>30</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>2016-2020</td> <td>2020-2025</td> <td>2025-2030</td> <td>2030-2035</td> </tr> <tr> <td>Budget disponible</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table> <p>B. disponible - B. nécessaire : 0</p> <p>Répartition des budgets</p>		2016	2020	2025	2030	2035	Risque élevé	1	1	1	2	4	Risque modéré	32	40	50	59	61	Risque faible	127	119	115	108	109	Risque insignifiant	44	44	38	35	30		2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	Budget disponible	0	0	0	0	Budget nécessaire	0	0	0	0	<p>ENJEU CIBLE - SÉCURITÉ (Hiérarchisation des ouvrages par rapport à la criticité du risque lié à la sécurité)</p> <p>Affecter le budget automatiquement <input type="checkbox"/></p> <p>Imposer un nombre max d'ouvrages à traiter <input type="checkbox"/></p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>2016</td> <td>2020</td> <td>2025</td> <td>2030</td> <td>2035</td> </tr> <tr> <td>Risque élevé</td> <td>9</td> <td>12</td> <td>33</td> <td>50</td> <td>79</td> </tr> <tr> <td>Risque modéré</td> <td>88</td> <td>125</td> <td>117</td> <td>103</td> <td>74</td> </tr> <tr> <td>Risque faible</td> <td>66</td> <td>31</td> <td>26</td> <td>34</td> <td>41</td> </tr> <tr> <td>Risque insignifiant</td> <td>41</td> <td>36</td> <td>28</td> <td>17</td> <td>10</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>2016-2020</td> <td>2020-2025</td> <td>2025-2030</td> <td>2030-2035</td> </tr> <tr> <td>Budget disponible</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table> <p>B. disponible - B. nécessaire : 0</p> <p>Répartition des budgets</p>		2016	2020	2025	2030	2035	Risque élevé	9	12	33	50	79	Risque modéré	88	125	117	103	74	Risque faible	66	31	26	34	41	Risque insignifiant	41	36	28	17	10		2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	Budget disponible	0	0	0	0	Budget nécessaire	0	0	0	0	<p>ENJEU CIBLE - CONTRAT (Hiérarchisation des ouvrages par rapport à l'indicateur d'état)</p> <p>Affecter le budget automatiquement <input type="checkbox"/></p> <p>Imposer un nombre max d'ouvrages à traiter <input type="checkbox"/></p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>2016-2020</td> <td>2020-2025</td> <td>2025-2030</td> <td>2030-2035</td> </tr> <tr> <td>nombre max d'ouvrages à traiter</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </table> <p>Définition de la cible :</p> <p>Pour les PS de type P1, DP et Autres : on impose un indice cible en 2035 égal à 2 Pour les ouvrages de type P2 : on impose un indice cible en 2035 égal à 3</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>2016-2020</td> <td>2020-2025</td> <td>2025-2030</td> <td>2030-2035</td> </tr> <tr> <td>Budget disponible</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table> <p>B. disponible - B. nécessaire : 0</p> <p>Répartition des budgets</p>		2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	nombre max d'ouvrages à traiter	-	-	-	-		2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	Budget disponible	0	0	0	0	Budget nécessaire	0	0	0	0
	2016	2020	2025	2030	2035																																																																																																																
Risque élevé	1	1	1	2	4																																																																																																																
Risque modéré	32	40	50	59	61																																																																																																																
Risque faible	127	119	115	108	109																																																																																																																
Risque insignifiant	44	44	38	35	30																																																																																																																
	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035																																																																																																																	
Budget disponible	0	0	0	0																																																																																																																	
Budget nécessaire	0	0	0	0																																																																																																																	
	2016	2020	2025	2030	2035																																																																																																																
Risque élevé	9	12	33	50	79																																																																																																																
Risque modéré	88	125	117	103	74																																																																																																																
Risque faible	66	31	26	34	41																																																																																																																
Risque insignifiant	41	36	28	17	10																																																																																																																
	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035																																																																																																																	
Budget disponible	0	0	0	0																																																																																																																	
Budget nécessaire	0	0	0	0																																																																																																																	
	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035																																																																																																																	
nombre max d'ouvrages à traiter	-	-	-	-																																																																																																																	
	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035																																																																																																																	
Budget disponible	0	0	0	0																																																																																																																	
Budget nécessaire	0	0	0	0																																																																																																																	



Cartographies



<p>CRITICITÉ DU RISQUE :</p> <ul style="list-style-type: none"> Risque insignifiant Risque faible Risque modéré Risque élevé 	<p>FREQUENCE DU RISQUE : Aléa (exposition) x Vulnérabilité du composant</p> <p>F1 : Fréquence de défaillance faible F2 : F3 : F4 : F5 : F6 : Fréquence de défaillance élevée</p>	<p>GRAVITÉ : Conséquences potentielles en cas de défaillance du composant</p> <p>G1 : conséquences mineures G2 : conséquences faibles G3 : conséquences significatives G4 : conséquences sévères G5 : conséquences critiques G6 : conséquences très critiques</p>	<p>Nombre d'ouvrages hors cible</p> <p>Nombre d'ouvrages respectant la cible</p> <p>Indicateur d'état modélisé</p> <p>Indicateur d'état cible</p>
---	--	---	---

Scénario : budgets imposés par périodes + hiérarchisation des ouvrages vis-à-vis du risque lié à l'enjeu de disponibilité

<p>DEL</p> <p>OUV TAB : ouvrage courant à tablier OUV S1 : ouvrage sol-structure sous chaussée OUV S2 : ouvrage sol-structure enterré BUSE : BUSE PS : passage supérieur P1 : passage inférieur OH /OTH : ouvrage hydraulique GT : galerie technique OA : Viaduc TC : tranchée couverte DP : dalle précontrainte P2 : dalle éléage PPO : portique ouvert PICF : cadre fermé PSVP /P1 : caisson précontraint PSJOM : ouvrage à ossature métallique</p> <p>Périème : OUV TAB Familles d'ouvrages : PS Nature des ouvrages : PS Type de tablier : DP P1 P2 Autres</p>	<p>Budget par composant (en k €) :</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>2016-2020</td> <td>2020-2025</td> <td>2025-2030</td> <td>2030-2035</td> </tr> <tr> <td>Préventif</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> </tr> <tr> <td>Correctif</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> </tr> </table>		2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	Préventif	800	800	800	800	Correctif	1100	1100	1100	1100
	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035												
Préventif	800	800	800	800												
Correctif	1100	1100	1100	1100												

<p align="center">ENJEU CIBLE - DISPONIBILITÉ (Hiérarchisation des ouvrages par rapport à la criticité du risque lié à la disponibilité)</p> <p>Affecter le budget automatiquement <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> Imposer un nombre max d'ouvrages à traiter <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/></p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>2016</td> <td>2020</td> <td>2025</td> <td>2030</td> <td>2035</td> </tr> <tr> <td>Risque élevé</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Risque modéré</td> <td>32</td> <td>18</td> <td>0</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Risque faible</td> <td>127</td> <td>82</td> <td>40</td> <td>46</td> <td>22</td> </tr> <tr> <td>Risque insignifiant</td> <td>44</td> <td>104</td> <td>164</td> <td>156</td> <td>179</td> </tr> </table> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>2016-2020</td> <td>2020-2025</td> <td>2025-2030</td> <td>2030-2035</td> </tr> <tr> <td>Budget disponible</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire - B. disponible</td> <td>300</td> <td>300</td> <td>300</td> <td>300</td> </tr> </table> <p>B. disponible - B. nécessaire 168 34 104 459</p> <p align="center">Répartition des budgets</p>		2016	2020	2025	2030	2035	Risque élevé	1	0	0	0	0	Risque modéré	32	18	0	2	3	Risque faible	127	82	40	46	22	Risque insignifiant	44	104	164	156	179		2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	Budget disponible	800	800	800	800	Budget nécessaire	1100	1100	1100	1100	Budget nécessaire - B. disponible	300	300	300	300	<p align="center">ENJEU CIBLE - SÉCURITÉ (Hiérarchisation des ouvrages par rapport à la criticité du risque lié à la sécurité)</p> <p>Affecter le budget automatiquement <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> Imposer un nombre max d'ouvrages à traiter <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/></p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>2016</td> <td>2020</td> <td>2025</td> <td>2030</td> <td>2035</td> </tr> <tr> <td>Risque élevé</td> <td>9</td> <td>12</td> <td>33</td> <td>50</td> <td>79</td> </tr> <tr> <td>Risque modéré</td> <td>88</td> <td>125</td> <td>117</td> <td>103</td> <td>74</td> </tr> <tr> <td>Risque faible</td> <td>66</td> <td>31</td> <td>26</td> <td>34</td> <td>41</td> </tr> <tr> <td>Risque insignifiant</td> <td>41</td> <td>36</td> <td>28</td> <td>17</td> <td>10</td> </tr> </table> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>2016-2020</td> <td>2020-2025</td> <td>2025-2030</td> <td>2030-2035</td> </tr> <tr> <td>Budget disponible</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire - B. disponible</td> <td>300</td> <td>300</td> <td>300</td> <td>300</td> </tr> </table> <p>B. disponible - B. nécessaire 1900 1900 1900 1900</p> <p align="center">Répartition des budgets</p>		2016	2020	2025	2030	2035	Risque élevé	9	12	33	50	79	Risque modéré	88	125	117	103	74	Risque faible	66	31	26	34	41	Risque insignifiant	41	36	28	17	10		2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	Budget disponible	800	800	800	800	Budget nécessaire	1100	1100	1100	1100	Budget nécessaire - B. disponible	300	300	300	300	<p align="center">ENJEU CIBLE - CONTRAT (Hiérarchisation des ouvrages par rapport à l'indicateur d'état)</p> <p>Affecter le budget automatiquement <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> Imposer un nombre max d'ouvrages à traiter <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/></p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>2016-2020</td> <td>2020-2025</td> <td>2025-2030</td> <td>2030-2035</td> </tr> <tr> <td>Budget disponible</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire - B. disponible</td> <td>300</td> <td>300</td> <td>300</td> <td>300</td> </tr> </table> <p>B. disponible - B. nécessaire 1900 1900 1900 1900</p> <p align="center">Répartition des budgets</p> <p align="center">Définition de la cible :</p> <p>Pour les PS de type P1, DP et Autres : on impose un indice cible en 2035 égal à 2 Pour les ouvrages de type P2 : on impose un indice cible en 2035 égal à 3</p>		2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	Budget disponible	800	800	800	800	Budget nécessaire	1100	1100	1100	1100	Budget nécessaire - B. disponible	300	300	300	300
	2016	2020	2025	2030	2035																																																																																																																					
Risque élevé	1	0	0	0	0																																																																																																																					
Risque modéré	32	18	0	2	3																																																																																																																					
Risque faible	127	82	40	46	22																																																																																																																					
Risque insignifiant	44	104	164	156	179																																																																																																																					
	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035																																																																																																																						
Budget disponible	800	800	800	800																																																																																																																						
Budget nécessaire	1100	1100	1100	1100																																																																																																																						
Budget nécessaire - B. disponible	300	300	300	300																																																																																																																						
	2016	2020	2025	2030	2035																																																																																																																					
Risque élevé	9	12	33	50	79																																																																																																																					
Risque modéré	88	125	117	103	74																																																																																																																					
Risque faible	66	31	26	34	41																																																																																																																					
Risque insignifiant	41	36	28	17	10																																																																																																																					
	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035																																																																																																																						
Budget disponible	800	800	800	800																																																																																																																						
Budget nécessaire	1100	1100	1100	1100																																																																																																																						
Budget nécessaire - B. disponible	300	300	300	300																																																																																																																						
	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035																																																																																																																						
Budget disponible	800	800	800	800																																																																																																																						
Budget nécessaire	1100	1100	1100	1100																																																																																																																						
Budget nécessaire - B. disponible	300	300	300	300																																																																																																																						

Résultats du scénario envisagé :

<p align="center">Répartition des ouvrages par classes de risque : Enjeu disponibilité</p>	<p align="center">Répartition des ouvrages par classes de risque : Enjeu sécurité</p>	<p align="center">Répartition des ouvrages par classes de risque : Enjeu contractuel</p>
--	---	--

Coût d'atteinte de l'état cible (contrat) (en k €) Préventif 98 Correctif 56 Total : 154

Cartographies

	Cartographie des risques : ENJEU DISPONIBILITÉ	Cartographie des risques : ENJEU SÉCURITÉ	ENJEU CONTRACTUEL :
2016			
2020			
2025			
2030			
2035			

<p>CRITICITÉ DU RISQUE :</p> <p>Risque insignifiant (gris) Risque faible (jaune) Risque modéré (orange) Risque élevé (rouge)</p>	<p>FREQUENCE DU RISQUE : A la (exposition) x Vulnérabilité du composant</p> <p>F1 : Fréquence de défaillance faible F2 : Fréquence de défaillance moyenne F3 : Fréquence de défaillance élevée F4 : Fréquence de défaillance très élevée F5 : Fréquence de défaillance critique F6 : Fréquence de défaillance très critique</p>	<p>GRAVITÉ : Conséquences potentielles en cas de défaillance du composant</p> <p>G1 : conséquences mineures G2 : conséquences faibles G3 : conséquences significatives G4 : conséquences sévères G5 : conséquences critiques G6 : conséquences très critiques</p>	<p>Indicateur d'état modélisé :</p> <p>Indicateur d'état modélisé (axe vertical) Indicateur d'état cible (axe horizontal)</p>
--	--	--	---

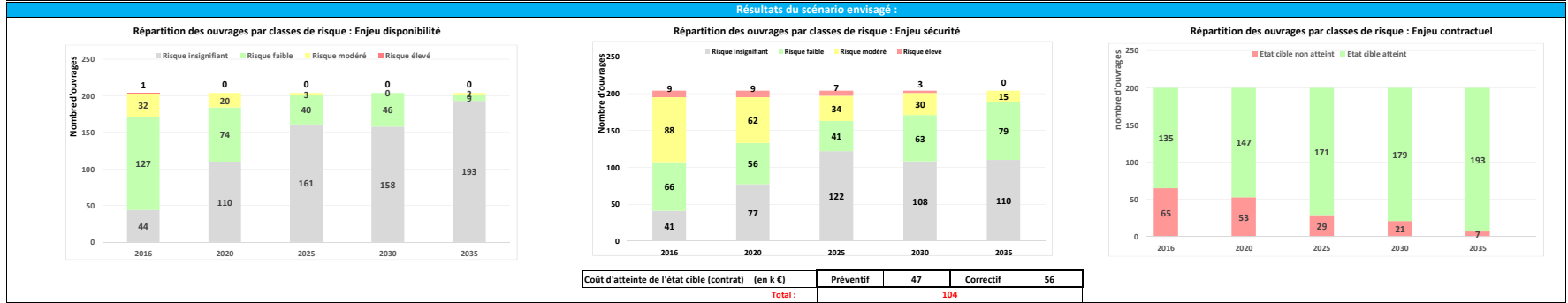
Scénario : budgets imposés par périodes + hiérarchisation des ouvrages vis-à-vis du risque lié à l'enjeu de sécurité

DEL OUV TAB : ouvrage courant à tablier PS : passage supérieur DP : dalle précontrainte Famille d'ouvrages : OUV TAB Nature des ouvrages : PS Type de tablier : DP	OUV S11 : ouvrage sol-structure sous chaussée P1 : passage inférieur P2 : dalle éléage PIPO : portique ouvert OH /OTH : ouvrage hydraulique P1C : cadre fermé PSVP /P1 : caisson précontraint	OUV S12 : ouvrage sol-structure enterré GT : galerie technique OA : Viaduc PSVP /P1 : caisson précontraint	BUSE : BUSE TC : tranchée couverte PSJOM : ouvrage à ossature métallique
---	---	---	--

Budget par composant (en k €):

	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035
Préventif	800	800	800	800
Correctif	1100	1100	1100	1100

<p>ENJEU CIBLE - DISPONIBILITÉ (Hiérarchisation des ouvrages par rapport à la criticité du risque lié à la disponibilité)</p> <p>Affecter le budget automatiquement <input type="checkbox"/> Imposer un nombre max d'ouvrages à traiter <input type="checkbox"/></p> <table border="1"> <tr><th>Risque élevé</th><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><th>Risque modéré</th><td>32</td><td>40</td><td>50</td><td>59</td><td>61</td></tr> <tr><th>Risque faible</th><td>127</td><td>119</td><td>115</td><td>108</td><td>109</td></tr> <tr><th>Risque insignifiant</th><td>44</td><td>44</td><td>38</td><td>35</td><td>30</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>Budget disponible</th><td>Préventif</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td></tr> <tr><th>Budget nécessaire</th><td>Préventif</td><td>1100</td><td>1100</td><td>1100</td><td>1100</td></tr> </table> <p>B. disponible - B. nécessaire: 1900 1900 1900 1900</p> <p>Répartition des budgets</p>	Risque élevé	1	1	1	2	4	Risque modéré	32	40	50	59	61	Risque faible	127	119	115	108	109	Risque insignifiant	44	44	38	35	30	Budget disponible	Préventif	800	800	800	800	Budget nécessaire	Préventif	1100	1100	1100	1100	<p>ENJEU CIBLE - SÉCURITÉ (Hiérarchisation des ouvrages par rapport à la criticité du risque lié à la sécurité)</p> <p>Affecter le budget automatiquement <input checked="" type="checkbox"/> Imposer un nombre max d'ouvrages à traiter <input type="checkbox"/></p> <table border="1"> <tr><th>Risque élevé</th><td>9</td><td>9</td><td>7</td><td>3</td><td>0</td></tr> <tr><th>Risque modéré</th><td>88</td><td>62</td><td>34</td><td>30</td><td>15</td></tr> <tr><th>Risque faible</th><td>66</td><td>56</td><td>41</td><td>63</td><td>79</td></tr> <tr><th>Risque insignifiant</th><td>41</td><td>77</td><td>122</td><td>108</td><td>110</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>Budget disponible</th><td>Préventif</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td></tr> <tr><th>Budget nécessaire</th><td>Préventif</td><td>764</td><td>734</td><td>729</td><td>793</td></tr> <tr><th>Budget nécessaire</th><td>Correctif</td><td>1036</td><td>1083</td><td>1067</td><td>822</td></tr> </table> <p>B. disponible - B. nécessaire: 99 83 104 285</p> <p>Répartition des budgets</p>	Risque élevé	9	9	7	3	0	Risque modéré	88	62	34	30	15	Risque faible	66	56	41	63	79	Risque insignifiant	41	77	122	108	110	Budget disponible	Préventif	800	800	800	800	Budget nécessaire	Préventif	764	734	729	793	Budget nécessaire	Correctif	1036	1083	1067	822	<p>ENJEU CIBLE - CONTRAT (Hiérarchisation des ouvrages par rapport à l'indicateur d'état)</p> <p>Affecter le budget automatiquement <input type="checkbox"/> Imposer un nombre max d'ouvrages à traiter <input type="checkbox"/></p> <table border="1"> <tr><th>Budget disponible</th><td>Préventif</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td></tr> <tr><th>Budget nécessaire</th><td>Préventif</td><td>1100</td><td>1100</td><td>1100</td><td>1100</td></tr> </table> <p>B. disponible - B. nécessaire: 1900 1900 1900 1900</p> <p>Répartition des budgets</p> <p>Définition de la cible : Pour les PS de type P1, DP et Autres : on impose un indice cible en 2035 égal à 2 Pour les ouvrages de type P2 : on impose un indice cible en 2035 égal à 3</p>	Budget disponible	Préventif	800	800	800	800	Budget nécessaire	Préventif	1100	1100	1100	1100
Risque élevé	1	1	1	2	4																																																																																							
Risque modéré	32	40	50	59	61																																																																																							
Risque faible	127	119	115	108	109																																																																																							
Risque insignifiant	44	44	38	35	30																																																																																							
Budget disponible	Préventif	800	800	800	800																																																																																							
Budget nécessaire	Préventif	1100	1100	1100	1100																																																																																							
Risque élevé	9	9	7	3	0																																																																																							
Risque modéré	88	62	34	30	15																																																																																							
Risque faible	66	56	41	63	79																																																																																							
Risque insignifiant	41	77	122	108	110																																																																																							
Budget disponible	Préventif	800	800	800	800																																																																																							
Budget nécessaire	Préventif	764	734	729	793																																																																																							
Budget nécessaire	Correctif	1036	1083	1067	822																																																																																							
Budget disponible	Préventif	800	800	800	800																																																																																							
Budget nécessaire	Préventif	1100	1100	1100	1100																																																																																							



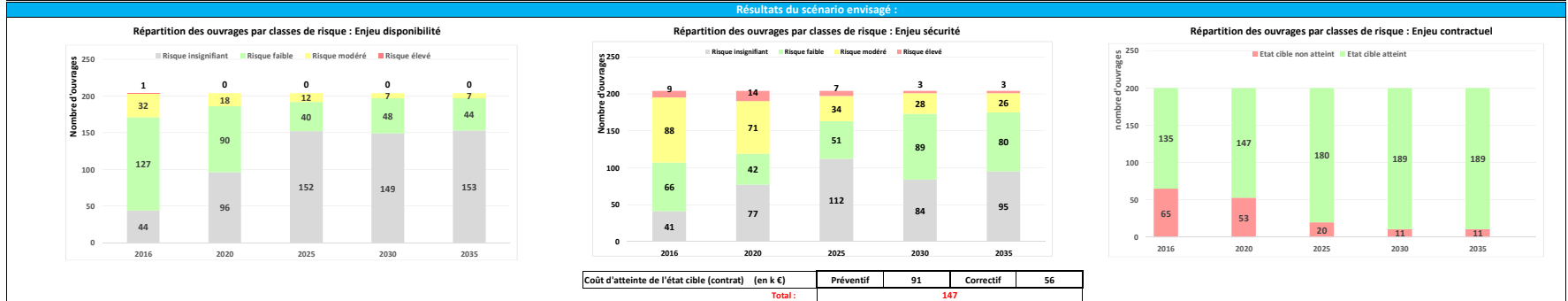
Cartographies

	Cartographie des risques : ENJEU DISPONIBILITÉ						Cartographie des risques : ENJEU SÉCURITÉ						ENJEU CONTRACTUEL :											
Années	2016																							
	2020																							
	2025																							
	2030																							
	2035																							
	<p>CRITICITÉ DU RISQUE:</p> <ul style="list-style-type: none"> Risque insignifiant Risque faible Risque modéré Risque élevé 						<p>FREQUENCE DU RISQUE : $A_{i,j} (exposition) \times V_{i,j} (vulnérabilité du composant)$</p> <p>F1 : Fréquence de défaillance faible F2 : F3 : F4 : F5 : F6 : Fréquence de défaillance élevée</p>						<p>GRAVITÉ :</p> <p>Conséquences potentielles en cas de défaillance du composant</p> <p>G1 : conséquences mineures G2 : conséquences faibles G3 : conséquences significatives G4 : conséquences sévères G5 : conséquences critiques G6 : conséquences très critiques</p>						<p>Indicateur d'état modélisé</p> <p>Indicateur d'état cible</p>					

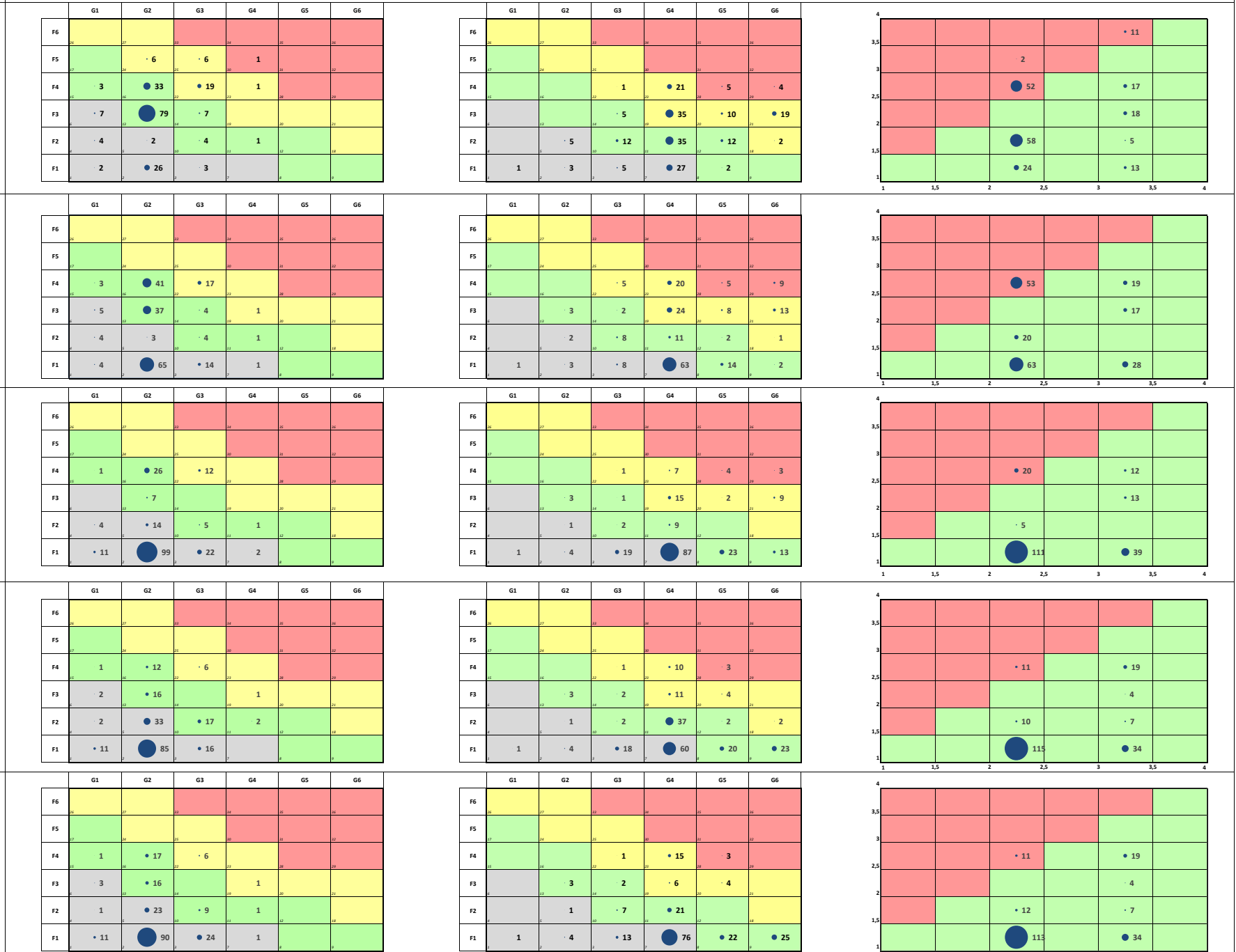
Scénario : budgets imposés par périodes + hiérarchisation des ouvrages vis-à-vis du risque lié à l'enjeu contractuel

DEL OUV TAB : ouvrage courant à tablier PS : passage supérieur DP : dalle précontrainte OUV S1 : ouvrage sol-structure sous chaussée P1 : passage inférieur PIPO : portique ouvert OH /OTH : ouvrage hydraulique PICF : cadre fermé OUV S2 : ouvrage sol-structure enterré GT : galerie technique PSVP /P1 : caisson précontraint OA : Viaduc TC : tranchée couverte BUSSE : BUSSE PSOM : ouvrage à ossature métallique	Budget par composant (en k €) : <table border="1"> <tr> <td></td> <td>2016-2020</td> <td>2020-2025</td> <td>2025-2030</td> <td>2030-2035</td> </tr> <tr> <td>Préventif</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> </tr> <tr> <td>Correctif</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> </tr> </table>		2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	Préventif	800	800	800	800	Correctif	1100	1100	1100	1100
	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035												
Préventif	800	800	800	800												
Correctif	1100	1100	1100	1100												

ENJEU CIBLE - DISPONIBILITÉ (Hiérarchisation des ouvrages par rapport à la criticité du risque lié à la disponibilité) Affecter le budget automatiquement <input type="checkbox"/> Imposer un nombre max d'ouvrages à traiter <input type="checkbox"/> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>2016</td> <td>2020</td> <td>2025</td> <td>2030</td> <td>2035</td> </tr> <tr> <td>Risque élevé</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Risque modéré</td> <td>32</td> <td>40</td> <td>50</td> <td>59</td> <td>61</td> </tr> <tr> <td>Risque faible</td> <td>127</td> <td>119</td> <td>115</td> <td>108</td> <td>109</td> </tr> <tr> <td>Risque insignifiant</td> <td>44</td> <td>44</td> <td>38</td> <td>35</td> <td>30</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>2016-2020</td> <td>2020-2025</td> <td>2025-2030</td> <td>2030-2035</td> </tr> <tr> <td>Budget disponible</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> </tr> </table>		2016	2020	2025	2030	2035	Risque élevé	1	1	1	2	4	Risque modéré	32	40	50	59	61	Risque faible	127	119	115	108	109	Risque insignifiant	44	44	38	35	30		2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	Budget disponible	800	800	800	800	Budget nécessaire	1100	1100	1100	1100	ENJEU CIBLE - SÉCURITÉ (Hiérarchisation des ouvrages par rapport à la criticité du risque lié à la sécurité) Affecter le budget automatiquement <input type="checkbox"/> Imposer un nombre max d'ouvrages à traiter <input type="checkbox"/> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>2016</td> <td>2020</td> <td>2025</td> <td>2030</td> <td>2035</td> </tr> <tr> <td>Risque élevé</td> <td>9</td> <td>12</td> <td>33</td> <td>50</td> <td>79</td> </tr> <tr> <td>Risque modéré</td> <td>88</td> <td>125</td> <td>117</td> <td>103</td> <td>74</td> </tr> <tr> <td>Risque faible</td> <td>66</td> <td>31</td> <td>26</td> <td>34</td> <td>41</td> </tr> <tr> <td>Risque insignifiant</td> <td>41</td> <td>36</td> <td>28</td> <td>17</td> <td>10</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>2016-2020</td> <td>2020-2025</td> <td>2025-2030</td> <td>2030-2035</td> </tr> <tr> <td>Budget disponible</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> </tr> </table>		2016	2020	2025	2030	2035	Risque élevé	9	12	33	50	79	Risque modéré	88	125	117	103	74	Risque faible	66	31	26	34	41	Risque insignifiant	41	36	28	17	10		2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	Budget disponible	800	800	800	800	Budget nécessaire	1100	1100	1100	1100	ENJEU CIBLE - CONTRAT (Hiérarchisation des ouvrages par rapport à l'indicateur d'état) Affecter le budget automatiquement <input checked="" type="checkbox"/> Imposer un nombre max d'ouvrages à traiter <input type="checkbox"/> nombre max d'ouvrages à traiter : 2016-2020: -, 2020-2025: -, 2025-2030: -, 2030-2035: - Définition de la cible : Pour les PS de type P1, DP et Autres : on impose un indice cible en 2035 égal à 2 Pour les ouvrages de type P2 : on impose un indice cible en 2035 égal à 3 <table border="1"> <tr> <td></td> <td>2016-2020</td> <td>2020-2025</td> <td>2025-2030</td> <td>2030-2035</td> </tr> <tr> <td>Budget disponible</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> <td>800</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> <td>1100</td> </tr> <tr> <td>Budget disponible Préventif</td> <td>728</td> <td>452</td> <td>785</td> <td>772</td> </tr> <tr> <td>Budget nécessaire Correctif</td> <td>1030</td> <td>1060</td> <td>872</td> <td>0</td> </tr> </table>		2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	Budget disponible	800	800	800	800	Budget nécessaire	1100	1100	1100	1100	Budget disponible Préventif	728	452	785	772	Budget nécessaire Correctif	1030	1060	872	0
	2016	2020	2025	2030	2035																																																																																																																
Risque élevé	1	1	1	2	4																																																																																																																
Risque modéré	32	40	50	59	61																																																																																																																
Risque faible	127	119	115	108	109																																																																																																																
Risque insignifiant	44	44	38	35	30																																																																																																																
	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035																																																																																																																	
Budget disponible	800	800	800	800																																																																																																																	
Budget nécessaire	1100	1100	1100	1100																																																																																																																	
	2016	2020	2025	2030	2035																																																																																																																
Risque élevé	9	12	33	50	79																																																																																																																
Risque modéré	88	125	117	103	74																																																																																																																
Risque faible	66	31	26	34	41																																																																																																																
Risque insignifiant	41	36	28	17	10																																																																																																																
	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035																																																																																																																	
Budget disponible	800	800	800	800																																																																																																																	
Budget nécessaire	1100	1100	1100	1100																																																																																																																	
	2016-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035																																																																																																																	
Budget disponible	800	800	800	800																																																																																																																	
Budget nécessaire	1100	1100	1100	1100																																																																																																																	
Budget disponible Préventif	728	452	785	772																																																																																																																	
Budget nécessaire Correctif	1030	1060	872	0																																																																																																																	



Cartographies



CRITICITÉ DU RISQUE : Risque insignifiant Risque faible Risque modéré Risque élevé	FREQUENCE DU RISQUE : A la (exposition) x Vulnérabilité du composant F1 : Fréquence de défaillance faible F2 F3 F4 F5 F6 : Fréquence de défaillance élevée	GRAVITÉ : Conséquences potentielles en cas de défaillance du composant G1 : conséquences mineures G2 : conséquences faibles G3 : conséquences significatives G4 : conséquences sévères G5 : conséquences critiques G6 : conséquences très critiques	Nombre d'ouvrages hors cible Nombre d'ouvrages respectant la cible Indicateur d'état modélisé Indicateur d'état cible
---	--	---	--