



FONDATION D'ENTREPRISE

FEREC

Méthodologie d'analyse de la résilience des infrastructures au changement climatique MARI-CC

Fondation d'entreprise FEREC

Appel à projets 2019 : Résilience et acceptation : quels outils pour les infrastructures ?



Auteurs :

LOUIS JANODET / DOMINIQUE ALLAGNAT
EGIS GEOTECHNIQUE

Projet de recherche MARI-CC

Méthodologie d'analyse de la résilience des infrastructures au changement climatique

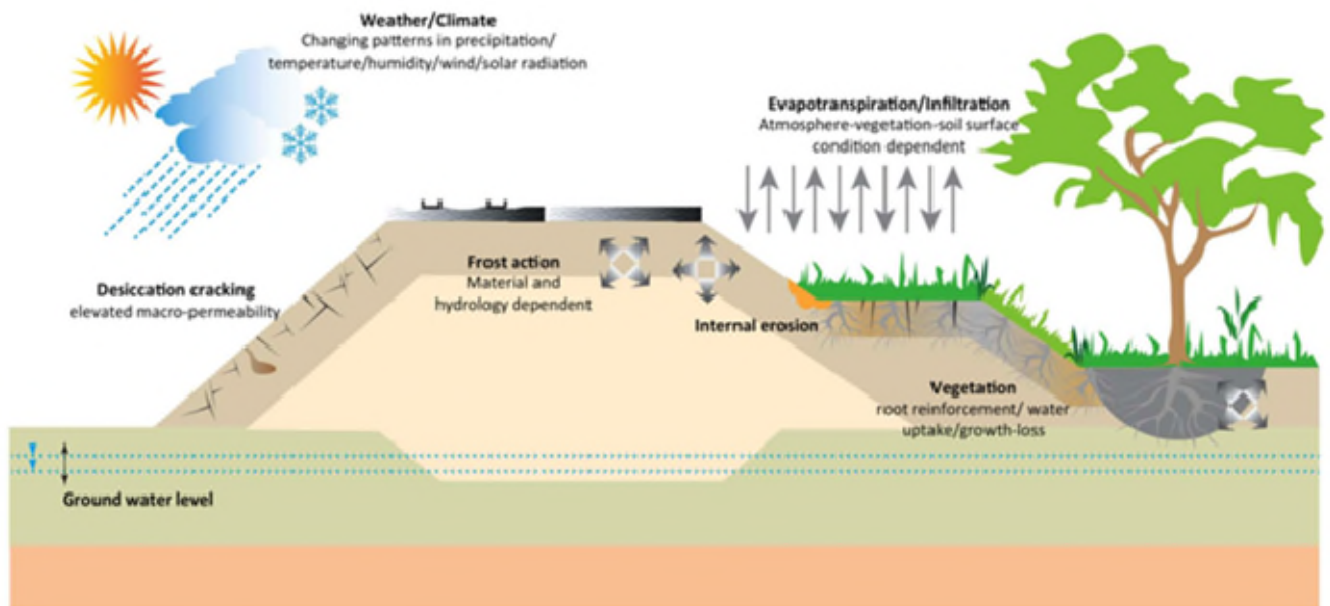


Figure 1 : Schematic view of the soil-vegetation-atmosphere interactions – Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology – Volume 51, Issue 2, May 2018

Rapport de projet

Rapport :

N° 0002/2020

Etabli le :	05/11/20	Lja/DAI/JLD
Révisé le :	-	Version : 01
N° chrono :	GEO011-0002/2020	NB de pages : 35



Egis Géotechnique

Ingénierie du sol & des matériaux



Contrôle qualité

Indice	Date	Modifications / Commentaires	Nom/ Visa Rédacteur	Nom/ Visa Vérificateur	Nom/ Visa Approbateur
1	05/11/20		Louis Janodet	Dominique Allagnat	Jean-Luc Dabert
2					

Destinataires

Nom	Organisme	Date d'envoi

Votre contact :

Mr. Louis Janodet

louis.janodet@egis.fr

Tél : +33 4 76 48 88 68

Egis Géotechnique

Direction Grenoble

3, rue du Docteur Schweitzer
38180 Seyssins

Tél : +33 (0)4 76 48 47 48
Fax : +33 (0)4 76 48 44 47
dominique.allagnat@egis.fr

Paris

15, avenue du Centre
CS 20538 Guyancourt
78286 Saint-Quentin-En-Yvelines
Cedex

Tél : + 33 (0)1 39 41 51 33
Fax : + 33 (0)1 39 41 57 49
francois.depardon@egis.fr

Lille

40, avenue de la Marne
BP 87
59442 WASQUEHAL Cedex

Tél : + 33 (0)1 39 41 51 33
Fax : + 33 (0)1 39 41 57 49
laurent.beeuwsaert@egis.fr

Toulouse

33-43, avenue Georges
Pompidou
Bâtiment D – BP 13115
31131 BALMA Cedex
Tél : + 33 (0)5.62.18.19.77
Fax : + 33 (0)5.62.18.19.71
vincent.savatier@egis.fr

Lyon

Le Carat
168-170 Avenue Thiers
69455 Lyon Cedex 06

Tél : + 33 (0) 4 37 72 40 50
lionel.demongodin@egis.fr

Sommaire

1.	Objet.....	1
2.	Analyse bibliographique / état de l'art.....	1
2.1	Introduction	1
2.2	Synthèse de l'analyse bibliographique.....	2
2.3	Conclusions.....	3
3.	Synthèse du recueil des retours d'expériences des gestionnaires d'infrastructures	4
3.1	Choix des districts	4
3.2	Rappel des questions posées en interview	5
3.3	Phénomènes météorologiques observés	6
3.4	Effets observés sur les infrastructures	7
4.	Présentation du démonstrateur	9
4.1	Choix de la section d'étude	9
4.2	Présentation de la section d'étude.....	9
5.	Définition des scénarii pour le SIG	10
5.1	Choix des phénomènes d'étude.....	10
5.2	Inondation des voies circulées	10
5.2.1	Sensibilité de l'infrastructure	11
5.2.2	Intensité du changement climatique.....	11
5.2.3	Potentiel de dommage.....	12
5.3	Phénomènes d'érosion de talus et de glissement de peau.....	12
5.3.1	Sensibilité de l'infrastructure	12
5.3.2	Intensité du changement climatique.....	13
5.3.3	Potentiel de dommage.....	14
5.4	Phénomènes de tassement dans les zones de plaine	14
5.4.1	Sensibilité de l'infrastructure	15
5.4.2	Intensité du changement climatique.....	15
5.4.3	Potentiel de dommage.....	16
5.5	Phénomène d'altération de la végétation	16
5.5.1	Sensibilité de l'infrastructure	16

5.5.2	Intensité du changement climatique.....	16
5.5.3	Potentiel de dommage.....	17
6.	Prévisions climatiques	17
6.1	Projections climatiques globales	17
6.2	Données climatiques.....	17
6.2.1	Les précipitations quotidiennes extrêmes.....	18
6.2.2	Le nombre de jours de fortes précipitations	20
6.2.3	Le nombre maximum de jours secs consécutifs	21
6.2.4	L'indice de sécheresse et d'humidité des sols (SSWI).....	22
6.2.5	L'indice de feu météorologique.....	23
7.	Conclusion	24

Liste des annexes

Annexe 1 : Rapport d'analyse bibliographique

Annexe 2 : Questionnaire et synthèse des interviews menées auprès des exploitants du réseau AREA / APRR

Liste des figures

Figure 1 : Schematic view of the soil-vegetation-atmosphere interactions – Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology – Volume 51, Issue 2, May 2018	1
Figure 2 : Carte du réseau APRR / AREA	4
Figure 3 : Vue d’architecte de la partie sud de l’A51 entre Coynelle et le col du Fau.....	10
Figure 4 : Pluies extrêmes quotidiennes en mm sur le département de l’Isère sur les périodes de référence, horizon proche et horizon moyen.	19
Figure 5 : Nombre de jours de fortes précipitations sur le département de l’Isère sur les périodes de référence, horizon proche et horizon moyen.	20
Figure 6 : Nombre maximum de jours secs consécutifs sur le département de l’Isère sur les périodes de référence, horizon proche et horizon moyen.....	22
Figure 7 : Evolution de l’indice de sécheresse et d’humidité des sols établi par Météo-France	22
Figure 8 : Evolution de l’indice de feu météorologique établi par Météo-France.....	23

Liste des tableaux

Tableau 1 : Constat des variations des paramètres météorologiques sur différents districts du réseau APRR / AREA	6
Tableau 2 : Type de détériorations observées sur les infrastructures du réseau APRR / AREA .	8
Tableau 3 : Critères de sensibilité de l’infrastructure à l’inondation des voies	11
Tableau 4 : Coefficients d’intensité liés aux pluies extrêmes quotidiennes.....	11
Tableau 5 : Valeur du potentiel de dommage de l’évènement inondation de chaussées	12
Tableau 6 : Critères de sensibilité de l’infrastructure à l’érosion	13
Tableau 7 : Coefficient d’intensité lié au nombre de jours de fortes précipitations	13
Tableau 8 : Coefficient d’intensité lié au nombre maximum de jours secs consécutifs	14
Tableau 9 : Valeur du potentiel de dommage de l’évènement érosion de talus et glissement de peau	14
Tableau 10 : Critères de sensibilité de l’infrastructure au tassement dans les zones de plaine	15
Tableau 11 : Coefficients d’intensité de sécheresse.....	15
Tableau 12 : Valeur du potentiel de dommage de l’évènement tassement dans les zones de plaine	16
Tableau 13 : Coefficients d’altération de la végétation	16
Tableau 14 : Valeur du potentiel de dommage de l’évènement altération de la végétation.....	17
Tableau 15 : Valeurs des pluies extrêmes quotidiennes	19

Tableau 16 : Nombre de jours de fortes précipitations sur les différentes zones du démonstrateur 21

Tableau 17 : Nombre maximum de jours secs consécutifs sur les différentes zones du démonstrateur 22

Tableau 18 : Indice de feu météorologique sur les différentes zones du démonstrateur 23

Acronymes et abréviations

FEREC	Fondation d'entreprise recherche collective pour la construction et les infrastructures
MARI-CC	Méthodologie d'Analyse de la Résilience des Infrastructures au Changement Climatique
APRR	Société des Autoroutes Paris-Rhin-Rhône
AREA	Société des Autoroutes Rhône-Alpes
RIMAROCC	Risk Management for Roads in a Changing Climate
ROADAPT	Roads for today, Adapted for tomorrow
AIPCR	Association international permanente des Congrès de la Route – Association mondiale de la route
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
GERICI	Gestion des Risques liés aux Changements Climatiques pour les Infrastructures
HAF	Highways Agency Framework
FHWA	Federal High-Ways Administration
WSDOT	Washington State Department Of Transportation
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
SIG	Système d'Information Géographique

1. Objet

Le 26 Septembre 2019, la fondation d'entreprises FEREC a accordé au groupement Egis - APRR un financement pour la réalisation de son projet MARI-CC – Méthodologie d'Analyse de la Résilience des Infrastructures au Changement Climatique.

Ce projet a été initié par le constat que les ouvrages de génie civil des infrastructures linéaires sont de plus en plus affectés par les effets du changement climatiques. Ces évènements doivent être pris en compte dans la stratégie de maintenance des ouvrages de façon à renforcer leur résilience.

L'objectif du projet MARI-CC est de proposer un outil simple d'analyse de la vulnérabilité des ouvrages géotechniques.

Basé sur le retour d'expérience d'Egis (RIMAROCC ou ROADAPT) et du gestionnaire APRR, l'outil SIG réalisé dans le cadre du projet permet d'adapter au contexte local Français, et de manière opérationnelle, les recherches réalisées à un niveau international.

Le programme de travail réalisé dans le cadre du projet a consisté en une analyse bibliographique permettant d'établir l'état de l'art proposé à un niveau international.

Des interviews ont par la suite été menées auprès des gestionnaires du réseau APRR / AREA afin de récolter le retour d'expérience « des hommes de terrain » sur le constat et les effets du changement climatique.

Le croisement de l'état de l'art au niveau international et des retours d'expérience des gestionnaires du réseau a permis de cibler les conséquences les plus pertinentes à développer ainsi que les variables météorologiques à récolter pour la suite de l'analyse.

Sur cette base, un outil SIG a été développé, au titre de « démonstrateur », sur le tronçon de l'autoroute A51 reliant Grenoble au col du Fau. Cet outil permet de mettre en évidence les zones d'impacts potentiels du changement climatique sur cette infrastructure.

2. Analyse bibliographique / état de l'art

2.1 Introduction

Plusieurs pays ont déjà réalisé des analyses de vulnérabilité de leurs infrastructures routières et des cartographies, ou tentatives de cartographie des zones vulnérables. Chacun de ces pays a employé des méthodologies différentes qui dépendent notamment du type de donnée disponible dans le pays.

Le but de l'analyse bibliographique réalisée dans le cadre du projet MARI-CC est de passer en revue ces différentes méthodologies afin de réaliser un état de l'art de l'analyse de vulnérabilité des réseaux routiers au changement climatique.

Les principales publications jugées les plus pertinentes pour le projet MARI-CC ont été sélectionnées dans le cadre de cette analyse. Il s'agit principalement des guides méthodologiques généraux tels que les guides RIMAROCC, ROADAPT, la méthode mise en œuvre par l'AIPCR ou le guide du CEREMA.

En complément, quelques publications sur les phénomènes liant les effets météorologiques du changement climatique aux effets sur les infrastructures à une échelle microscopique ont également

été analysées dans le cadre de cette analyse bibliographique. Ces publications concernent principalement les phénomènes liés à la modification de la teneur en eau des terrains sur les infrastructures.

La liste de ces documents ainsi que le rapport d'analyse bibliographique sont présentés en annexe 1 du présent document.

2.2 Synthèse de l'analyse bibliographique

Les huit guides méthodologiques principaux qui ont été analysés dans le cadre de l'analyse bibliographique sont les suivants :

- RIMAROCC et ROADAPT qui sont les principales approches méthodologiques développées en Europe ;
- GERICI qui est le premier outil développé pour la gestion du risque climatique sur les infrastructures ;
- Le « United Kingdom Highways Agency Framework » (HAF) qui a fortement influencé le guide RIMAROCC et qui est actuellement le seul guide à avoir été appliqué à un niveau national ;
- Le guide « United States Federal High-way Administration » (FHWA) qui est une synthèse des retours d'expérience aux Etats-Unis sur le sujet du changement climatique ;
- Le guide « WSDOT Vulnerability Assessment Method » qui est l'application du guide FHWA à l'état de Washington ;
- La méthode AIPCR plus récente (2015) et qui a été établie comme une synthèse des approches jugées les plus intéressantes à l'échelle mondiale ;
- La méthode « Lebanon Landslide Hazard Framework » qui a été développée dans le but d'établir une méthode transposable à un outil SIG ;
- Le guide CEREMA « Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat » dernier né des guides méthodologiques puisque publié en novembre 2019.

Parmi ces guides méthodologiques certains ont été développés comme compléments d'autres. Par exemple, le guide ROADAPT constitue un complément du guide RIMAROCC. Le guide RIMAROCC établissant le cadre conceptuel pendant que le guide ROADAPT tente d'établir des outils et méthodes détaillées permettant l'application du guide RIMAROCC.

Le guide GERICI et le guide United Kingdom Highways Agency Framework ont été établis avant les guides RIMAROCC et ROADAPT et les principes qu'ils contiennent ont largement été repris dans ces derniers.

Les guides américains « United States FHWA's framework » et « WSDOT vulnerability assessment » peuvent être considérés comme similaires. Le guide FHWA's Framework est issu des travaux et expériences menés dans les différents états américains. Cependant il s'agit plutôt d'un procédé que d'une véritable méthodologie. Il s'appuie sur des méthodologies mises en œuvre lors d'études plus spécifiques et s'applique à tous types d'infrastructures de transport (route, rail, aviation ...). Il en résulte une grande variété de méthodes possiblement applicables. Ainsi, il n'est pas facile de trouver quelle approche est la plus adaptée pour un cas particulier.

Le guide FHWA's Framework sert cependant de base aux travaux du WSDOT vulnerability assessment, dont la méthodologie, plus claire, a été développée à l'échelle de l'état de Washington.

D'une manière générale, l'ensemble de ces guides, y compris celui du CEREMA qui est, à ce jour, le dernier publié, sont développés sur la base des théories de gestion et de management des risques et permettent la réalisation d'analyses générales, très peu adaptées à des problématiques techniques précises. Ces guides méthodologiques ont été établis dans le but de fournir des méthodes d'analyse les plus complètes et adaptables possible.

Ainsi, ces guides méthodologiques définissent le risque lié au changement climatique comme la combinaison d'une menace, d'une vulnérabilité et des conséquences liées. La menace est constituée par le changement climatique, et peut être définie comme un faisceau de paramètres climatiques ou de risques naturels. Ensuite ces guides proposent de définir la vulnérabilité des infrastructures ou des parties d'infrastructures. Cette vulnérabilité regroupe en général des critères socio-économiques et tentent d'analyser les conséquences d'une interruption du réseau (criticité de l'infrastructure). Les conséquences sont exprimées en termes de sécurité, d'environnement et en termes socio-économiques.

Seule la méthode développée par l'association mondiale de la route (PIARC's adaptation Framework) est construite comme une méthode technique considérant les structures analysées comme des ouvrages soumis à des phénomènes météorologiques physiques lié au réchauffement climatique. Cependant cette méthode se veut être applicable à tous les cas de figure possible quelles que soient les conditions climatiques et géographiques et pour des études de réseaux de toute taille (à l'échelle nationale, régionale ou à l'échelle du tronçon de route). Ainsi cette méthode peut constituer une liste des tâches à ne pas oublier lorsque l'on réalise une analyse de risque pour une infrastructure soumise aux effets du changement climatique.

2.3 Conclusions

Parmi les documents analysés dans le cadre de la présente analyse bibliographique, il apparaît que les guides méthodologiques existants proposent des méthodes générales basées sur la théorie de l'analyse des risques et pouvant être appliqués quel que soit le contexte. Il en ressort des applications principalement qualitatives qui ne permettent pas ou peu les analyses détaillées. En fait, l'une des leçons de cette analyse bibliographique est que bien que les analyses basées sur une approche de type analyse des risques soit logique et intuitive, leur application est incompatible avec une estimation quantitative des phénomènes liés au changement climatique.

L'objet du projet MARI-CC est justement de déterminer, sur la base de ces travaux existants, une méthode plus appliquée permettant de définir des éléments chiffrés qui permettront à notre partenaire APRR / AREA de disposer d'un outil cartographique suffisamment détaillé et précis pour l'aider à prendre les décisions pertinentes dans le cadre de la maintenance de son infrastructure.

3. Synthèse du recueil des retours d'expériences des gestionnaires d'infrastructures

Entre Mars et Avril 2019, 7 interviews ont été menées dans le cadre du projet MARI-CC auprès des gestionnaires du réseau APRR / AREA.

Le questionnaire servant de base à ces interviews ainsi que les restitutions de ces interviews sont présentés en annexe 2 du présent document.

Les personnes interviewées sont en poste sur leurs districts respectifs depuis 7 à 25 années. Ces interviews ont donc permis de recenser les phénomènes météorologiques constatés et pouvant être mis en relation avec l'évolution climatique ainsi que les principaux effets de ces phénomènes sur le réseau au moins depuis ces dix dernières années. L'évolution des pratiques en termes d'entretien en lien avec le changement climatique a également pu être récolté.

Une restitution de ces interviews a été faite sous la forme de deux grilles d'analyse telles que présentées ci-après, l'une concernant les principaux phénomènes météorologiques observés, l'autre concernant les effets de ces phénomènes sur l'infrastructure et les pratiques d'entretien courant modifiées.

3.1 Choix des districts

Le groupe APRR gère plus de 2300 km d'autoroutes dans l'est de la France. Le réseau APRR s'étend de Paris à Mulhouse, de Toul à Lyon, d'Annecy à Grenoble et de Bourges à Clermont-Ferrand.

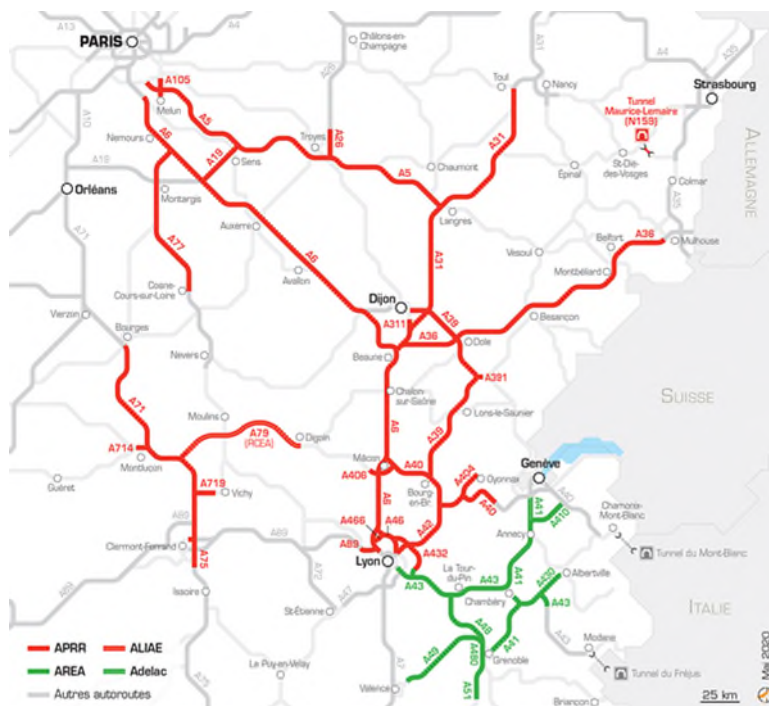


Figure 2 : Carte du réseau APRR / AREA

Les districts ayant fait l'objet d'une interview ont été choisis de manière à représenter au maximum l'étendue géographique du réseau APRR / AREA de manière à refléter la diversité climatique et géomorphologique présente au sein du réseau APRR / AREA.

Ainsi, les districts retenus couvrent aussi bien des zones de plaine (district du Val de Saône, district de Champagne), des zones de montagne (district des 3 massifs, district du Morvan et district du Haut Bugey) que des zones périurbaines (district Lyon – Chambéry, district du Dijonnais). Le choix des districts reflète également la variété des climats qui existent sur l'ensemble du réseau APRR / AREA : des climats océaniques dégradés caractérisés par une plus grande douceur des températures (districts du Val de Saône, et du Dijonnais), aux climats continentaux caractérisés notamment par des hivers plus rigoureux (districts de Champagne, district du Morvan) aux climats de montagne (districts des 3 massifs, et du haut Bugey).

Les districts ayant fait l'objet d'une interview sont les suivants :

- Le district Val de Saône, d'une extension d'environ 75km, ce district comprends majoritairement l'A6 du péage de Tournus à Belleville mais également un tronçon sur A40 et le contournement Sud de Mâcon (A406) ;
- Le district des 3 massifs, qui comprends l'A51 de Grenoble au col du Fau et l'A480 (traversée de Grenoble) ;
- Le district Lyon-Chambéry, qui comprends l'A43 depuis le Pk3 à l'entrée de Lyon jusqu'à la bifurcation A43 Chambéry / A48 Grenoble et l'A432 (accès à l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry) ;
- Le district de Champagne qui est composé de l'A31 du Pk86 à Langres au Pk140 au péage de Montigny-le-Roy et de l'A5 du Pk186 à la gare de péage de Ville-sous-la-Ferté au Pk226 et la jonction avec l'autoroute A31 ;
- Le district du Morvan, d'une extension d'environ 50km qui comprends l'autoroute A6 de Dijon à Auxerre ;
- Le district du Haut Bugey, qui est composé des autoroutes A40 et A404 ;
- Le district du Dijonnais composé de l'autoroutes A31 de Nuits-Saint-Georges à Langres, de l'autoroute A39 du Pk0 au Pk22 et de l'autoroute A311 qui est le prolongement de la rocade de Dijon jusqu'à l'A31.

3.2 Rappel des questions posées en interview

Afin de refléter la diversité des climats et des zones géographiques présentée par les districts objet de l'enquête, les interviews ont été préalablement préparées par envoi d'un questionnaire aux personnes interviewées. Ces questionnaires avaient pour objet de leur présenter la démarche et de les inviter à réfléchir sur trois thèmes pour lesquels des évolutions pouvaient être constatées et rapportées aux modifications du climat liées au réchauffement climatique : les observations d'indices sur le changement climatique régional, les observations sur le réseau exploité et les modification de leurs habitudes de travaux d'entretien et de maintenance.

Les questions posées au sujet des indices sur le changement climatique étaient les suivantes :

- Augmentation significative de la température en été ;
- Périodes de sécheresse (fréquence, intensité) ;
- Augmentation des pluies extrêmes (orages violents en été) ;

- Augmentation des tempêtes (vents violents) ;
- Augmentation des fortes pluies en hiver.

Les questions liées aux observations sur le réseau exploité étaient les suivantes :

- Constat d'augmentation de phénomènes d'érosion ou de glissement sur les talus de déblais ;
- Constats sur la végétation (laquelle joue un rôle dans la stabilité des talus ou dans l'encombrement des systèmes d'assainissement) ;
- Constats sur le fonctionnement de l'assainissement de surface ;
- Constats sur les chaussées ;
- Constats sur les ouvrages de GC (matériau béton notamment...) ;
- Appréciation sur le fonctionnement des ouvrages hydrauliques.

3.3 Phénomènes météorologiques observés

Le tableau ci-dessous présente la restitution synthétique de ces interviews en ce qui concerne les principaux phénomènes météorologiques observés. Sur la base des principales variations généralement constatées, classées en 'évolutions tendancielles', une note de 1 (non constaté) à 4 (constaté plusieurs fois) a été attribuée.

variables météorologiques retenues		Constats sur les différents districts						
évolutions tendancielles	Variables	Val de Saône	3 Massifs	Lyon Chambery	Champagne	Morvan	Haut Bugey	Dijonnais
Augmentation des températures moyennes	Augmentation des valeurs extrêmes de température	4	4	2	3	4	4	4
	Augmentation du nombre de jour de vague de chaleur (périodes de canicule)	4	4	2	4	4	4	4
	Augmentation de la température moyenne en hiver, supérieures aux normales de saison (diminution température négative en hiver)	4	4	3	4	4	4	4
	Modification des cycles gel - dégel	4	4	1	4	4	1	1
Evolution de la pluviométrie	Augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes (fortes précipitations et durée des périodes de précipitation)	3	4	1	2	4	3	4
	Diminution des précipitations moyennes	2	2	1	2	1	2	2
	Augmentation des périodes de sécheresse	3	1	1	4	4	2	4
	Diminution du nombre de jour de chutes de neige	4	4	4	4	1	4	4
	Augmentation des pluies verglaçantes (augmentation au nord, diminution au sud (limite virtuelle: Beaune))	1	1	1	4	4	1	4
Evolution des régimes de vent	Augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes de vent	4	4	3	4	4	4	4

Tableau 1 : Constat des variations des paramètres météorologiques sur différents districts du réseau APRR / AREA

On peut constater que les variations météorologiques liées à l'augmentation des températures moyennes ont été constatées de façon unanime sur l'ensemble des districts ayant fait l'objet d'une interview.

Ce constat est mitigé par les réponses de la personne en charge du district Lyon-Chambéry. Cette personne, en charge des travaux d'entretien pourrait être moins sensible aux aléas météo (hormis phénomènes exceptionnels cités au cours de l'interview) que les autres responsables interviewés plus en charge de la viabilité.

Egalement, la modification des cycles gel-dégel n'a pas été citée lors des interviews des personnes en charge des districts du Haut Bugey et du Dijonnais. Sur le Haut Bugey, dans un climat de type continental marqué et pour une autoroute de montagne, la diminution (quasi disparition) des masses froides (périodes anticycloniques liées au froid) a cependant été constatée. Pour le district du Dijonnais

(et Lyon Chambéry) ce constat est probablement atténué par le climat continental plus doux au Sud du district.

Concernant les variations météorologiques liées aux précipitations, les constats sont plus variables selon les districts. Notamment concernant la diminution des précipitations moyennes, ce phénomène est peut-être moins évident à souligner surtout au regard du constat partagé de l'augmentation des événements pluvieux extrêmes.

L'augmentation des périodes de sécheresse n'est également pas constatée sur les districts de montagne que sont les districts des 3 massifs et celui du haut Bugey.

Le constat de la diminution du nombre de jours de chutes de neige est en revanche partagé par quasiment l'ensemble des districts. Ce paramètre est plus facilement observable pour les personnes en charge de la viabilité car il correspond aussi à une diminution des interventions de salage et de déneigement.

Concernant les phénomènes de pluies verglaçantes, l'augmentation ou la diminution de ces phénomènes sont contrastés selon les secteurs. Les phénomènes de pluie en surfusion semblent globalement diminuer et être remplacés par des phénomènes de pluie sur sol gelé plus liés à l'évolution des cycles de gel dégel.

Le constat de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes de vent est en revanche partagé par l'ensemble des personnes interviewées.

3.4 Effets observés sur les infrastructures

Le tableau ci-dessous présente la restitution synthétique de ces interviews en ce qui concerne les effets du climat sur les structures élémentaires de l'infrastructure. Pour chaque type d'ouvrage, une liste des dégâts potentiels types ou observés a été dressée et pour chacun de ces dégâts une note de 1 (non observé) à 4 (constaté plusieurs fois) a été attribuée.

Synthèse du recueil des retours d'expériences des gestionnaires d'infrastructures

Type d'ouvrage	Dommmages constatés	Constats sur les différents districts						
		Val de Saône	3 Massifs	Lyon Chambery	Champagne	Morvan	Haut Bugey	Dijonnais
Remblais et assises de remblais	Tassements	1	1	1	1	4	1	1
	Gonflements	1	1	1	1	1	1	1
	Perte de portance	1	1	1	1	1	1	1
	Erosion par ruissellement	3	1	1	3	1	1	1
	Glissement	1	1	1	1	3	2	1
Déblais et versants amont	Erosion par ruissellement	1	1	1	3	1	1	1
	Glissements coulées	1	2	1	1	1	1	1
	Chutes de blocs - éboulements	1	1	1	1	1	2	3
Chaussées	Inondations de chaussées	4	2	3	4	4	3	4
	Orniérage	2	1	1	1	1	4	3
	Affaissements	1	1	1	1	3	1	4
	Fissuration de joints	4	1	1	1	1	1	1
	Fissuration	4	1	2	3	4	1	1
	Faiénçage	1	1	1	1	3	1	1
	Désenrobage	1	1	2	4	3	1	1
	Nid de poule	4	1	1	4	1	3	1
Ouvrages d'art non courants (viaducs)	Dilatation	1	1	1	1	1	1	1
	Viellissement des joints de chaussée	1	1	1	1	3	1	1
	Ecaillage du béton	1	1	1	1	1	1	1
PS	Tassement des remblais d'accès	1	3	1	1	3	1	3
	Joints de chaussée	1	1	1	2	3	1	1
	Ecaillage du béton des appuis proche des voies de circulation	1	1	1	1	1	2	1
PI - PIOH	Tassement des remblais d'accès	4	1	1	1	4	1	4
	Embâcles	1	1	4	2	1	1	1
	Alluvionnement	1	1	1	1	1	2	1
Environnement proche infra	Fragilisation de la végétation	4	4	3	3	4	4	4
	Chutes d'arbres/branches	3	3	3	3	4	1	4
	Fissuration de retrait	3	1	1	1	3	1	1
	Apparition d'espèces végétales invasives	3	1	4	2	1	4	2
	Disparition/modification de biodiversité	4	1	1	1	1	4	4
	Crues	2	2	1	1	1	1	3
	Incendie	1	1	1	1	4	1	3

Tableau 2 : Type de détériorations observées sur les infrastructures du réseau APRR / AREA

On peut constater que les dégâts recensés sur les infrastructures et pouvant être liés au climat sont variables selon les districts. Cette variabilité peut s'expliquer par les différences de climat et de morphologie des infrastructures présentes sur le réseau APRR / AREA.

Parmi ces dégâts certains ont cependant été constatés de façon unanime sur l'ensemble des districts. Il s'agit :

- Des inondations des voies au cours des phénomènes pluvieux exceptionnels ;
- De la dégradation et de la fragilisation de la végétalisation présente le long du réseau.

Concernant les remblais et assises de remblais, un phénomène de tassement généralisé des remblais dans les zones de plaines a été constaté sur quatre des sept districts. Les effets de ce phénomène sont visibles, selon les districts, sur différentes parties des infrastructures (remblais, franchissement d'ouvrages, passages supérieurs).

Concernant les déblais et versants amont, peu de dégâts sont actuellement constatés sur les différents districts. Ces observations sont à nuancer par les travaux d'investissement réalisés sur certains secteurs (mise en œuvre de masques) et sur l'entretien des talus 'sensibles' connus (entretien régulier des systèmes de drainage...).

Concernant les chaussées les problématiques rencontrées sont variées comme les types de structures en place sur le réseau. En outre, à quelques exceptions ponctuelles près, le lien entre le réchauffement global des températures et les désordres constatés n'est pas évident à établir. Ce point ne sera pas développé dans la suite de cette étude.

4. Présentation du démonstrateur

Comme présenté au paragraphe 1, l'étape suivant l'établissement de l'état de l'art et le recueil des retours d'expérience des gestionnaires d'infrastructures est la mise en place d'un outil SIG dénommé « démonstrateur ». L'objet du démonstrateur est de représenter certains phénomènes induits par les changements climatiques observés et de disposer ainsi d'un outil d'aide à l'entretien et à la gestion des infrastructures.

4.1 Choix de la section d'étude

Le tronçon d'étude retenu pour la mise en œuvre du démonstrateur est le tronçon de l'autoroute A51 reliant Grenoble au col du Fau.

Ce tronçon a été choisi pour les raisons suivantes :

- La première de ces raisons est la diversité des situations géographiques traversées par cette section autoroutière. Le tracé quitte en effet la zone périurbaine de Grenoble au Nord, traverse les zones des plaines du Lavanchon et de la Reymure avant de s'élever progressivement de l'altitude de 200m jusqu'à l'altitude de 850m au col du Fau. ;
- La diversité des ouvrages géotechniques présents le long de l'autoroute A51 entre Grenoble et le col du Fau a également participé à la motivation du choix de cette section. La section comporte en effet des remblais de plaine sur zone compressible, des ouvrages en remblais renforcés sur versant mais également des tunnels, des viaducs et plusieurs remblais et déblais de grande dimensions ;
- La diversité des altitudes traversées par l'autoroute A51 induit une variabilité du climat. Entre le climat continental grenoblois au Nord et le climat montagnard à proximité du col du Fau ;
- Enfin, la dernière raison motivant le choix de la section est la disponibilité pour Egis des données géométriques et de conception de la section puisque Egis a participé activement à la conception et au suivi de réalisation de cette infrastructure.

4.2 Présentation de la section d'étude

Raccordée à l'actuelle A480 en limite de Claix, l'A51 contourne Varcès par l'ouest avant de passer sous la montagne d'Uriol pour rejoindre la plaine de Reymure et éviter, ainsi, Vif par l'est.

Une fois la Gresse franchie par un pont, se présentent alors les premières pentes et une succession de deux ouvrages d'art, le tunnel du petit Brion et le viaduc de la Rivoire, permettant à l'autoroute de rejoindre le plateau de Crozet.

Le tracé suit alors sensiblement la route D1075 et la voie ferrée, qu'il franchit à hauteur de Coynelle. A flanc de montagne puis à travers le plateau des Marceaux, il atteint Sinard qu'il laisse à l'ouest, passant sous la Côte Martine avant de surplomber, en viaduc, la vallée au nord de Monestier-de-Clermont. Après Saint-Paul-les-Monestier, l'autoroute se raccorde à la route D1075 au col du Fau.

La longueur de la section d'étude est de 26 km. La plate-forme présente 2 fois 2 voies de circulation. La mise en service de la section a été réalisée en deux phases. Les 16km de la première section Grenoble Coynelle ont été mis en service en 1999 pendant que les 10km reliant Coynelle au col du Fau ont été mis en service en 2007.

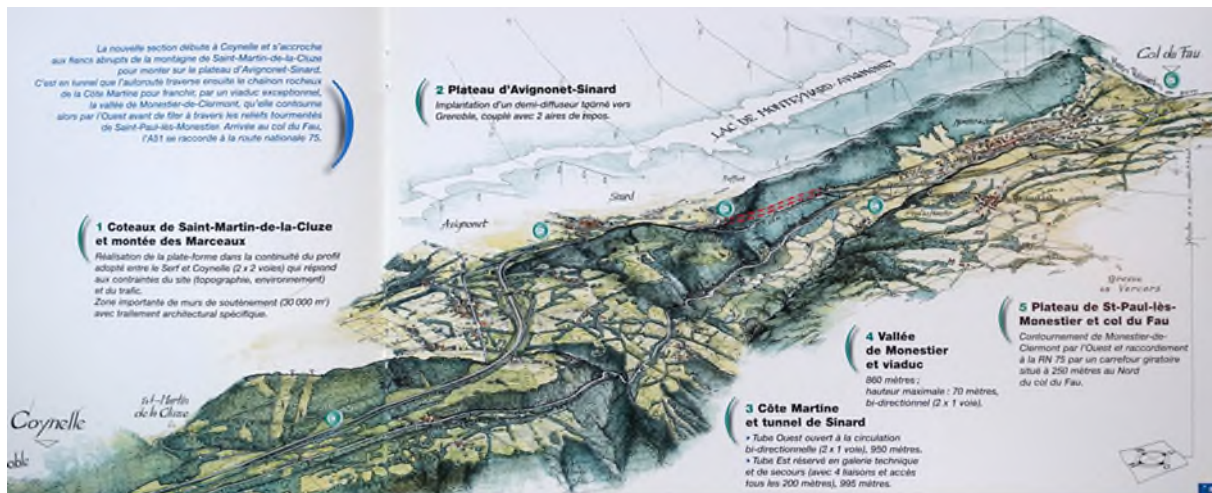


Figure 3 : Vue d'architecte de la partie sud de l'A51 entre Coynelle et le col du Fau

5. Définition des scénarii pour le SIG

5.1 Choix des phénomènes d'étude

Sur la base des constats effectués dans le cadre des interviews des gestionnaires de réseau présentés au paragraphe 3.4, et dans le cadre de la création de l'outil SIG sur le démonstrateur retenu (tronçon de l'autoroute A51 entre Grenoble et le col du Fau) il a été décidé de retenir 4 phénomènes induits par le changement climatique :

- Les phénomènes d'inondation de voies ;
- Les phénomènes d'érosion des talus et de glissement de peau ;
- Les phénomènes de tassement dans les zones de plaine ;
- Les phénomènes d'altération de la végétation.

Ces phénomènes déjà observés par les gestionnaires de réseau seront analysés selon les prévisions du climat aux échéances 10, 20 et 30 ans.

Pour évaluer le potentiel de dommage, les scénarii d'évolution de ces phénomènes sont construits sur la base d'une notation qui croise la sensibilité de l'infrastructure avec l'intensité du phénomène lié au changement du climat.

5.2 Inondation des voies circulées

Comme présenté au paragraphe 3.4, l'inondation des voies circulées lors d'évènements pluvieux intenses est un phénomène qui est revenu de façon récurrente lors des interviews des gestionnaires de réseau. Ces évènements temporaires ne portent pas forcément atteinte à l'intégrité de la structure mais perturbent l'opérabilité de l'infrastructure et peuvent mettre en défaut la sécurité des usagers.

5.2.1 Sensibilité de l'infrastructure

La sensibilité de l'infrastructure est fonction de la géométrie de la voie et de la conception de celle-ci en termes d'assainissement.

Les critères géométriques et d'assainissement retenus pour la définition de la sensibilité de l'infrastructure aux inondations de voies sont donc :

- La pente du profil en long ;
- La pente des dévers de la chaussée ;
- La capacité théorique du système d'assainissement.

Pour chacun de ces trois critères, une note de 1 à 3 ou 4 est attribuée pour chaque tronçon de la section. Ces notes sont définies comme suit :

Pente du profil en long		Dévers		Capacité de l'assainissement	
Valeur	Note	Valeur	Note	Capacité	Note
>5%	1	>3%	1	Importante	1
>3%	2	>2%	2	Moyenne	2
>1.5%	3	<1%	3	limitée	3
≤1.5%	4				

Tableau 3 : Critères de sensibilité de l'infrastructure à l'inondation des voies

À noter dans ce tableau que la capacité théorique de l'assainissement est liée au type d'assainissement mis en œuvre le long des voies circulées (caniveaux à fente, cunettes terre ou cunettes revêtues), et qu'il n'est pas fait état des conditions d'entretien courant réellement pratiquées et nécessaires au bon fonctionnement de ces ouvrages.

La note globale de sensibilité à l'inondation de la voie est une note de 3 à 10 établie en faisant la somme des notes des trois critères retenus.

5.2.2 Intensité du changement climatique

Les inondations de chaussée se produisent lors de phénomènes pluvieux marqués sur de courtes durées. Selon les données récoltées au paragraphe 6, il a été considéré l'évolution prévisible à 10, 20 et 30 ans de l'intensité des pluies extrêmes quotidiennes.

Ces intensités ont été relevées selon les 3 zones géographiques du démonstrateur (<300m, <500m et ≥500m d'altitude). Selon les variations prévisibles de l'intensité de ces phénomènes, un coefficient d'intensité est attribué conformément au tableau ci-dessous :

Années	Zone < 300m d'altitude		Zone < 500m d'altitude		Zone ≥ 500m d'altitude	
	Valeur	Coefficient	Valeur	Coefficient	Valeur	Coefficient
2020	34 mm	1	35 mm	1	28 mm	1
2030	35 mm	1.2	36 mm	1.2	28 mm	1
2040	36 mm	1.4	37 mm	1.6	29 mm	1.2
2050	36 mm	1.4	37 mm	1.6	29 mm	1.2

Tableau 4 : Coefficients d'intensité liés aux pluies extrêmes quotidiennes

5.2.3 Potentiel de dommage

La note de potentiel de dommage concernant l'inondation des voies circulées est établie en multipliant la sensibilité de l'infrastructure par le coefficient d'intensité du changement climatique :

$$D_{in} = S_{in} \times IC_{in} = 3 \text{ à } 16$$

Cette note se traduit ensuite sur le SIG de la manière suivante :

D_{in}	3 à 6	7 à 10	11 à 14	15 à 16
Couleur	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Potentiel de dommage	Faible	Significatif	Important	Très important

Tableau 5 : Valeur du potentiel de dommage de l'évènement inondation de chaussées

5.3 Phénomènes d'érosion de talus et de glissement de peau

Comme présenté au paragraphe 3.4, bien que la dégradation des talus de déblai par érosion et glissements superficiels ait peu été constatée par les gestionnaires du réseau, il nous a paru opportun de présenter l'évolution de ce phénomène. En effet, les évolutions prévisibles du climat (assèchement des sols, fragilisation de la végétation, augmentation des phénomènes pluvieux intenses) vont contribuer à l'augmentation de ces phénomènes. Cela se traduira dans le futur pour l'exploitant par une augmentation des dépenses d'entretien et d'investissement pour lutter contre l'érosion des talus en amont de l'infrastructure. Ces investissements sont d'ailleurs déjà consentis par l'entretien des systèmes de drainage et des travaux de mise en œuvre de masques drainants signalés lors des interviews et qui expliquent que ce phénomène soit actuellement peu observé. Par expérience, nous savons qu'un problème d'érosion non traité dès les premiers signes peut conduire à l'augmentation spatiale et volumique du désordre et peut parfois conduire à des glissements de terrain plus importants pouvant affecter les voies de circulation et aller jusqu'à des difficultés d'exploitation temporaires, voire à des situations dangereuses pour les usagers.

5.3.1 Sensibilité de l'infrastructure

La sensibilité de l'infrastructure dépend de la pente et de la longueur développée des talus mais également de la nature géotechnique des terrains.

Les critères retenus pour la définition de la sensibilité de l'infrastructure aux phénomènes d'érosion et de glissement de peau sur les talus amont de l'infrastructure sont donc :

- La pente des talus ;
- La longueur développée des talus ;
- L'érodabilité des terrains constitutifs du talus.

Pour chacun de ces trois critères, une note de 1 à 3 ou 4 est attribuée pour chaque tronçon de la section. Ces notes sont définies comme suit :

Pente du talus		Longueur développée du talus		Erodabilité des sols	
Valeur	Note	Valeur	Note	Erodabilité	note
<20 degrés	1	≤15 m	1	Peu érodable	1
<30 degrés	2	≤25 m	2	Moyennement érodable	2
≤45 degrés	3	>25 m	3	Erodable	3
				Très érodable	4

Tableau 6 : Critères de sensibilité de l'infrastructure à l'érosion

A noter dans ce tableau que le critère d'érodabilité est un critère lié à la nature géotechnique des terrains qui peut varier du rocher (peu érodable) à un sol de nature sableuse par exemple (très érodable).

La note globale de sensibilité à l'érosion des talus est une note de 3 à 10 établie en faisant pour chacun des talus la somme des notes des trois critères retenus.

5.3.2 Intensité du changement climatique

Les phénomènes d'érosion des sols se produisent lors d'évènements pluvieux marqués. Ces phénomènes sont amplifiés lorsque ces évènements pluvieux interviennent sur des sols secs. Ainsi pour les phénomènes d'érosion des sols il a été décidé de retenir un double critère d'intensité du changement climatique. Ce double critère est constitué des données météorologiques suivantes :

- Le nombre de jours de fortes précipitations ;
- L'augmentation en nombre de jours de la durée des périodes de sécheresse.

Comme présenté au chapitre 6, les données météorologiques concernant la pluviométrie ne permettent pas de dégager des tendances concernant l'alternance des phénomènes pluvieux marqués avec les périodes de sécheresse. La pluviométrie annuelle semblant par ailleurs une donnée relativement stable, on peut supposer que l'augmentation dans la durée des périodes de sécheresse contribue à observer de plus en plus les alternances de périodes de sécheresse avec des phénomènes pluvieux marqués.

Ces intensités ont été relevées selon les 3 zones géographiques du démonstrateur (<300m, <500m et ≥500m d'altitude). Selon les variations prévisibles de l'intensité de ces phénomènes, un coefficient d'intensité est attribué conformément aux tableaux ci-après :

Années	Zone < 300m d'altitude		Zone < 500m d'altitude		Zone ≥ 500m d'altitude	
	Valeur	Coefficient	Valeur	Coefficient	Valeur	Coefficient
2020	17 jours	1	17 jours	1	8 jours	1
2030	18 jours	1.2	18 jours	1.2	9 jours	1.2
2040	19 jours	1.4	19 jours	1.4	10 jours	1.4
2050	17 jours	1	19 jours	1.4	10 jours	1.4

Tableau 7 : Coefficient d'intensité lié au nombre de jours de fortes précipitations

Années	Zone < 300m d'altitude		Zone < 500m d'altitude		Zone ≥ 500m d'altitude	
	Valeur	Coefficient	Valeur	Coefficient	Valeur	Coefficient
2020	20 jours	1	21 jours	1	20 jours	1
2030	21 jours	1.2	21 jours	1.2	21 jours	1.2
2040	22 jours	1.4	21 jours	1.2	22 jours	1.4
2050	20 jours	1	20 jours	0.8	21 jours	1.2

Tableau 8 : Coefficient d'intensité lié au nombre maximum de jours secs consécutifs

Le coefficient d'intensité du changement climatique pour les phénomènes d'érosion de talus et de glissement de peau est obtenu en faisant le produit des coefficients d'intensité lié au nombre de jours de fortes précipitations par le coefficient d'intensité lié au nombre maximum de jours secs consécutifs :

$$IC_{er} = IC_{pl} \times IC_{sec}$$

5.3.3 Potentiel de dommage

La note de potentiel de dommage concernant l'érosion et les glissements de peau des talus en amont des voies circulées est établie en multipliant la sensibilité de l'infrastructure par le coefficient d'intensité du changement climatique :

$$D_{er} = S_{er} \times IC_{er} = 3 \text{ à } 20$$

En complément du potentiel de dommage et compte tenu que l'extension géographique des phénomènes d'érosion s'accroît avec l'importance du phénomène, un coefficient d'amplification topographique C_{at} est associé au potentiel de dommage.

La note de potentiel de dommage se traduit ensuite sur le SIG par un zonage de couleur comme illustré dans le tableau ci-dessous. L'extension de la zone potentielle d'érosion est augmentée du coefficient d'amplification topographique associé.

D_{er}	3 à 7		8 à 12		13 à 17		18 à 20	
	Couleur	C_{at}	Couleur	C_{at}	Couleur	C_{at}	Couleur	C_{at}
Couleur / coefficient d'amplification topographique	Vert	1	Jaune	1,2	Orange	1,5	Rouge	2
Potentiel de dommage	Faible		Significatif		Important		Fort	

Tableau 9 : Valeur du potentiel de dommage de l'évènement érosion de talus et glissement de peau

5.4 Phénomènes de tassement dans les zones de plaine

Comme présenté au paragraphe 3.4, un phénomène de tassement généralisé des remblais dans les zones de plaines a été constaté sur 4 des 7 districts ayant fait l'objet d'une interview. Le district des 3 massifs sur lequel se situe l'autoroute A51 est concerné, notamment dans les zones des plaines du Lavanchon et de Reymure. Ces phénomènes de tassement généralisés peuvent être liés à l'abaissement des nappes souterraines. Ils sont visibles sur la superstructure car un dénivelé se crée entre les ouvrages de franchissement et leur remblais d'accès. Ce type de désordre oblige l'exploitant à effectuer des rechargements (souvent en enrobés) des remblais d'accès.

5.4.1 Sensibilité de l'infrastructure

La sensibilité de l'infrastructure dépend de la nature géotechnique des terrains (zones de plaine, zones compressibles) et de la hauteur des remblais.

Les critères retenus pour la définition de la sensibilité de l'infrastructure aux phénomènes de tassement dans les zones de plaine sont donc :

- La hauteur des remblais ;
- La nature géotechnique des terrains.

Pour chacun de ces deux critères, une note de 1 à 2 ou 3 est attribuée pour chaque tronçon de la section. Ces notes sont définies comme suit :

Hauteur des remblais		Nature géotechnique des terrains	
Valeur	Note	Compressibilité	note
<5 m	1	Zone de plaine Non compressible	1
<10 m	2	Zone de plaine peu compressible	2
≥10 m	3	Zone compressible	3

Tableau 10 : Critères de sensibilité de l'infrastructure au tassement dans les zones de plaine

La note globale de sensibilité au tassement de l'infrastructure est une note de 2 à 6 établie en faisant la somme des notes des deux critères retenus.

5.4.2 Intensité du changement climatique

Les phénomènes de tassement observés dans les zones de plaines sont liés à l'abaissement du niveau des nappes phréatiques. Comme présenté au chapitre 6, le site des projections climatique de Météo-France a établi des indices de sécheresse et d'humidité des sols. Ces indices permettent d'obtenir directement les niveaux de sécheresse qui seront atteints dans un horizon proche (2035) à moyen (2050).

Ces indices ont été relevés dans la zone géographique du démonstrateur (Isère) et ont été affectés du coefficient d'intensité présenté dans le tableau ci-dessous :

Années	Indice sécheresse	Coefficient
2020	Normal	1
2030	Modéré	1.2
2040	Très sec	1.4
2050	Extrêmement sec	1.6

Tableau 11 : Coefficients d'intensité de sécheresse

5.4.3 Potentiel de dommage

La note de potentiel de dommage concernant le tassement général des terrains dans les zones de plaine est établie en multipliant la sensibilité de l'infrastructure par le coefficient d'intensité du changement climatique :

$$D_t = S_t \times IC_t = 2 \text{ à } 10$$

Cette note se traduit ensuite sur le SIG de la manière suivante :

D _t	2 à 4	4 à 6	6 à 8	8 à 10
Couleur	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Potentiel de dommage	Faible	Significatif	Important	Très important

Tableau 12 : Valeur du potentiel de dommage de l'évènement tassement dans les zones de plaine

5.5 Phénomène d'altération de la végétation

Comme présenté au paragraphe 3.4, le phénomène d'altération de la végétation a été constaté sur l'ensemble des districts ayant fait l'objet d'une interview. Avec les alternances de périodes de sécheresse, et l'augmentation du nombre et de l'intensité des phénomènes de tempête (vents violents), l'ensemble des gestionnaires d'infrastructure interviewés a constaté l'augmentation du nombre d'intervention pour des problématiques allant de la casse de branche à la chute d'arbres. Suite aux interviews, nous avons décidé de représenter, de manière simplifiée, ce phénomène sur l'outil SIG. Outre l'accroissement des dépenses d'entretien pour l'exploitant, ce phénomène peut être considéré comme un phénomène aggravant pour le phénomène d'érosion et d'instabilité de talus décrit au paragraphe 5.3.

5.5.1 Sensibilité de l'infrastructure

Pour le phénomène d'altération de la végétation, nous n'attribuons pas de note de sensibilité. Ce phénomène sera simplement représenté sur l'outil SIG sur les zones de couvert forestier et les zones des grands talus de déblai ayant fait l'objet d'une végétalisation arbustive.

5.5.2 Intensité du changement climatique

Afin d'illustrer le phénomène de dégradation de la végétation, nous le corrélons directement à l'indice de feu météorologique disponible directement, pour le département de l'Isère sur le site des projections climatiques de Météo-France (voir chapitre 6.2.5). Cet indice est directement disponible pour des horizons proches (2035) à moyen (2055).

Ces indices ont été relevés dans la zone géographique du démonstrateur (Isère) et ont été affectés du coefficient d'intensité présenté dans le tableau ci-dessous :

Années	Zone < 300m d'altitude		Zone < 500m d'altitude		Zone ≥ 500m d'altitude	
	Valeur	Coefficient	Valeur	Coefficient	Valeur	Coefficient
2020	3,34	1	3,30	1	6,42	1
2030	4,17	1.2	3,93	1.2	7,14	1.2
2040	5,34	1.4	4,92	1.4	8,61	1.4
2050	6,5	1.6	5,9	1.6	10,08	1.6

Tableau 13 : Coefficients d'altération de la végétation

5.5.3 Potentiel de dommage

En l'absence de note de sensibilité de l'infrastructure pour les phénomènes d'altération de la végétation, le potentiel de dommage sera représenté directement sur l'outil SIG par un code couleur directement lié à l'intensité du changement climatique pour les zones de couvert forestier. Le code couleur retenu est le suivant :

C _v	1	1.2	1.4	1.6
Couleur	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Potentiel de dommage	Faible	Significatif	Important	Très important

Tableau 14 : Valeur du potentiel de dommage de l'évènement altération de la végétation

6. Prévisions climatiques

6.1 Projections climatiques globales

Il existe de nombreux modèles de simulation climatique. Afin de déterminer les scénarios du futur climat, Météo France met à disposition sur le site www.drias-climat.fr des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires Français de modélisation du climat. Ces scénarios ne sont pas des prévisions précises mais des évolutions possibles en l'état actuel des connaissances.

En complément, ces modèles prennent en compte l'évolution possible des scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Ces scénarios sont proposés par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC). Ils s'appuient sur diverses hypothèses du développement économique futur et de ses conséquences sur l'environnement.

6.2 Données climatiques

Le croisement de l'analyse bibliographique présentée au paragraphe 2 avec les retours d'expérience des exploitants présenté au paragraphe 3 a permis de définir les scénarii d'impact du changement climatique sur le démonstrateur mis en œuvre le long du tracé de l'autoroute A51. Ces scénarii présentés au paragraphe 5 ont permis de définir les variables climatiques nécessaires à la mise en œuvre de l'outil SIG.

Le jeu de données collecté sur le site Drias est basé sur le scénario RCP8.5 (GIEC, AR5, 2014). Le scénario RCP8.5 considère l'absence de mise en œuvre de politique climatique.

Les valeurs retenues correspondent aux valeurs médianes du scénario multimodèle (valeurs établies sur la base de 12 modèles Européens).

Les données sont collectées sur le département de l'Isère en trois points représentatifs des différentes altitudes du démonstrateur.

Les données collectées sont les suivantes :

- Les précipitations quotidiennes extrêmes (mm) ;
- Le nombre de jours de fortes précipitations (NBJ) ;
- Le nombre maximum de jours secs consécutifs (NBJ).

En complément de ces données brutes météorologiques (données statistiques corrigées), le site du Drias de Météo-France propose la publication d'indices calculés sur la base de plusieurs paramètres météorologiques. Les indices collectés sont :

- L'indice de sécheresse et d'humidité des sols (SSWI) ;
- L'indice de feu météorologique.

Les données du Drias sont disponibles pour la période de référence (de 1970 à 2020), et pour trois horizons temporels : L'horizon proche (de 2021 à 2050), l'horizon à moyen terme (de 2041 à 2070) et l'horizon à long terme (de 2071 à 2100). Le SIG réalisé étant destiné à être utilisé par l'exploitant de l'infrastructure seules les données de l'horizon proche et à moyen terme ont été collectées. La donnée correspondant à 2030 (horizon très proche) a été extrapolée des données météorologiques projetées de la donnée de référence à l'horizon proche.

Ces données sont présentées dans les paragraphes ci-après.

6.2.1 Les précipitations quotidiennes extrêmes

La précipitation quotidienne extrême disponible sur le site du Drias correspond à la valeur du cumul de précipitation quotidien correspondant au 99^{ème} centile des précipitations totales annuelles (valeur en mm). Le site du Drias permet également de prévoir le nombre de jours par an où les précipitations quotidiennes dépasseront le 99^{ème} centile des précipitations totales annuelles. Cette donnée sera présentée ci-après pour avoir une estimation de la fréquence des évènements de pluie extrême.

Les figures ci-dessous présentent l'évolution de l'intensité des pluies extrêmes quotidiennes annuelles sur le département de l'Isère pour la période de référence et les horizons proches et moyens :

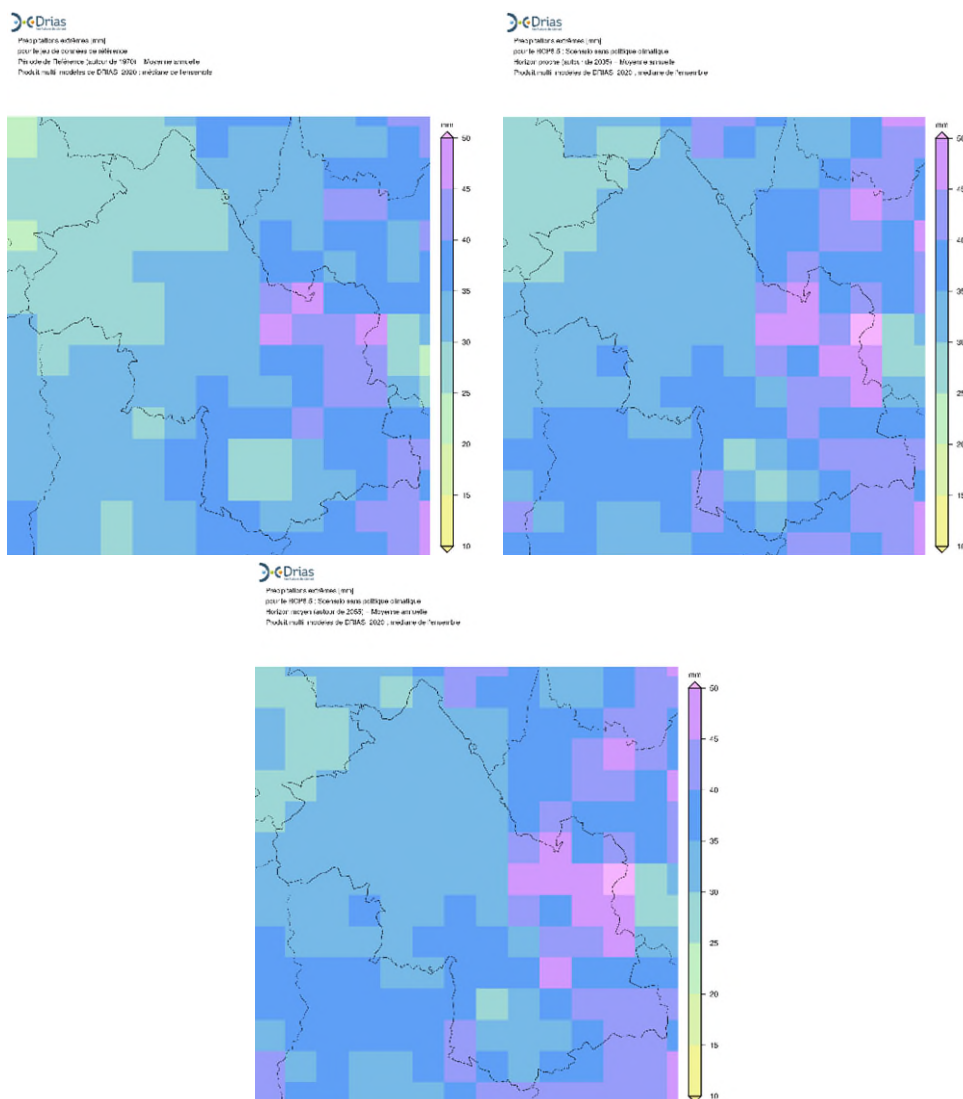


Figure 4 : Pluies extrêmes quotidiennes en mm sur le département de l'Isère sur les périodes de référence, horizon proche et horizon moyen.

Les données numériques précises récoltées sur le site du Drias concernant les précipitations quotidiennes extrêmes sur les différentes zones du démonstrateur sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Années	Zone < 300m d'altitude	Zone < 500m d'altitude	Zone ≥ 500m d'altitude
	Valeur	Valeur	Valeur
2020	33,95 mm	35,17 mm	27,55 mm
2030	34,96 mm	35,93 mm	28,36 mm
2040	35,97 mm	36,69 mm	29,16 mm
2050	36,28 mm	36,80 mm	28,92 mm

Tableau 15 : Valeurs des pluies extrêmes quotidiennes

Le site du Drias permet également de déterminer le nombre de jours annuels de pluies extrêmes. Cependant ce nombre de jour (quatre) semble être considéré comme stable pour l'ensemble des horizons temporels de la présente étude.

6.2.2 Le nombre de jours de fortes précipitations

Le nombre de jours de fortes précipitations correspond au nombre de jours pour lesquels le cumul des précipitations quotidiennes dépasse les 20mm.

Les figures ci-dessous présentent l'évolution du nombre de jours de fortes précipitations sur le département de l'Isère pour la période de référence et les horizons proches et moyens :

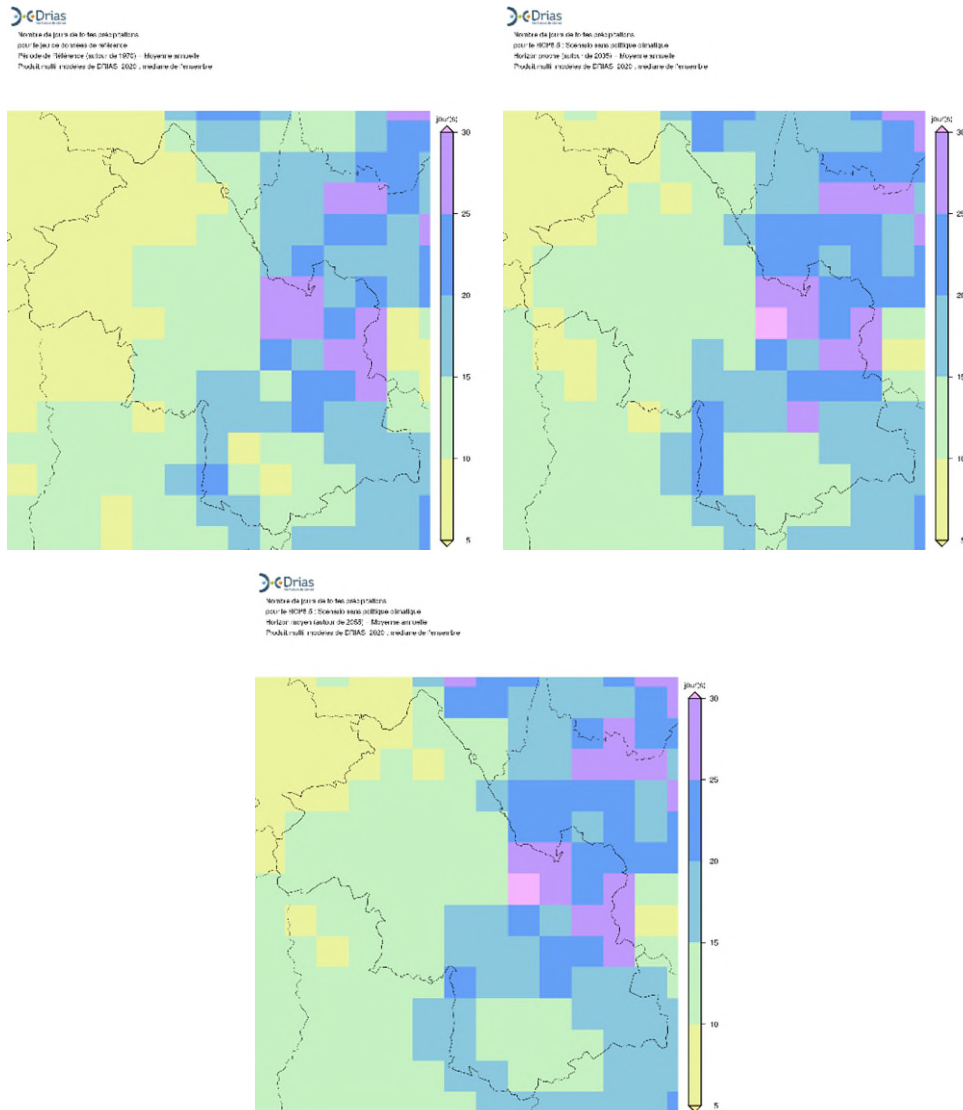


Figure 5 : Nombre de jours de fortes précipitations sur le département de l'Isère sur les périodes de référence, horizon proche et horizon moyen.

Les données numériques récoltées sur le site du Drias concernant le nombre de jours de fortes précipitations sur les différentes zones du démonstrateur sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Années	Zone < 300m d'altitude	Zone < 500m d'altitude	Zone ≥ 500m d'altitude
	Valeur	Valeur	Valeur
2020	17 jours	17 jours	8 jours
2030	18 jours	18 jours	9 jours
2040	19 jours	19 jours	10 jours
2050	17 jours	19 jours	10 jours

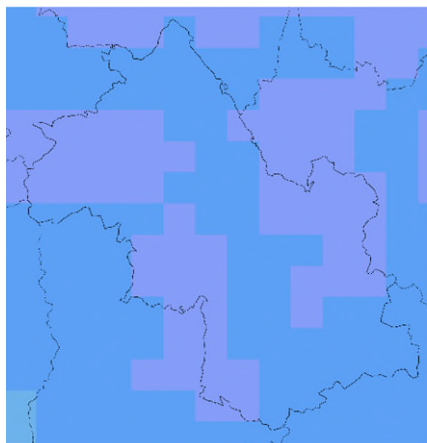
Tableau 16 : Nombre de jours de fortes précipitations sur les différentes zones du démonstrateur

6.2.3 Le nombre maximum de jours secs consécutifs

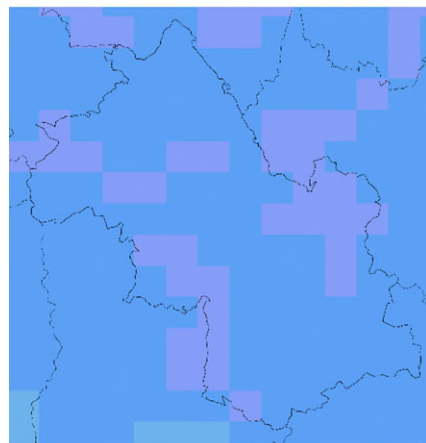
Le nombre maximum de jours secs consécutifs correspond au nombre maximal annuel de jours pour lesquels le cumul des précipitations quotidiennes est inférieur à 1mm.

Les figures ci-dessous présentent l'évolution du nombre de jours secs consécutifs sur le département de l'Isère pour la période de référence et les horizons proches et moyens :

Drias
 Nombre maximum de jours secs consécutifs
 pour le département de l'Isère
 Période de référence (de l'oc. de 1970) - Moyenne annuelle
 Projections issues de ETIAS 2020 - médiane de l'ensemble



Drias
 Nombre maximum de jours secs consécutifs
 pour le département de l'Isère - Scénario moyen climatique (moyenne
 climatique proche (de l'oc. de 2035) - Moyenne annuelle
 Projections issues de ETIAS 2020 - médiane de l'ensemble



Drias
 Nombre maximum de jours secs consécutifs
 pour le département de l'Isère - Scénario moyen climatique (moyenne
 climatique moyen lointain de 2050) - Moyenne annuelle
 Projections issues de ETIAS 2020 - médiane de l'ensemble

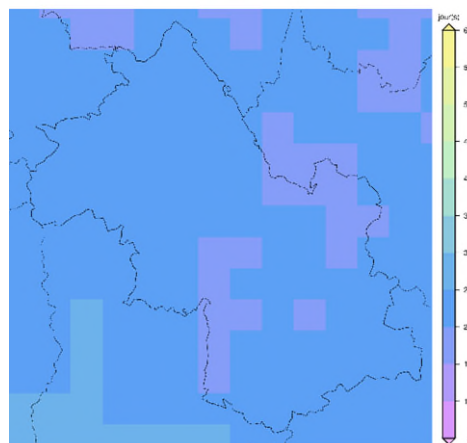


Figure 6 : Nombre maximum de jours secs consécutifs sur le département de l'Isère sur les périodes de référence, horizon proche et horizon moyen.

Les données numériques récoltées sur le site du Drias concernant le nombre maximum de jours secs consécutifs sur les différentes zones du démonstrateur sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Années	Zone < 300m d'altitude	Zone < 500m d'altitude	Zone ≥ 500m d'altitude
	Valeur	Valeur	Valeur
2020	20 jours	21 jours	20 jours
2030	21 jours	21 jours	21 jours
2040	22 jours	21 jours	22 jours
2050	20 jours	20 jours	21 jours

Tableau 17 : Nombre maximum de jours secs consécutifs sur les différentes zones du démonstrateur

6.2.4 L'indice de sécheresse et d'humidité des sols (SSWI)

L'indice de sécheresse et d'humidité des sols (Standardized Soil Wetness Index (SSWI)) développé sur le site du Drias de Météo-France s'inspire des travaux réalisés depuis plusieurs années sur les sécheresses météorologiques (déficits pluviométriques). Il met en relation l'indice d'humidité des sols (SWI) avec les indices de précipitation (SPI) et propose un modèle d'évolution de l'indice de sécheresse et d'humidité des sols pour des horizons proches et moyens.

De manière générale, les résultats des simulations mettent en évidence une augmentation continue des sécheresses du sol en moyenne sur le territoire métropolitain au cours du XXIème siècle. En fin de siècle, les scénarios s'accordent sur des projections du niveau moyen d'humidité des sols correspondant au niveau extrêmement sec de la période de référence 1961-1990.

La figure ci-dessous représente l'évolution de cet indice de la période de référence à l'horizon moyen (autour de 2055) sur le territoire Français. Les cartes détaillées sur le département de l'Isère sont également disponibles. Celles de la France étant suffisamment explicites, il ne nous a pas semblé utile de présenter les cartes plus détaillées au niveau du département de l'Isère.

Indice sécheresse d'humidité des sols (SSWI) du modèle ISBA ,
CLIMSEC-2010 : modèle Arpege-V4.6 étiré de Météo-France

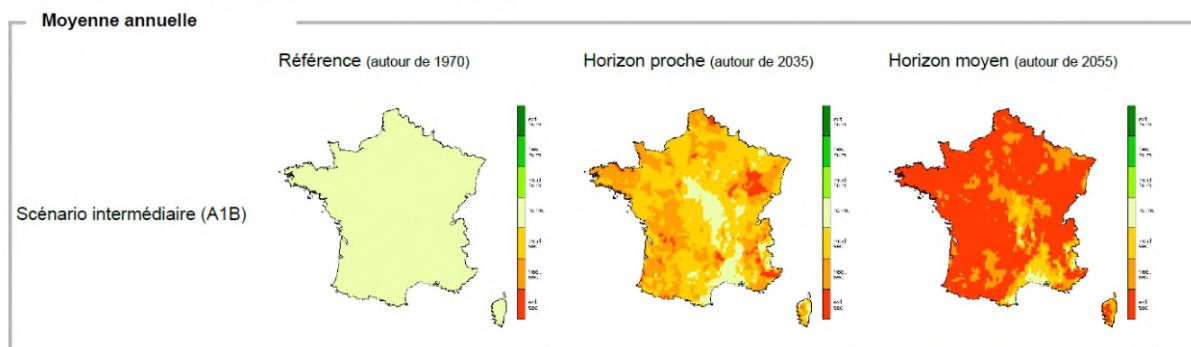


Figure 7 : Evolution de l'indice de sécheresse et d'humidité des sols établi par Météo-France

Les valeurs de l'indice de sécheresse et d'humidité des sols au droit du démonstrateur ont été reportés dans le Tableau 11.

6.2.5 L'indice de feu météorologique

Météo-France a été chargé par le groupe de travail interministériel « impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France » et par la mission sur l'extension éventuelle des zones à risque élevé d'incendie de forêt de caractériser l'évolution passée et future du risque de feu de forêt sur la France.

Les travaux menés par Météo-France s'appuient sur le calcul de l'indice IFM (Indice Feu Météo). Cet indice caractérise, grâce à une valeur numérique, le danger météorologique d'incendie au pas de temps quotidien en synthétisant le danger d'éclosion et le danger de propagation. Le calcul de l'indice IFM s'appuie sur le calcul de différents sous indices. L'état de la végétation est pris en compte par le biais d'une modélisation de son état grâce au suivi des conditions météorologiques durant toute l'année.

C'est pourquoi, dans le cadre de la présente étude, cet indice nous a paru pertinent pour caractériser l'état général de la végétation à proximité du démonstrateur. L'indice retenu dans le cadre de la présente étude est l'indice calculé par Météo-France pour le scénario intermédiaire d'émissions de gaz à effet de serre (scénario A1B). Météo-France précise toutefois que l'on constate une augmentation de l'IFM moyen annuel sur tous les points du territoire pour tous les scénarios et pour toutes les échéances (plus la valeur de l'IFM est élevée, plus les conditions météorologiques sont propices aux incendies).

La figure ci-dessous représente l'évolution de l'indice IFM de la période de référence à l'horizon moyen (autour de 2055) sur le territoire Français. Les cartes détaillées sur le département de l'Isère sont également disponibles. Celles de la France étant suffisamment explicites, il ne nous a pas semblé utile de présenter les cartes plus détaillées au niveau du département de l'Isère.

Indice feu météorologique (IFM),
IFM-2009 : modèle Arpege-V4.6 étiré de Météo-France

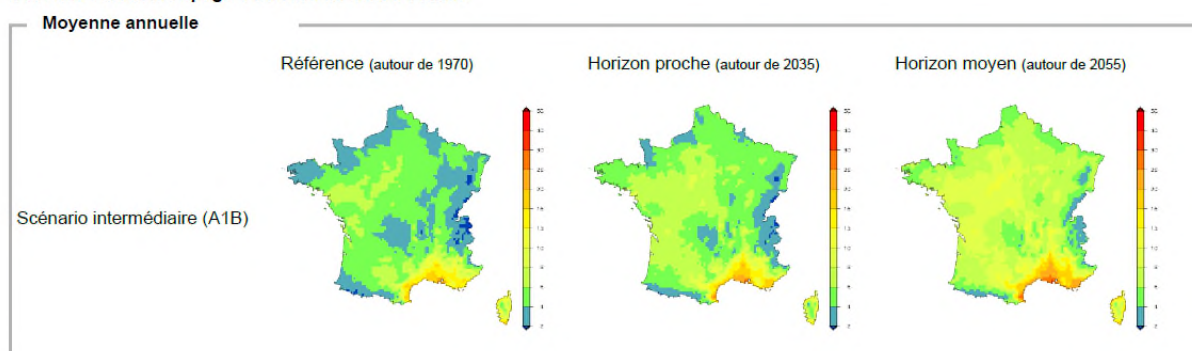


Figure 8 : Evolution de l'indice de feu météorologique établi par Météo-France

Le tableau ci-dessous présente les indices de feu météorologique relevés dans les différentes zones du démonstrateur :

Années	Zone < 300m d'altitude	Zone < 500m d'altitude	Zone ≥ 500m d'altitude
	Valeur	Valeur	Valeur
2020	3,34	3,20	6,42
2030	4,17	3,93	7,14
2040	5,34	4,92	8,61
2050	6,5	5,9	10,08

Tableau 18 : Indice de feu météorologique sur les différentes zones du démonstrateur

7. Conclusion

Le constat partagé que les ouvrages de génie civil des infrastructures linéaires sont de plus en plus affectés par les effets du changement climatique nous a permis d'initier et de mettre en œuvre le projet de recherche « Méthodologie d'Analyse de la Résilience des Infrastructures au Changement Climatique (MARI-CC) ».

Ce projet a permis aux sociétés partenaires Egis et APRR, respectivement concepteur et gestionnaire d'infrastructure de transport de mener une action de recherche collaborative conduisant à la mise en œuvre d'un outil SIG permettant de localiser et visualiser les impacts prévisibles du changement climatique sur une infrastructure existante.

Les actions de recherche et développement menées dans le cadre du projet MARI-CC nous ont permis de dresser un état de l'art des travaux de recherche et de définition de méthodologies engagés dans de nombreux pays visant à rendre plus résilientes leurs infrastructures de transport aux effets du changement climatique.

La contribution de personnes en charge de l'exploitation du réseau APRR nous a permis de constater que les évolutions du climat étaient déjà partagées. Les conséquences sur les infrastructures et les habitudes d'entretien constituent un sujet déjà initié de manière « instinctive » par les équipes en charge de la viabilité.

La recherche de données pour la mise en œuvre de l'outil SIG conduit à constater que la mise en œuvre d'un tel outil était aujourd'hui possible à l'aide de données de prévisions climatiques disponibles et libres de droit. Ce sujet est en effet largement étudié et mis en lumière par les travaux du GIEC définissant les scénarii d'émission de gaz à effet de serre servant d'entrant aux experts en étude du climat. Il s'avère que les méthodes de conception des infrastructures souvent basées sur les mesures / observations du passé pourraient être remises en cause par les données prévisionnelles d'évolution du climat.

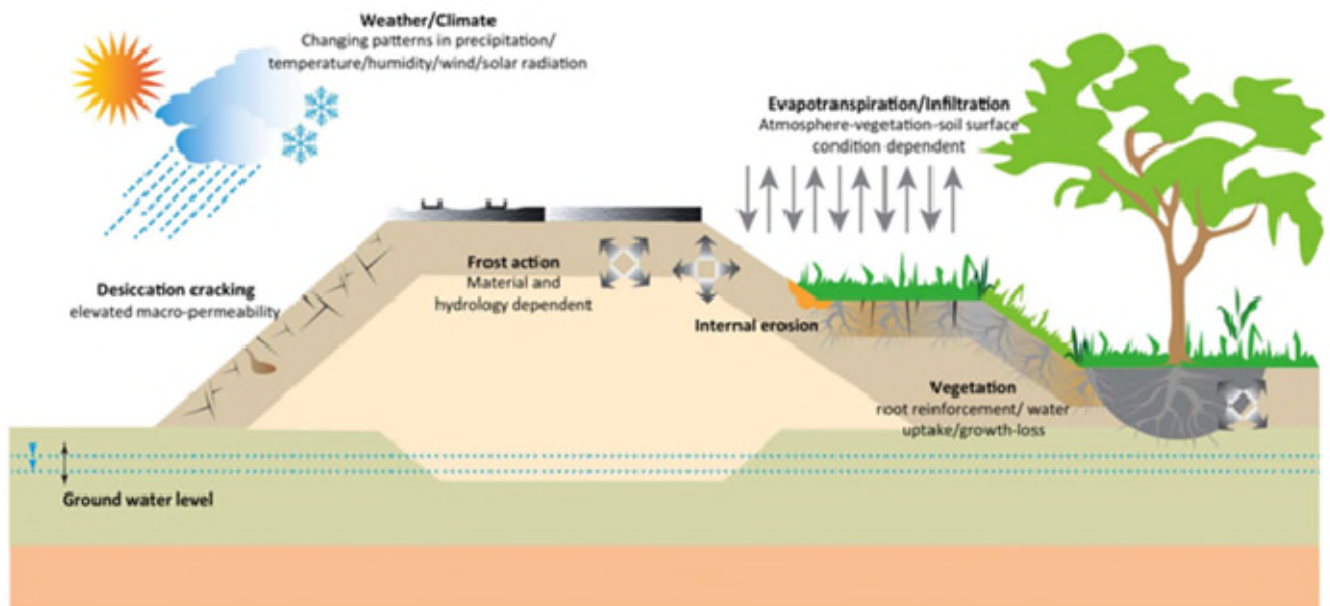
Enfin, la mise en œuvre d'une méthodologie et d'un outil SIG associé, sur la base d'un démonstrateur simplifié conduit à constater que les impacts du changement climatique tendront à s'amplifier et à s'étendre dans le futur.

ANNEXES

Annexe 1 : Rapport d'analyse bibliographique

Projet de recherche MARI-CC

Méthodologie d'analyse de la résilience des infrastructures au changement climatique



Analyse Bibliographique

Rapport :

N° 0001/2020

Etabli le :	15/06/20	LJa/DAI/YEn
Révisé le :	-	Version : 2
N° chrono :	GEO-2011-001329	NB de pages : 44

Egis Géotechnique

Egis Géotechnique est une marque de la société Egis Structures & Environnement



Ingénierie du sol & des matériaux



Contrôle qualité

Indice	Date	Modifications / Commentaires	Nom/ Visa Rédacteur	Nom/ Visa Vérificateur	Nom/ Visa Approbateur
1	15/06/20		Louis Janodet	Yves Ennesser	
2			Louis Janodet		

Destinataires

Nom	Organisme	Date d'envoi

Votre contact :

Mr. Louis Janodet

louis.janodet@egis.fr

Tél : +33 4 76 48 88 68

Egis Géotechnique

Direction Grenoble

3, rue du Docteur Schweitzer
38180 Seyssins

Tél : +33 (0)4 76 48 47 48
Fax : +33 (0)4 76 48 44 47
dominique.allagnat@egis.fr

Paris

15, avenue du Centre
CS 20538 Guyancourt
78286 Saint-Quentin-En-Yvelines
Cedex

Tél : + 33 (0)1 39 41 51 33
Fax : + 33 (0)1 39 41 57 49
francois.depardon@egis.fr

Lille

40, avenue de la Marne
BP 87
59442 WASQUEHAL Cedex

Tél : + 33 (0)1 39 41 51 33
Fax : + 33 (0)1 39 41 57 49
laurent.beeuwsaert@egis.fr

Toulouse

33-43, avenue Georges
Pompidou
Bâtiment D – BP 13115
31131 BALMA Cedex
Tél : + 33 (0)5.62.18.19.77
Fax : + 33 (0)5.62.18.19.71
vincent.savatier@egis.fr

Lyon

Le Carat
168-170 Avenue Thiers
69455 Lyon Cedex 06

Tél : + 33 (0) 4 37 72 40 50
lionel.demongodin@egis.fr

Sommaire

1.	Objet	1
2.	Synthèse de l’analyse bibliographique	1
3.	Principaux guides Méthodologiques	2
3.1	Projet RIMAROCC	2
3.2	Projet RoadApt	4
3.3	Projet GERICI.....	6
3.4	Le guide UK Highways Agency Framework (HAF).....	8
3.5	Le guide US Federal Highway Administration (FHWA).....	9
3.6	Le guide WSDOT Vulnerability Assessment Method.....	11
3.7	La méthode AIPCR	13
3.8	La méthode « Lebanon Landslide Hazard Framework »	17
3.9	Le guide « Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat ».....	19
4.	Publications sur les effets du climat sur les infrastructures	26
4.1	Effets du changement climatique sur les chaussées routières	26
4.2	Prise en compte de l’environnement dans la conception des remblais et des déblais en sols fins	26
4.2.1	Effets de l’environnement hydrique sur les remblais	26
4.2.2	Effets de l’environnement hydrique sur les déblais	28
4.3	Failure of infrastructure embankments induced by flooding and seepage: a neglected source of hazard	28
4.4	Climate impacts on flood and coastal erosion infrastructure	29
4.5	Failures in transport infrastructure embankments	30
4.6	Management and maintenance of infrastructure slopes: development of a multi-scalar approach & The impact of climate change on infrastructure slopes, with particular reference to southern England	31
4.7	Impact of climate change on deteriorated US Bridge	31
4.8	Autres publications	32
4.8.1	Challenges in monitoring and managing engineered slopes in a changing climate.....	32
4.8.2	The influence of desiccation fine fissuring on the stability of flood embankments.....	32

4.8.3	Reducing the risk of embankment failure under extreme conditions, a framework for action	33
5.	Quelques études de cas.....	33

Liste des annexes

Annexe 1 : Liste des publications

Liste des figures

Figure 1 : Exemple de carte de vulnérabilité à l'érosion	5
--	---

Liste des schémas

Schéma 1 : illustration de la méthode RIMAROCC.....	3
Schéma 2 : illustration de la méthode RoadApt.....	5
Schéma 3 : synthèse du projet GERICI.....	7
Schéma 4 : Synthèse de la procédure HAF	9
Schéma 5 : Synthèse du processus FHWA.....	11
Schéma 6 : Synthèse de la procédure WSDOT	13
Schéma 7 : Synthèse de l'approche climatologique de la méthode AIPCR.....	16
Schéma 8 : Synthèse de la procédure « Lebanon Hazard Framework »	19
Schéma 9 : Illustration de la méthodologie établie dans « Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat »	21
Schéma 10 : Logigramme de l'analyse de risque proposé par le guide du CEREMA	24

Liste des tableaux

Tableau 1 : étapes clé de la méthode RIMAROCC	3
Tableau 2 : Méthode AIPCR : Approche couplée climatologique et géomorphologique	17
Tableau 3 : Aléas climatiques considérés dans le guide du CEREMA.....	22
Tableau 4 : Echelle de classement des aléas en 4 niveaux proposée dans le guide du CEREMA	23
Tableau 5 : Exemple de tableau de définition du niveau de risque proposé par le guide CEREMA	25
Tableau 6 : Synthèse des impacts sur les ouvrages hydrauliques en fonction des aléas climatiques (P. Sayers et R. Dawson, 2014).	30

Acronymes et abréviations

AIPCR	Association international permanente des Congrès de la Route – Association mondiale de la route
CEDR	Conference of European Directors of Roads
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
ERA-NET	European Research Area Network
GERICI	Gestion des Risques liés aux Changements Climatiques pour les Infrastructures
HAF	Highways Agency Framework
MARI-CC	Méthodologie d'analyse de la résilience des infrastructures au changement climatique
RIMAROCC	Risk Management for Roads in a Changing Climate
ROADAPT	Roads for today, Adapted for tomorrow
SIG	Système d'Information Géographique
UK	United Kingdom
US	United States
WSDOT	Washington State Department of Transportation
ERT	Tomographie de résistivité électrique

1. Objet

Plusieurs pays ont déjà réalisé des analyses de vulnérabilité de leur infrastructure routière et ont déjà fait des tentatives d'établissement de cartographies des zones vulnérables. Chacun de ces pays ont appliqué des méthodes différentes en fonction des données disponibles.

Le but de la présente analyse bibliographique est de passer en revue les méthodologies utilisées dans ces différents pays afin de déterminer lesquelles pourraient servir de base à celle en cours d'établissement dans le cadre du projet MARI-CC.

2. Synthèse de l'analyse bibliographique

Huit guides méthodologiques ont été analysés dans le cadre de la présente analyse bibliographique. Ces guides méthodologiques qui ont été établis dans le but de fournir des méthodes d'analyse les plus complètes et adaptables possible dans leur pays d'établissement constituent la partie 'échelle macroscopique' de notre analyse bibliographique. Chacun de ces guides ont fait l'objet de fiches descriptives présentées au chapitre 3.

Les guides méthodologiques analysés dans le cadre de la présente revue sont :

- RIMAROCC et ROADAPT qui sont les principales approches méthodologiques développées en Europe ;
- GERICI qui est le premier outil à avoir été développé pour la gestion du risque climatique sur les infrastructures ;
- Le « UK Highways Agency Framework » (HAF) qui a fortement influencé le guide RIMAROCC et qui est actuellement le seul guide à avoir été appliqué à un niveau national ;
- Le guide « US Federal High-way Administration » qui est une synthèse des retours d'expérience aux Etats-Unis sur le sujet du changement climatique ;
- Le guide « WSDOT Vulnerability Assessment Method » qui est l'application du guide FHWA à l'état de Washington ;
- La méthode AIPCR plus récente (2015) et qui a été établie comme une synthèse des approches jugées les plus intéressantes à l'échelle mondiale ;
- La méthode « Lebanon Landslide Hazard Framework » qui a été développée dans le but d'établir une méthode transposable à un outil SIG ;
- Le guide CEREMA « Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat » dernier né des guides méthodologiques puisque publié en novembre 2019.

En complément de ces guides méthodologiques, quelques études de cas ont été analysées. Ces études de cas qui comprennent notamment des applications de certaines de ces méthodes à des échelles nationales (Maroc, îles Samoa) ainsi que le travail d'analyse de la vulnérabilité du réseau routier au changement climatique mené par Egis pour le compte de la banque mondiale dans la région de Racha en Géorgie en août 2017 ne seront pas détaillées dans la présente note.

Enfin, dans le but d'améliorer les estimations de vulnérabilité des infrastructures au changement climatique, quelques publications sur les effets du climat sur les infrastructures ont été analysées. Ces publications établies sur les phénomènes impactant les infrastructures à l'échelle microscopique sont décrites brièvement au chapitre 4.

3. Principaux guides Méthodologiques

3.1 Projet RIMAROCC

<i>Agence / Auteurs :</i>	ERA-NET ROAD / SGI, EGIS, Deltares, NGI
<i>Titre :</i>	RIMAROCC : Risk Management for Roads in a Changing Climate
<i>Date de publication :</i>	2010
<i>Type :</i>	Guide Méthodologique
<i>Infrastructures :</i>	Parties de routes ou d'autoroutes (ouvrages), sections ou réseau
<i>Zone géographique :</i>	Réseaux routiers Européens
<i>Evènements météorologiques considérés :</i>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pluies extrêmes ; ■ Pluviométrie annuelle et saisonnière ; ■ Montée du niveau des mers ; ■ Températures maximales et périodes de canicule ; ■ Sècheresse ; ■ Chutes de neige ; ■ Gel ; ■ Dégel ; ■ Vents extrêmes ; ■ Jours de brouillard.
<i>Objectifs :</i>	Le guide RIMAROCC est une procédure qui permet de prendre en compte les effets du changement climatique dans la conception ou l'entretien des routes.
<i>Description :</i>	La méthode RIMAROCC a été développée en plusieurs étapes. En premier lieu des facteurs climatiques critiques ont été identifiés dans la bibliographie et avec l'aide d'experts en climatologie. Une revue de différentes méthodes a ensuite été réalisée. Enfin, des critères de risques et des indicateurs ont été établis. Le guide RIMAROCC a ensuite été rédigé et testé dans différents cas en France, en Norvège, en Suède et au Danemark à différentes échelles géographiques : de l'ouvrage à la section routière (20

à 50km de longueur), au réseau (100 à 1000 km de routes secondaires) et au territoire (échelle de la région).

La méthode proposée est un processus cyclique qui permet d'améliorer en continu la performance du réseau et de tirer profit des expériences passées. Cela commence par l'analyse du contexte général au cours de laquelle les critères de risque sont établis, passe par des étapes de définition et de mise en œuvre d'ouvrages permettant la réduction des risques identifiés et termine par une étape de suivi des effets du plan d'action pour capitaliser de nouveaux retours d'expérience.

Le tableau ci-dessous présente les étapes clés et leurs subdivisions :

Key steps	Sub-steps
1. context analysis	1.1 Establish a general context
	1.2 Establish a specific context for a particular scale of analysis
	1.3 Establish risk criteria and indicators adapted to each particular scale of analysis
2. risk identification	2.1 Identify risk sources
	2.2 Identify vulnerabilities
	2.3 identify possible consequences
3. risk analysis	3.1 Establish risk chronology and scenarios
	3.2 Determine impact of risk
	3.3 Evaluate occurrences
	3.4 Provide a risk overview
4. risk evaluation	4.1 Risk prioritisation
	4.2 Compare climate risk to other kinds of risk
	4.3 Determining which risks are acceptable
5. risk mitigation	5.1 Identify options
	5.2 Appraise options
	5.3 Negotiating with funding agencies
	5.4 Present action plans
6. implementation of action plans	6.1 Develop and action plan on each level of responsibility
	6.2 Implement adaptation plan
7. monitor, re-plan and capitalise	7.1 Regular monitoring and review
	7.2 Re-plan in case of new data or delay in implementation
	7.3 Capitalisation on return of experience on both climatic events and progress of implementation

Tableau 1 : étapes clé de la méthode RIMAROCC

Le schéma ci-dessous illustre la méthode :

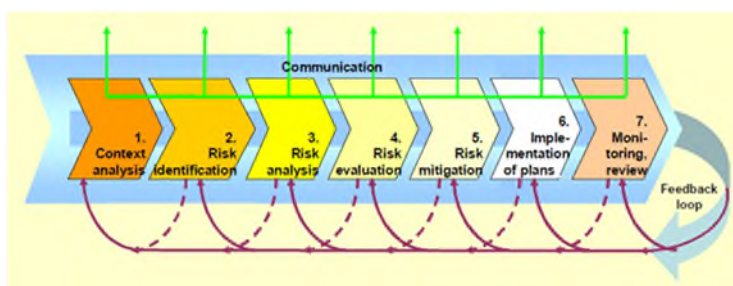


Schéma 1 : illustration de la méthode RIMAROCC

3.2 Projet RoadApt

<i>Agence / Auteurs :</i>	Conference of the European Directors of Roads (CEDR) / Deltares, Egis, SGI, KNMI
<i>Titre :</i>	RoadApt : Roads for today, adapted for tomorrow
<i>Date de publication :</i>	2014
<i>Type :</i>	Boite à outils
<i>Infrastructures :</i>	Ouvrages de routes ou autoroutes, section ou réseau
<i>Zone géographique :</i>	Réseaux routiers Européens
<i>Evènements météorologiques considérés :</i>	Risques majeurs associés aux conditions climatiques (identiques à ceux du guide RIMAROCC)
<i>Objectifs :</i>	<p>Il s'agit d'une procédure basée sur le schéma RIMAROCC mais qui se veut plus compacte, avec moins d'étapes notamment pour les phases d'analyse de risque.</p> <p>Les livrables du projet RoadApt sont une série de 5 guides de recommandations qui peuvent être utilisés séparément.</p>
<i>Description :</i>	<p>Les 5 guides du projet RoadApt peuvent être décrits comme suit :</p> <p>Guide A : <i>Changement climatique</i></p> <p>Il permet de choisir les informations climatiques pertinentes pour étudier l'effet du climat (et du changement climatique) sur les routes. Il permet notamment d'identifier les menaces potentielles en fonction du contexte et des objectifs de l'études.</p> <p>Guide B : <i>QuickScan</i></p> <p>C'est un guide pour une étude préliminaire ou sommaire qui est principalement basée sur le guide RIMAROCC. Elle a pour but de donner une première évaluation (grossière parce que surtout qualitative) du risque et des mesures à prendre pour les supprimer ou réduire. Elle permet aussi d'identifier les risques requérant plus d'attention et de les traiter plus spécifiquement en prenant en compte toute la procédure Rimarocc.</p> <p>Guide C : <i>Analyse de la vulnérabilité</i></p> <p>Le guide C présente les outils existant qui permettent d'évaluer la vulnérabilité des routes vis-à-vis d'un risque particulier. Il propose également une méthode d'évaluation basée une fois de plus sur la méthode Rimarocc. Ces différentes méthodes permettent de calculer un indice de vulnérabilité pour une menace donnée.</p>

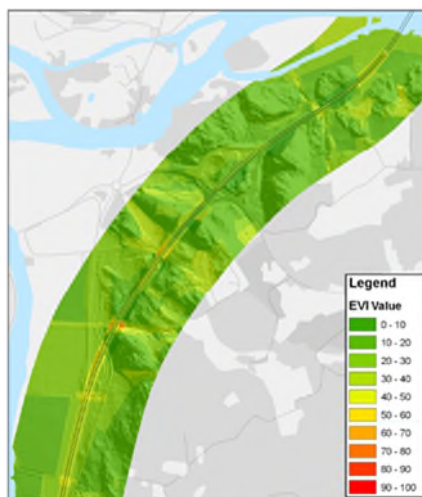


Figure 1 : Exemple de carte de vulnérabilité à l'érosion

Guide D : *Impacts socio-économiques*

Il permet de déterminer l'impact socio-économique d'une menace donnée. Le guide est basé sur la production du projet Français GERICI et sur la procédure RIMAROCC.

Guide E : *Mesures d'adaptation et stratégies*

Ce guide présente un ensemble de mesures d'adaptation et aide à la définition d'une stratégie d'adaptation du réseau à la menace climatique. Le guide s'appuie sur la base de donnée RoadApt qui comprends plus de 500 mesures d'adaptation sur les sujets géotechnique, drainage, chaussées et gestion de trafic.

Le schéma ci-dessous illustre la méthode :

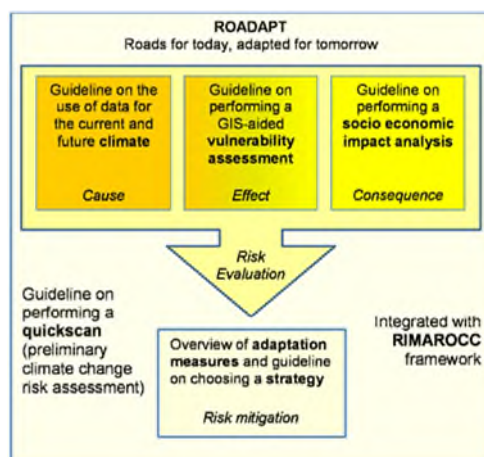


Schéma 2 : illustration de la méthode RoadApt

3.3 Projet GERICI

<i>Agence / Auteurs :</i>	Ministère des transports / Egis, Sanef, ASF, Météo-France, LCPC, Esri France
<i>Titre :</i>	GeRiCi : Gestion des Risques liés aux Changements climatiques pour les Infrastructures
<i>Date de publication :</i>	2007
<i>Type :</i>	Outil SIG
<i>Infrastructures :</i>	Sections de routes ou d'autoroutes
<i>Zone géographique :</i>	Local / pays développés
<i>Risques climatiques considérés :</i>	Inondations, variations des températures, feux de forêts, pluies, chutes de neige, vents
<i>Objectifs :</i>	Analyse de risque
<i>Description :</i>	<p>Sur la base d'une analyse de risque, le projet GERICI a développé un modèle SIG pour mesurer la vulnérabilité des ouvrages sensibles d'une infrastructure (initialement établie pour les autoroutes). Sur la base d'une analyse socio-économique, l'outil GERICI apporte une assistance aux maîtres d'ouvrages leur permettant de structurer et de définir les priorités pour leurs investissements. Dans le cadre de la prévision d'un événement météorologique extrême, l'outil GERICI permet de définir des scénarii permettant de prendre les mesures d'urgence nécessaires en collaboration avec les services d'urgence. De ces analyses, une expertise s'est progressivement développée permettant de déterminer la vulnérabilité d'une route puis d'un réseau routier.</p> <p>Chaque éléments d'une route ou d'une autoroute a fait l'objet d'une analyse détaillée conduite par un expert dans le but d'en définir la vulnérabilité face aux événements météorologiques extrêmes. Sept domaines ont été analysés :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Les grands ouvrages hydrauliques ; ■ Les petits ouvrages hydrauliques (bassins versants < 2 km²) et les réseaux d'assainissements ; ■ Les ouvrages ; ■ Les équipements ; ■ Les ouvrages géotechniques ; ■ L'environnement, et ■ Les chaussées.

Chacun de ces domaines qui composent l'infrastructure ont été classés en familles selon leur degré de sensibilité à un même évènement météorologique.

Le niveau d'intensité considéré pour chaque évènement climatique a été classé en trois parties :

- Le niveau de dimensionnement ;
- Le niveau critique ;
- Le niveau pouvant conduire à la rupture.

Ces notions pré-définies ont été structurées sous la forme d'un outil SIG sur lequel peuvent être appliqués des évènements météorologiques. Selon l'intensité des évènements renseignés chaque élément réagit en donnant une réponse liée à un code couleur qui permet de déterminer la réponse de l'infrastructure à l'évènement météorologique.

Le schéma ci-dessous permet d'illustrer la méthode :

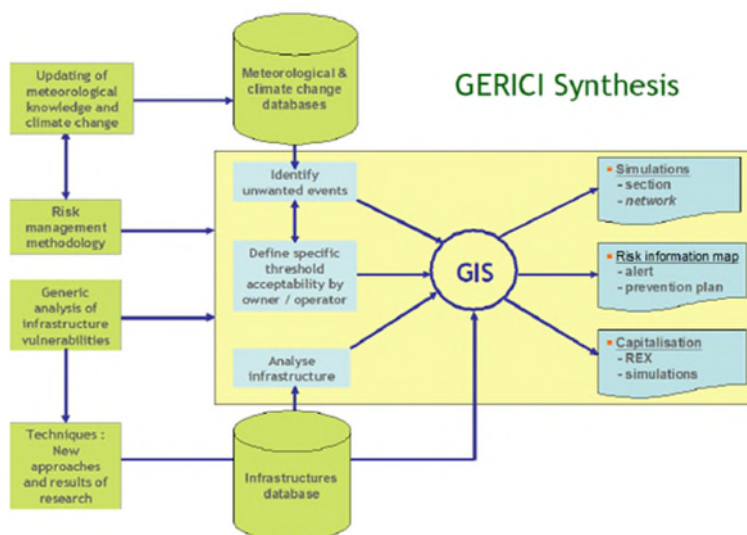


Schéma 3 : synthèse du projet GERICI

3.4 Le guide UK Highways Agency Framework (HAF)

<i>Agence / Auteurs :</i>	Highways Agency / Cranfield University
<i>Titre :</i>	Climate Change Risk Assessment
<i>Date de publication :</i>	Août 2011
<i>Type :</i>	Méthodologie, guide technique
<i>Infrastructure :</i>	Ouvrage routier ou autoroutier, section ou réseau
<i>Zone géographique :</i>	UK, pays développés
<i>Risques climatiques considérés :</i>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Augmentation de la température moyenne ; ■ Augmentation de la température maximale ; ■ Augmentation des précipitations en hiver ; ■ Réduction des précipitations en été ; ■ Augmentation de la fréquence des pluies extrêmes ; ■ Augmentation des vitesses de vent ; ■ Augmentation du niveau de la mer.
<i>Objectifs :</i>	<p>Le but de cette analyse de risque est de permettre à l'agence des autoroutes de prioriser les menaces liées au changements climatique en déterminant la vulnérabilité des biens en fonction d'un certain nombre de critères. Cet outil aide l'agence à planifier les opérations d'entretien et d'investissements en prenant en compte les prévisions d'évolution du climat.</p>
<i>Description :</i>	<p>Le guide fourni un procédé permettant d'identifier les activités de l'agence des autoroutes qui pourront être affectées par le changement climatique. Il détermine les risques et opportunités et identifie les principaux points à changer dans les normes, les recommandations et les procédures d'entretien mises en places par l'agence.</p> <p>En premier lieu le guide définit des vulnérabilités. Ces vulnérabilités sont basées sur des changements climatiques identifiés et sur la façon dont ont été dimensionnés et entretenus les ouvrages.</p> <p>Une liste des vulnérabilités a ainsi été établie. Elle a permis de déterminer que plus de 80 activités en cours de l'agence des autoroutes pourraient être affectées par le changement climatique.</p> <p>Une seconde étape consiste à augmenter l'ampleur des changements climatiques déjà identifiés. En procédant ainsi, il s'est avéré que la majorité des ouvrages de l'agence pourraient être matériellement affectés par les effets du changement climatique.</p>

Ce procédé d'augmentation du risque climatique permet ainsi de déterminer quels sont les ouvrages à traiter en priorité afin d'adapter le réseau au changement climatique.

Le schéma ci-dessous permet d'illustrer la méthode :

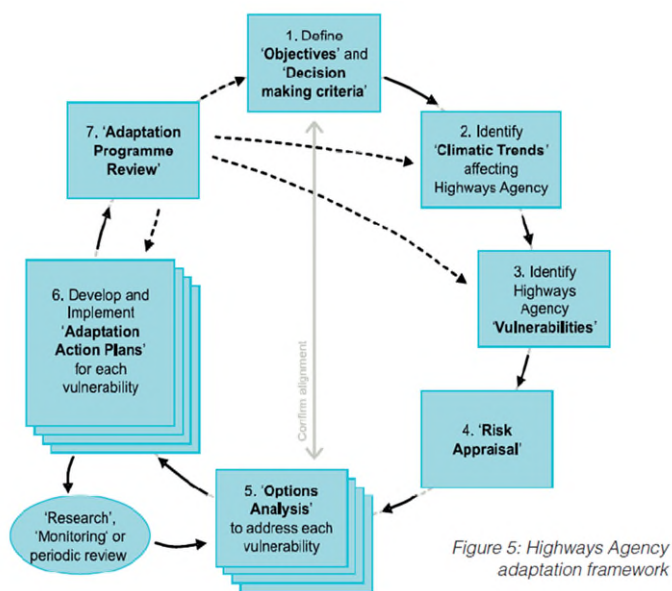


Figure 5: Highways Agency adaptation framework

Schéma 4 : Synthèse de la procédure HAF

3.5 Le guide US Federal Highway Administration (FHWA)

<i>Agence / Auteurs :</i>	FHWA / ICF International
<i>Titre :</i>	Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework
<i>Date de publication :</i>	Décembre 2012
<i>Type :</i>	Méthodologie, guide technique
<i>Infrastructure :</i>	Tout type d'infrastructure de transport
<i>Zone géographique :</i>	Etats-Unis, pays développés
<i>Risques climatiques considérés :</i>	Température, précipitations extrêmes, niveau de la mer et tempêtes côtières, fonte du permafrost (Alaska).
<i>Objectifs :</i>	Le guide technique de détermination de la vulnérabilité des infrastructures au changement climatique et événements météorologiques extrêmes est un guide et une collection de retours d'expériences à utiliser lorsque l'on analyse les effets du changement climatique sur les infrastructures de

transport. Son but est d'identifier les principaux points d'intérêts, questions et données à utiliser pour réaliser une étude de vulnérabilité.

Les méthodes, retours d'expérience et données présentées dans le guide ont été rassemblées des agences de transport de différents états (State Departments of transportation (DOTs), Metropolitan Planning Organizations (MPOs) et autres).

Le guide comprend des suggestions, des exemples applicables à un large champ d'applications, de la petite étude qualitative à la plus grande et détaillée étude de données.

Description :

Le guide est composé de trois principales étapes :

La première de ces étapes est la définition des objectifs de l'étude de vulnérabilité. Sur la base de ces objectifs les principaux risques peuvent être identifiés de même que les variations climatiques à analyser. Cette étape permet de fixer les limites de l'analyse et d'éviter de traiter des quantités de données trop importantes et peu pertinentes.

La seconde de ces étapes consiste à la définition de la vulnérabilité des infrastructures de transport aux changements climatiques et aux événements météorologiques extrêmes. Les étapes de cette analyse de vulnérabilité incluent : collecter les données climatiques relatives à l'emplacement de l'infrastructure, collecter les données passées sur le climat et les prévisions d'évolution, combiner les caractéristiques de l'infrastructure et les données climatiques pour identifier les vulnérabilités et, si possible affecter un niveau de risque des impacts climatiques sur l'infrastructure. Le travail sur la vulnérabilité peut être itératif, les données récoltées sur l'infrastructure peuvent alimenter le besoin en données climatiques et vice versa.

La dernière étape du guide est l'incorporation des résultats de l'étude de vulnérabilité dans le processus décisionnel de l'agence de transport. Il consiste en la définition de plans de réduction du risque climatique, en la priorisation de projets d'infrastructures et la mise en œuvre de travaux d'adaptation des infrastructures existantes.

Le schéma ci-dessous permet d'illustrer la méthode :

CLIMATE CHANGE AND EXTREME WEATHER VULNERABILITY ASSESSMENT FRAMEWORK

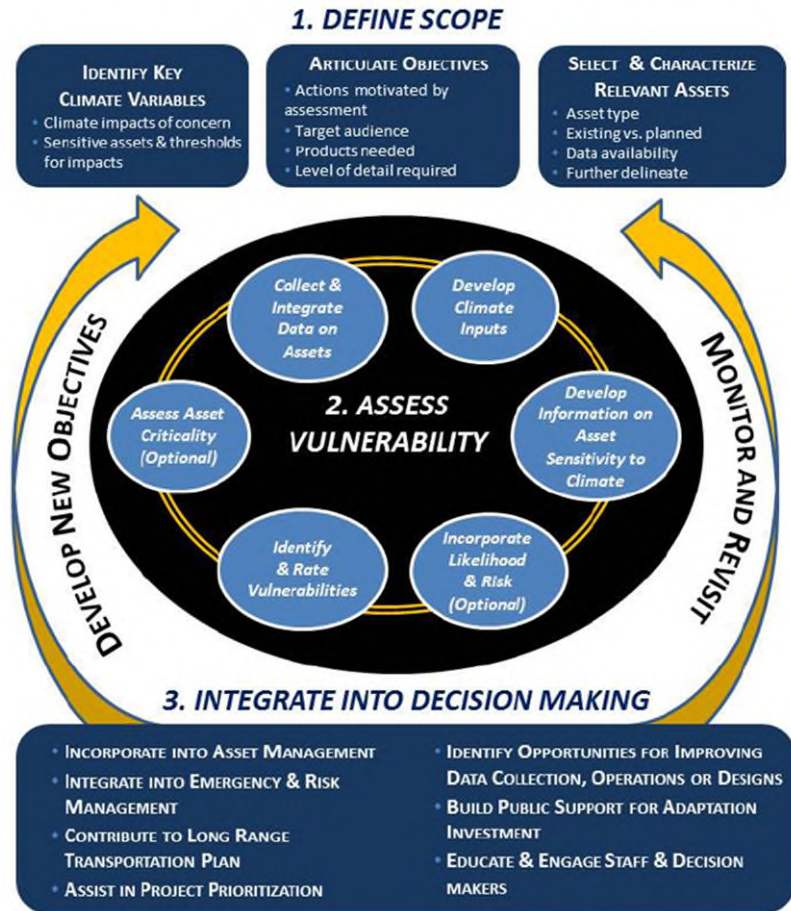


Schéma 5 : Synthèse du processus FHWA

3.6 Le guide WSDOT Vulnerability Assessment Method

<i>Agence / Auteurs :</i>	Washington State Department of Transportation
<i>Titre :</i>	Climate Impacts Vulnerability Assessment
<i>Date de publication :</i>	Novembre 2011
<i>Type :</i>	Méthodologie, guide technique
<i>Infrastructure :</i>	Tout type d'infrastructure de transport
<i>Zone géographique :</i>	Etat de Washington, pays développés

Risques climatiques considérés :

L'état de Washington peut être exposé aux impacts suivants liés au changement climatique :

- Augmentation des températures ;
- Augmentation des précipitations saisonnières ;
- Baisse de l'enneigement ;
- Changement des flux saisonniers ;
- Augmentation du niveau de la mer ;
- Augmentation des hauteurs de houle.

Objectifs :

Le rapport du WSDOT a été rédigé selon les recommandations du guide Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework du FHWA afin de tester la méthode fédérale.

Description :

Ce rapport a été rédigé par le WSDOT suivant la méthodologie du FHWA décrite ci-avant afin de tester le modèle d'analyse du risque climatique sur ses infrastructures de transport.

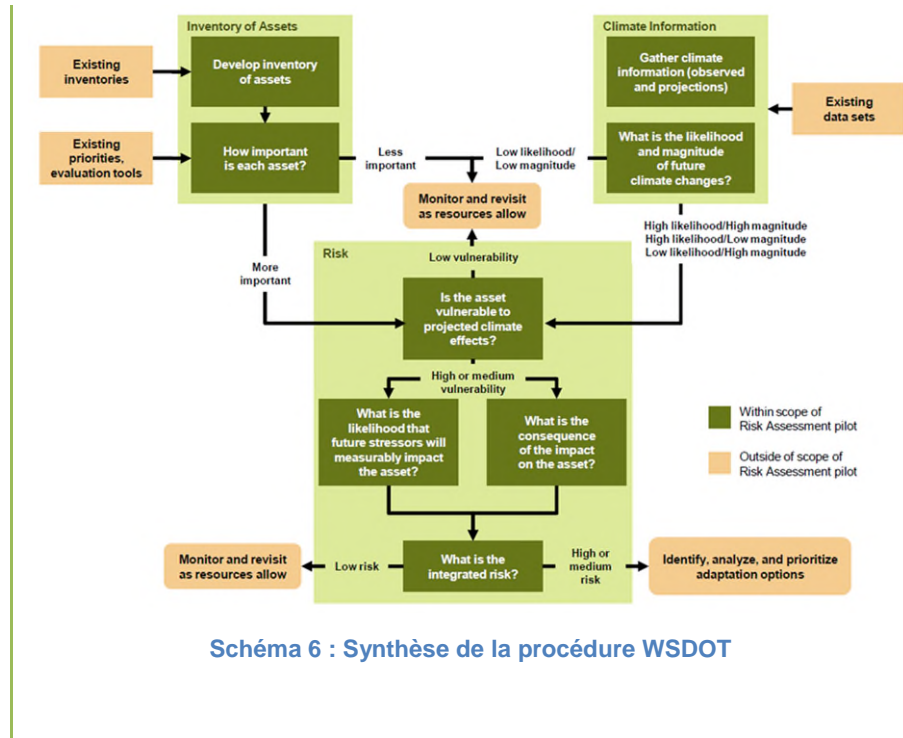
Les éléments clés du rapport peuvent être listés comme suit :

- WSDOT a recensé ses infrastructures sur la base d'un SIG. Les données climatiques ont été fournies par les scientifiques de l'université de Washington ;
- WSDOT a choisi de réaliser une analyse qualitative car il s'agissait d'une première revue de ses infrastructures et de leur vulnérabilité. L'approche qualitative a été favorisée car les informations sur l'évolution du climat étaient limitées ou s'exprimaient seulement sous la forme d'intuitions ou d'opinions subjectives. Cette analyse qualitative a pu rapidement être mise en place comparée au délai qui aurait été requis pour établir une approche quantitative.

Le rapport du WSDOT a suivi les trois étapes de la méthodologie fédérale (FHWA) telles que décrites au chapitre 3.5 :

- Première étape : recensement des infrastructures et définitions des conditions environnementales ;
- Seconde étape : définition des critères qualitatifs pour une première analyse de vulnérabilité ;
- Troisième étape : détermination de la vulnérabilité des infrastructures.

Le schéma ci-dessous permet d'illustrer la méthode :



3.7 La méthode AIPCR

Agence / Auteurs :

Association mondiale de la route / AECOM

Titre :

Vulnérabilité des infrastructures géotechniques au changement climatique et mesures d'adaptation selon le contexte géographique

Date de publication :

2015

Type :

Outil et guide méthodologique

Infrastructure :

Réseaux routiers et ouvrages géotechniques

Zone géographique :

Peut être appliqué pour tous les pays à toutes les échelles (nationale, régionale, locale ou ouvrages spécifiques)

Risques climatiques considérés :

- Augmentation générale des températures moyennes ;
- Diminution des précipitations moyennes ;
- Augmentation des précipitations en période hivernale dans certaines régions ;
- Augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes ;
- Augmentation de l'intensité des tempêtes.

Objectifs :

Il s'agit d'un guide méthodologique qui vise à évaluer les effets du changement climatique sur les routes. Ce guide combine deux approches : une approche climatologique et une approche géomorphologique.

Description :

Le guide AIPCR propose une méthodologie pour étudier la vulnérabilité des routes face au changement climatique. Le document s'appuie sur un autre document de l'AIPCR qui traite de l'effet du changement climatique sur les chaussées routières. Il présente de manière concrète les réponses à apporter par exemple face à l'augmentation des températures ou des précipitations. Sans être une étude de cas, il présente des scénarii à attendre dans certaines régions et les réponses à envisager face aux menaces en question. Des études de cas ont cependant été réalisées par l'AIPCR Mexico, en Australie, et au Paraguay et a donné lieu à la rédaction de rapports d'études de cas. Les effets du changement climatique sur les routes sont également abordés dans une publication qui porte sur les risques associés aux catastrophes naturelles, aux catastrophes anthropiques, et au changement climatique.

Le guide combine deux approches : une approche climatologique et une approche géomorphologique.

Approche Climatologique

L'approche climatologique comporte 5 étapes :

Etape 1 : Identifier des grandeurs caractéristiques du climat. Grandeurs retenues dans une approche globale : Températures, Précipitations, Vents. Pour une approche locale on peut regarder également le rayonnement solaire.

Etape 2 : Estimation des tendances d'évolutions des grandeurs retenues (Variables T). Tendances retenues :

- T1 : Tendance à l'augmentation générale des températures moyennes
- T2 : Tendance à la diminution des précipitations moyennes (*en terme de quantité d'eau ?*)
- T3 : Tendance à l'augmentation des précipitations en période hivernale dans certaines régions
- T4 : Tendance à l'augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes
- T5 : Tendance à l'augmentation de l'intensité des tempêtes.

Etape 3 : Identification des phénomènes induits par les variables T (Variable P) :

- P1 : Variation de la teneur en eau des terrains.
- P2 : Fonte du pergélisol
- P3 : Modification du nombre de cycles gel-dégel
- P4 : Modification de la synchronisation fonte de la neige – fonte du sol
- P5 : Raréfaction de la végétation
- P6 : Disparition de la banquise
- P7 : Abaissement du niveau des nappes souterraines

- P8 : Inondations
- P9 : Erosion par ruissellement
- P10 : Alluvionnement
- P11 : Glissements de terrains et coulées
- P12 : Chute de blocs, éboulements
- P13 : Avalanches

Etape 4 : Identification des dommages provoqués par les phénomènes induits

- Sur les remblais et assises de remblais
 - o D1 : Tassements
 - o D2 : Gonflements
 - o D3 : Perte de portance
 - o D4 : Erosion par ruissellement
 - o D5 : Glissement
- Sur les déblais et versants amonts
 - o D6 : Fragilisation de la végétation
 - o D7 : Erosion par ruissellement et alluvionnement
 - o D8 : Glissement – coulées
 - o D9 : Chute de bloc, éboulements

Etape 5 : Identification des mesures pour réduire le risque de dommages (Variable M)

- M1 : Collecte des eaux de surface
- M2 : Drainages
- M3 : Infiltration
- M4 : Confortement mécanique
- M5 : Filets à blocs
- M6 : Galeries couvertes
- M7 : Adaptation de la végétation
- M8 : Dignes de protection
- M9 : Traitement des sols argileux
- M10 : Déplacement de la route
- M11 : Techniques de refroidissement

Le schéma ci-dessous permet d'illustrer la méthode :

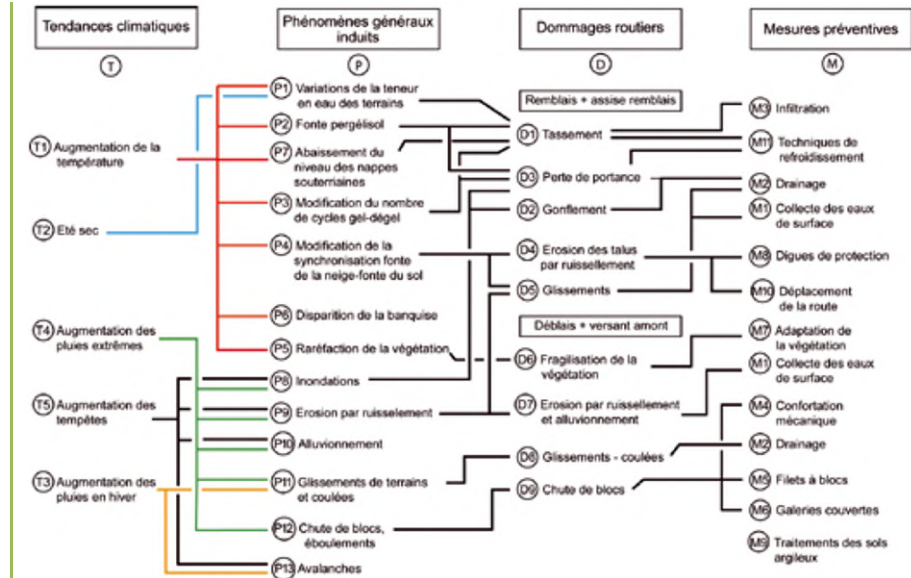


Schéma 7 : Synthèse de l'approche climatologique de la méthode AIPCR

Approche géomorphologique

Cette approche regroupe le globe en régions ayant le même comportement face aux tendances citées ci-dessus. Les éléments pris en compte sont les facteurs conditionnant la réponse de l'espace aux tendances. Par exemple la végétation, la topographie (altitudes & pentes), la géologie... De cette façon on identifie les dommages susceptibles de subvenir sur les routes en fonction de leur localisation et on en déduit les mesures à prendre.

L'approche distingue deux types de zones :

- Les zones de basses altitudes (en dessous de 1000m) subdivisées en 4 zones
 - o Collines & plateaux
 - o Plaines alluviales
 - o Rives océaniques planes
 - o Rives océanique rocheuses
- Les zones montagneuses

Couplage

En couplant les 2 approches, chaque zone est identifiée par son climat et sa morphologie. Ces deux informations permettent d'identifier les phénomènes dominant dans la région et d'en déduire les dommages envisageables et les mesures à mettre en place.

Le tableau ci-dessous présente le couplage des approches climatologiques et géomorphologiques :

TABLEAU 1 - PHÉNOMÈNES DÉTERMINANTS DANS L'ÉVOLUTION CLIMATIQUE POUR LES DIFFÉRENTES SITUATIONS GÉOMORPHOLOGIQUES ET LES DIFFÉRENTES ZONES CLIMATIQUES							
		tropical humide	tropical aride	subtropical	tempéré	boréal	polaire
Basses altitudes	Collines et plateaux	P9P10P11	P5P9P10P11	P1P5P9 P10P11	P1P9P10P11	P9P10P11	P2P3P4 P9P10P11
	Plaines alluviales	P8P9P10	P5P7P8P9P10	P1P5P7 P8P9P10	P1P7P8 P9P10	P8P9P10	P2P3P8 P9P10
	Côtes océaniques planes	P8P10	P5P8P10	P5P8P10	P8P10	P8P10	P2P3P6 P8P10
	Côtes océaniques rocheuses	P9P10P12	P5P9P10P12	P5P9P10P12	P9P10P12	P9P10P12	P2P3P4P6 P9P10P12
Montagnes		P9P10P11P12	P5P9P10 P11P12	P1P5P9 P10P11P12	P1P2P3P4 P9P10P11 P12P13	P2P3P4 P9P10P11 P12P13	P2P3P4 P9P10P11 P12P13
Légende : <i>P1 : Variation de la teneur en eau des terrains</i> <i>P7 : Abaissement du niveau des nappes souterraines</i> <i>P2 : Fonte du pergélisol</i> <i>P8 : Inondations</i> <i>P3 : Modification du nombre de cycles de gel-dégel</i> <i>P9 : Érosion par ruissellement</i> <i>P4 : Modification de la synchronisation fonte de la neige-fonte du sol</i> <i>P10 : Alluvionnement</i> <i>P5 : Raréfaction de la végétation</i> <i>P11 : Glissement de terrain</i> <i>P6 : Disparition de la banquise</i> <i>P12 : Chute de blocs, éboulements</i> <i>P13 : Avalanches</i>							

Tableau 2 : Méthode AIPCR : Approche couplée climatologique et géomorphologique

3.8 La méthode « Lebanon Landslide Hazard Framework »

<i>Agence / Auteurs :</i>	Université Américaine de Beyrouth, département Génie Civil et Environnement
<i>Titre :</i>	A GIS-Based Landslide Hazard Framework for Road Repair and Maintenance
<i>Date de publication :</i>	2005
<i>Type :</i>	Outil SIG et guide méthodologique d'analyse et de gestion des risques
<i>Infrastructure :</i>	Réseaux routiers en zone de montagne
<i>Zone géographique :</i>	Local / régional / pays développés
<i>Risques naturels considérés :</i>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pluies ; ■ Glissement de terrains ; ■ Stabilité de pentes.
<i>Objectifs :</i>	Le Lebanon Landslide Hazard Framework est un programme mis en place pour évaluer la stabilité des pentes. La méthode proposée inclue la collecte

de données, une classification des glissement connus, une priorisation des opérations de maintenance à prévoir et les mesures préventives associées aux instabilités.

Le sortant de l'étude est constitué par un outil d'aide à la décision qui permet :

- Déterminer les emprises d'un glissement de terrain et d'en évaluer les conséquences (sur la sécurité, le trafic ...) ;
- D'optimiser et de prioriser les besoins en réparation des différentes zones de glissement ;
- D'éliminer les problèmes de redondance des travaux de traitement d'une zone ;
- D'identifier les problèmes récurrents sur une zone géographique sur la base des données d'entretien passées ;
- D'anticiper les éventuels risques de glissement et d'identifier les mesures préventives à mettre en place.

Description :

Le Lebanon Hazard Framework a été développé dans le cadre de la maintenance et de la réparation des routes. Il peut être appliquée dans un contexte de changement climatique puisque les risques pris en compte pour développer la méthode incluent les pluies et glissement de terrains, phénomènes ayant un lien avec le changement climatique.

Le Lebanon Hazard Framework a été développé sous la forme d'un SIG. Le SIG développé se présente à l'utilisateur sous la forme de deux interfaces. La première interface permet à l'utilisateur de renseigner les informations suivantes :

- La référence d'un site identifié (secteur administratif, village à proximité ...) ;
- Les propriétés caractéristiques du site : coordonnées universelles, altitude, pente, type de sol et niveau de précipitation dans la zone ;
- Les caractéristiques du glissement de terrain identifié, y compris vulnérabilité et coût et complexité des réparations.

La seconde interface a pour objet d'analyser les données et de présenter les résultats de cette analyse, y compris sous la forme d'une analyse cartographique.

La méthodologie proposée peut être divisée en trois phases :

- Collecte des données de terrain ;
- Analyse des données ;
- Présentation de la carte des risques, des priorités de maintenance et de prévision des phénomènes futurs.

Le schéma ci-dessous permet d'illustrer la méthode :

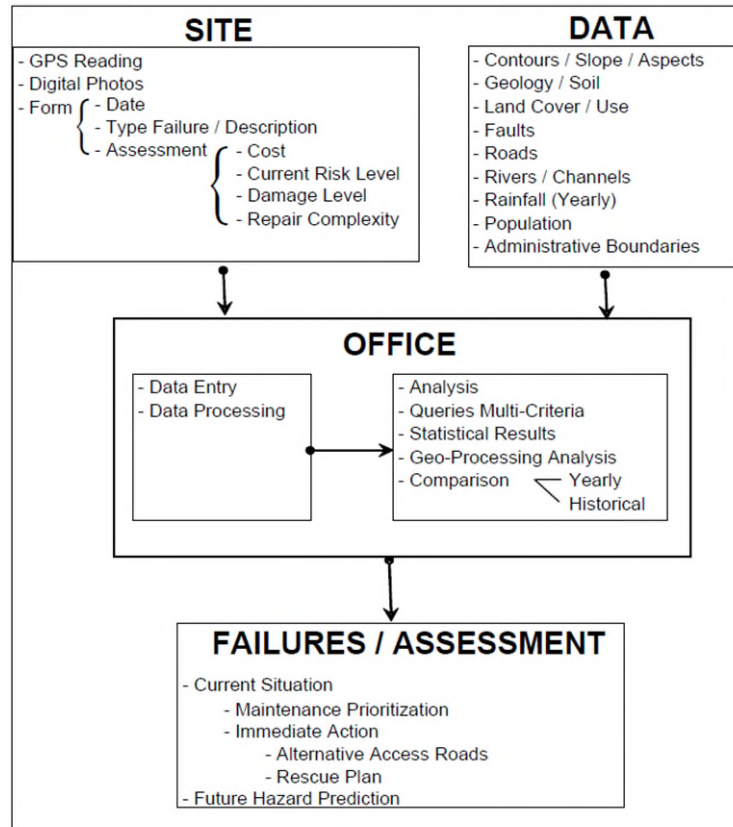


Schéma 8 : Synthèse de la procédure « Lebanon Hazard Framework »

3.9 Le guide « Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat »

<i>Agence / Auteurs :</i>	CEREMA
<i>Titre :</i>	Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat
<i>Date de publication :</i>	Novembre 2019
<i>Type :</i>	Guide méthodologique
<i>Infrastructure :</i>	Tout type de réseau de transport
<i>Zone géographique :</i>	Pays développés
<i>Aléas climatiques et naturels considérés :</i>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Températures ; ■ Précipitations ; ■ Vents ;

- Houle, niveau de la mer ;
- Niveau des eaux souterraines ;
- Biodiversité.

Objectifs :

Le but de la méthode « *Vulnérabilité et risques : les infrastructures de transport face au climat* » est d'analyser la vulnérabilité des réseaux routiers pour mieux anticiper les changements climatiques.

Description :

Les deux étapes importantes de l'analyse de risque sont :

- Impacts sur les infrastructures : criticité physique ;
- Impacts sur leurs fonctionnalités : criticité fonctionnelle.

Pour ce faire, il est nécessaire de rassembler plusieurs données, respectivement :

- Les données relatives au climat (projection climatique), aux infrastructures (état et dégradations, politique d'entretien, retour d'expérience de gestion de crise) ;
- Déterminer les sites dont l'accessibilité est primordiale en période de crise ou en temps normal.

D'une part La criticité physique est définie au niveau microscopique. Elle dépend des caractéristiques physiques des composants de l'infrastructure de leurs comportements, de leurs résistances, etc. D'autre part, la criticité fonctionnelle est définie au niveau macroscopique. Elle dépend des caractéristiques fonctionnelles du réseau, sa capacité, son caractère maillé ou non, etc.

Le schéma ci-dessous permet d'illustrer la méthode :

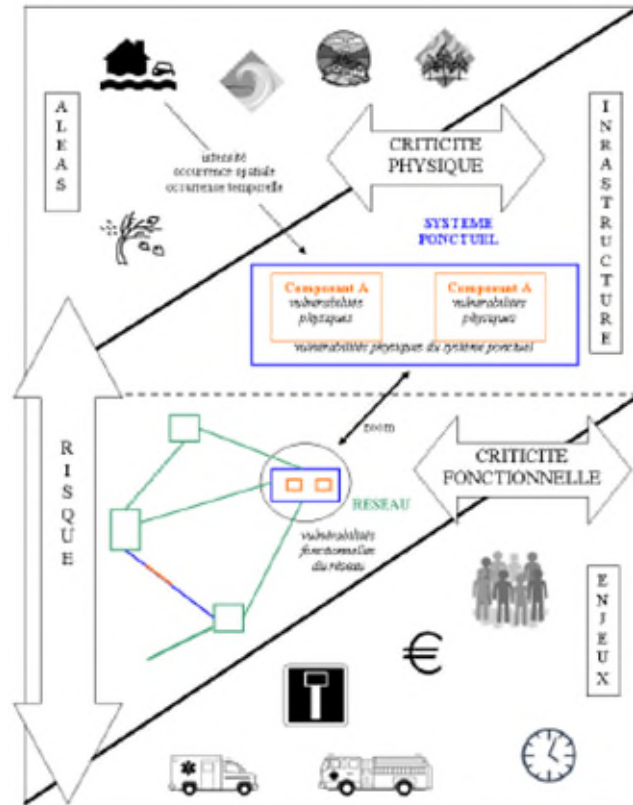


Schéma 9 : Illustration de la méthodologie établie dans « Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat »

L'application de la méthode comporte 6 étapes :

Définition du périmètre et des objectifs

Il convient dans un premier temps de définir le périmètre de l'analyse de risque suivant les objectifs fixés (liste non exhaustive) :

- Sur un territoire donné
- Le long d'un itinéraire
- Pour des infrastructures représentatives
- Pour des infrastructures plus âgées

Ensuite il faut définir les objectifs de l'analyse de risque. Cette étape conditionne entre autres les ressources à mobiliser et la méthodologie à adopter.

Caractérisation des aléas

Cette étape est généralement réalisée par des spécialistes du climat en dialogues avec des spécialistes des transports. Elle a pour objectif de caractériser les aléas et leurs évolutions attendues.

Un aléa est défini par trois caractéristiques :

- Une intensité : estimée ou mesurée (il est possible d'avoir des seuils des classes par rapport au phénomène climatique étudié) ;

- Une occurrence spatiale : peut être difficile à estimer et très variable ;
- Une occurrence temporelle : la durée et son instant (estimé soit quantitativement : centennale/décennale, soit qualitativement : forte/faible/négligeable).

Le tableau ci-dessous fournit des exemples d'aléas liés à des extrêmes climatiques. Le tableau permet d'illustrer une méthode d'organisation de définition des aléas de manière non exhaustive.

Variable climatique concernée	Évolutions climatiques retenues	
	Évolutions tendancielles	Exemples d'aléas extrêmes
Température	Augmentation des températures moyennes en France	Augmentation des périodes de sécheresse à l'horizon 2100 Augmentation des valeurs extrêmes de température Augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur Cancule Incendie de forêt
Précipitations	Évolution de la pluviométrie	Augmentation des valeurs extrêmes et du nombre de jours des précipitations Diminution du nombre de jours de chutes de neige Inondation Glissement de terrain, éboulement, coulée de boue, chute de pierres, etc.
Vent	Évolution des régimes de vent	Évolution des régimes de vents violents Vent violent : tempête, tornade, etc.
Climat de houle et niveau marin	Augmentation du niveau de la mer (érosion et submersion permanente)	Surcote marine (submersion temporaire)
Niveau des eaux souterraines	Évolution du niveau des eaux souterraines diminution des débits fluviaux en lieu avec l'augmentation du nombre de jours de canicules.	Évolution du niveau des eaux souterraines Inondation
Événements extrêmes		Modification du régime cyclonique Cyclone
Biodiversité	Évolution de la biodiversité (augmentation du péril animalier) Augmentation du nombre d'oiseaux migrateurs du fait de l'augmentation des températures. Augmentation de la prolifération des algues dans les cours d'eau due à l'augmentation du nombre de jours de canicules	

Tableau 3 : Aléas climatiques considérés dans le guide du CEREMA

Il peut être intéressant de définir des scénarios cela permet de définir des combinaisons d'aléas afin de choisir les aléas les plus pertinents.

Le guide propose ensuite de créer une échelle de classement définissant la probabilité d'occurrence temporelle de l'aléa et/ou son intensité. Le tableau ci-dessous est un exemple de classement en 4 niveaux de l'occurrence temporelle.

Classe	Catégorie Fréquence	Description	Probabilité d'occurrence par heures de service
4	Probable	L'événement redouté est susceptible d'apparaître plusieurs fois au cours de la vie du système.	$> 10^6$
3	Rare	L'événement redouté est susceptible d'apparaître une fois au cours de la vie du système.	10^6-10^7
2	Improbable	L'événement redouté est très peu probable, mais le risque d'apparition pendant la vie du système n'est pas nul.	10^7-10^9
1	Extrêmement improbable	L'événement redouté est si peu probable que le risque d'apparition pendant la vie du système peut être considéré comme nul.	$< 10^9$

Tableau 4 : Echelle de classement des aléas en 4 niveaux proposée dans le guide du CEREMA

Le croisement de la définition de l'aléa avec son classement permet de déterminer les aléas à retenir, leur caractéristiques et/ou les scénarii associés et de noter chacun des aléas selon sa probabilité et son importance.

Criticité physique

L'analyse de la criticité physique est décomposée en deux étapes :

- A l'échelle globale des grandes familles des systèmes des réseaux étudiés ;
- Détaillée au niveau de chaque système et de chacun de leurs composants.

Ainsi, le guide propose de détailler les réseaux étudiés selon leurs caractéristiques et leurs vulnérabilités physiques en les décomposant en systèmes ponctuels puis en composants. Il convient d'adapter le niveau de détails par rapport aux données disponibles et aux objectifs de l'analyse.

Le guide propose ensuite de déterminer les facteurs de vulnérabilité des systèmes et/ou composants. Exemple avec la liste non exhaustive suivante :

- Age de l'infrastructure ;
- Durée de vie programmée ;
- Etat de l'infrastructure ;
- Règles de conception : absentes, anciennes, modernes ;
- Matériaux utilisés ;
- Procédures d'inspections et de maintenance ;
- Retour d'expériences face aux aléas climatique ;
- Elévation de l'infrastructure par rapport au niveau de la mer ou d'un cours d'eau.

Le croisement des facteurs de vulnérabilité avec l'aléa défini précédemment permet d'attribuer à chaque composant d'un réseau une note de vulnérabilité.

Criticité fonctionnelle

L'analyse de la criticité fonctionnelle a pour objet de déterminer les conséquences des aléas du changement climatique sur la fonctionnalité du réseau, à savoir :

- Les fonctions indispensables de transport : déplacements qui doivent toujours être possible (particulièrement en situation de crise) ;
- Les fonctionnalités de desserte ou d'accessibilité : déplacements essentiels mais substituable (par disponibilité d'autres structures proposant le ou les mêmes produits/services) ;

- Les fonctionnalités courantes de transport : tous les autres déplacements commun, nécessaires au fonctionnement de la société.

De manière générale, pour l'utilisateur il peut avoir deux cas de figure suite à une défaillance sur un réseau :

- Perte de performance : Engendre des attentes, du retard, de la perte de temps
- Perte de connectivité : Impossibilité de se déplacer

Ainsi l'analyse de la criticité fonctionnelle découle d'une analyse multicritère avec pour chaque section d'un réseau la détermination du trafic, de sa structure (interne, échange, transit, combinaisons des trois) et des itinéraires de substitution (et leur capacité à absorber un report de trafic). Chaque section d'un réseau peut ainsi être qualifiée en terme d'enjeu (faible, moyen, fort, très fort).

Analyse de risque

L'analyse de risque consiste en l'assemblage des éléments précédemment définis en les mettant en relation les uns aux autres. Le schéma ci-dessous présente le logigramme de l'analyse de risque :

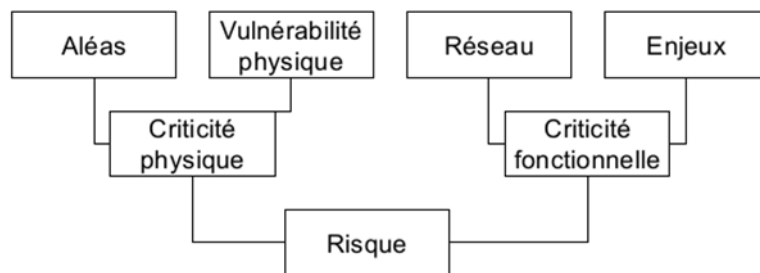


Schéma 10 : Logigramme de l'analyse de risque proposé par le guide du CEREMA

Dans ce logigramme, la criticité physique est obtenue en multipliant la note d'aléa à la note de vulnérabilité physique et le risque est déterminé en multipliant la note de criticité physique par la note de criticité fonctionnelle :

- Note de criticité physique = note d'aléa x note de vulnérabilité physique
- Note de risque = note de criticité physique x note de criticité fonctionnelle

Ainsi, selon les échelles de notations définies on a une échelle de notation plus ou moins étendue qui permet de définir des niveaux de risque. Le tableau ci-dessous illustre un exemple de niveau de risque estimé sur 3 niveaux à partir de 4 niveaux de criticité fonctionnelle, 4 niveaux d'aléas et 4 niveaux de criticité physique.

Notes potentielles de risque		Notes potentielles de criticité fonctionnelle			
		4	3	2	1
Notes potentielles de criticité physique	16	Intolérable	Intolérable	Intolérable	Grave
	12	Intolérable	Intolérable	Grave	Grave
	9	Intolérable	Intolérable	Grave	Grave
	8	Intolérable	Grave	Grave	Tolérable
	6	Grave	Grave	Grave	Tolérable
	4	Grave	Grave	Tolérable	Tolérable
	3	Grave	Grave	Tolérable	Tolérable
	2	Tolérable	Tolérable	Tolérable	Tolérable
	1	Tolérable	Tolérable	Tolérable	Tolérable

Tableau 5 : Exemple de tableau de définition du niveau de risque proposé par le guide CEREMA

Le niveau de risque est défini pour un système/composant d'un réseau et pour un aléa de changement climatique donné.

Affinage de l'analyse de risque

L'analyse de risque simplifiée présentée ci-avant est basée à dire d'expert et/ou sur retour d'expériences. Il est possible d'affiner l'analyse de risque par une analyse détaillée. Ce type d'analyse a pour vocation de recourir à des études scientifiques et des techniques fines à travers des modèles mathématiques et des logiciels. Ceci afin de déterminer plus précisément les paramètres de l'analyse (aléas, criticité physique, fonctionnelle). Cet affinage étant plus complexe à mettre en œuvre, il est conseillé d'appliquer cette analyse détaillée pour les niveaux de risques les plus importants.

4. Publications sur les effets du climat sur les infrastructures

4.1 Effets du changement climatique sur les chaussées routières

Le comité chaussées routières de l'Association mondiale de la Route a produit un document pour sensibiliser le secteur routier aux impacts probables des changements climatiques sur les chaussées. Les cas notamment étudiés sont les suivants :

- Effets des pluies plus intenses et plus fréquentes,
- Effets de la diminution des niveaux de précipitations et assèchement des sols,
- La fonte du pergélisol,
- Exposition des routes aux cycles gel-dégel plus fréquents,
- Effets de l'augmentation des températures ambiantes,
- Hausse du niveau des océans.

4.2 Prise en compte de l'environnement dans la conception des remblais et des déblais en sols fins

Le présent chapitre résume les principales observations liées aux interactions ouvrages en sols fins / climat issues de la publication « Conception et construction des ouvrages en sols fins » de M. Bufalo, T. Dubreucq, J.-J. Fry, J.-M. Lejeune, D. Mahmutovic et L. Boutonnier publié en 2019.

4.2.1 Effets de l'environnement hydrique sur les remblais

Pour les remblais les principales sollicitations sont :

- Sollicitations météorologiques : gel, évaporation, rayonnement thermique, infiltration des eaux de ruissellement
- Mise en eau temporaire du remblai : suite à inondation
- Remontées capillaires au contact de terrains humides en assise de remblai
- Effet de la végétation : évapotranspiration

Les conséquences de ces sollicitations sont une apparition de déformations différées :

- Talus en environnement humide : un gonflement est généralement observé à l'imbibition précédant des fissurations du retrait provoqué lorsque l'évaporation reprend. Il peut se mettre en place des cycles retrait-gonflement. La conséquence du gonflement peut être d'annuler tout ou partie de la contrainte de pré consolidation et de la cohésion non drainée apparente associée, résultant du compactage et de fissurer le matériau. Cela peut conduire à des ruptures sur talus.
- Talus en environnement sec : cycle de retrait-gonflement conduisant à une perte de résistance au cisaillement.

- En cœur de remblai : effondrement possible à l'imbibition pour les zones les plus chargées. Il faut néanmoins une durée d'imbibition suffisamment longue (par la base et/ou les talus) pour que l'eau puisse s'infiltrer.

L'ouvrage cite quelques propositions pour maîtriser ces déformations différées :

1. Lors de la construction :

Respect des règles de compactage des talus et maîtrise à long terme du drainage et de l'assainissement des ouvrages.

Respect d'un bon compactage et de la méthode du mètre excédentaire ou la méthode en W dans le but d'éviter les infiltrations d'eau qui font chuter la succion (possible annulation également) et induisent une baisse très importante de la résistance au cisaillement des sols fins. Ces phénomènes peuvent conduire à l'apparition d'affaissements de talus, voire de ruptures.

Le phénomène est amplifié en cas de défaillance de l'assainissement de surface.

Des effondrements peuvent également se produire lorsque des blocs de roches évolutives sont mal enrobés dans une matrice.

D'autres cas d'effondrement peuvent être la conjonction :

- De sols fins mis en œuvre dans la zone à risque d'effondrement ;
- D'une contrainte trop importante, liée au poids du remblai ;
- D'un apport d'eau massif.

2. Lors de la conception :

La conception doit intégrer la possible évolution à terme des teneurs en eau en relation avec l'environnement de l'ouvrage.

Dans le cas d'une conception en matériaux humide sur talus : la mise en œuvre des matériaux à une densité de compactage moyenne (par exemple : $C=95\%.C_{OPN}$) et une teneur en eau côté humide de l'optimum Proctor rendent les talus très sensibles au retrait. Cette conception est à éviter dans les pays chaud et secs mais peut-être recommandée dans les pays humides. Dans les climats tempérés (présentant de grandes amplitudes dans les sollicitations hydriques) il faut ajouter à cette solution des dispositions pour limiter l'évaporation (par exemple : masque granulaire de faible épaisseur, couverture en terre végétale et mise en œuvre d'une végétation herbacée).

Dans le cas d'une mise en œuvre sur les talus des matériaux à une teneur en eau proche de la limite de retrait dans les pays arides avec des épisodes pluvieux très occasionnels et temporaires (pays arides ou pays tempérés avec des périodes sèches), pour les sols argileux et pour les sols limoneux non gonflants, l'ouvrage recommande une mise en œuvre avec énergie de compactage élevée (OPM) pour garantir une teneur en air faible ($\theta_{air} \approx 5\%$).

Pour les noyaux de remblai, il faut limiter la teneur en air à un certain seuil pour éviter les désordres majeurs liés à l'effondrement en cas d'imbibition ($\theta_{air} < 5$ à 10%) ou bien réaliser des essais œdométriques appropriés. Prescriptions à respecter également pour les haut-remblais.

Pour les bases de remblai en zone humide ou zone inondable, il n'est pas possible de donner une règle générale pour l'utilisation de sols fins sans traitement. Cependant, il semble que dans certains cas des sols peu plastiques mis en œuvre côté humide et avec une énergie de compactage modérée ($95\%.C_{OPN}$) présenteront à la fois peu de risque de gonflement et d'effondrement à l'immersion. Néanmoins, il faudra protéger le talus contre l'effet du retrait.

Enfin, si des couches de sols fins de succions très différentes sont mises en contact, elles provoquent une migration d'eau capillaire. Donc la conception doit intégrer ce critère pour agencer les couches et maîtriser les variations de teneur en eau.

4.2.2 Effets de l'environnement hydrique sur les déblais

Pour les déblais les principales sollicitations sont :

- Sollicitation météorologiques : gel, évaporation, rayonnement thermique, infiltration des eaux de ruissellement ;
- Sollicitation hydrogéologique avec des variations possibles des niveaux des nappes interceptées par le déblai ;
- Effet de la végétation : évapotranspiration.

Les conséquences sont :

L'effet de la variation du niveau de la nappe sur la stabilité d'un talus de déblai est un problème classique de mécanique des sols.

Les cycles d'évaporation-infiltration sont à l'origine des phénomènes de retrait-gonflement. La fissuration provoquée par le retrait favorise l'infiltration d'eau, donc lorsque ces fissures deviennent profondes il y a une mise en charge provisoire du talus qui favorise une chute rapide de la succion et donc de la résistance au cisaillement. De plus, ce phénomène se combine avec la charge d'eau dans les fissures.

L'ouvrage émet quelques propositions pour maîtriser les déformations :

Mise en œuvre de masques granulaires de protection (50 à 70cm d'épaisseur).

Lorsque ce n'est pas possible, il est recommandé de considérer dans les études de stabilité une épaisseur de terrain remanié dans la frange de variation d'état hydrique. L'épaisseur à considérer compte tenu des quelques expérimentations disponibles serait de 1 à 2m.

4.3 Failure of infrastructure embankments induced by flooding and seepage: a neglected source of hazard

Résumé de l'article de M. Polemio et P. Lollino publié en 2011.

Cette étude porte sur les remblais de voies routières ou ferroviaires et leurs stabilités. Les auteurs étudient la sous-estimation du risque de défaillance des ouvrages en terre par rapport aux infiltrations induites par des retenues d'eau temporaires et occasionnelles (en raison de pluies exceptionnelles).

Selon les auteurs, ces risques de défaillance proviennent de 3 facteurs principaux :

- L'événement de crue

Concerne soit la survenue d'une crue maximale dans le réseau de drainage, soit des crues dites secondaires (stagnation des pluies sur des surfaces à faible perméabilité) sous l'effet de fortes pluies (Petrucci and Polemio, 2009). De tels événements peuvent généralement être identifiés comme des crues soudaines, donc des crues locales de haute intensité et de courte durée (généralement moins de 6h). Ces inondations peuvent être extrêmement dangereuses ou dramatiques, bien qu'elles soient rares (Polemio, 2010).

- La faiblesse hydraulique

Déterminée par les drains, ouvrages hydrauliques, ponts, et , de manière générale, les sections hydrauliques qui peuvent s'obstruer lors d'une crue ou qui peuvent être sous-dimensionnées d'un point de vue hydraulique pour un évènement de crue spécifique.

- La faiblesse géotechnique du remblai

L'étude s'appuie sur une étude de cas, dans le sud de l'Italie dans la région des Pouilles (Apulia). En octobre 2005, une large brèche s'est créée sur le remblai de la voie ferroviaire reliant Bari et Taranto, c'est la conséquence d'une crue soudaine et d'un ouvrage sous-dimensionné pour ce phénomène.

4.4 Climate impacts on flood and coastal erosion infrastructure

Résumé de l'article de P. Sayers et R. Dawson publié en 2014.

Bien qu'un peu à la marge de notre sujet sur les infrastructures de transport, ce document propose une approche complète en termes d'adaptation au changement climatique. A ce titre, il nous paraît utile de présenter certains des sujets abordés, notamment ceux pouvant être appliqués aux infrastructures de transport.

L'article s'appuie sur une analyse de sensibilité d'ouvrages hydrauliques aux effets du changement climatique et présente l'impact d'aléas climatiques sur les ouvrages. Cette analyse est présentée dans le tableau ci-dessous :

Primary load exposure	Example infrastructure that may be influenced	Primary climate change sensitivity		Impact on FCERMI performance	
		Change	Confidence	Scale of impact and examples	Confidence in impact
Pluvial	Urban drainage networks and above ground structures that may become saturated	Severity of individual storms	Low	Moderate Heightened run-off, increased flood flows	High
		Spatial coherence	Low		
		Temporal sequence	Low		
Fluvial	River embankments, culverts, barriers and pumps	Severity of individual storms (high flows and low flows)	High	High Crest overflow, by-passing, accelerated deterioration, reduced maintenance window, and an increase in the chance of failure.	High
		Spatial coherence	Low		
		Temporal sequence	Low		
Ground-water	Cliff slopes, foundations of raised structures, coastal wetlands	Mean and extreme values (higher and lower levels)	Moderate	Low Moderate Soil instabilities (slope failure) differential settlement (causing instability), greater/less saline intrusion.	Moderate
Coastal and estuarine	Hard and soft shoreline structures (seawalls, beaches to wetlands), tidal barriers	Higher mean sea levels (and associated increase in incident wave energy)	High	Very High An increase in the chance of failure due to, for example, increased overtopping, scour, beach lowering, coastal squeeze.	High
		Severity of individual storm	Moderate		

		(surges and waves)			
		Increased storminess (severity, frequency and sequence)	Low		
		Wave direction (mean)	Low		
		Salinity	Low		
		Acidity	Low		
Temp., solar radiation and drought	Earth embankments and other 'soil' and 'vegetation' based infrastructure	Extremes of temperature – cold and hot – and extreme dry periods	High	Moderate Accelerated desiccation of soils, freeze-thaw induced spalling, loss of strength in surface cover, loss of vegetation for green infrastructure, Surface drying and increased cliff erosion	High
	Catchment and local surface storage (e.g. SUDs)			High Changing nature of flora and fauna (see below)	Moderate
Problematic invasions and bacterial attacks	Potential to affect both hard and soft infrastructure in fluvial, coastal and estuarine settings	Changes in the prevalence and nature of microbes and invasive species	Moderate	Moderate Unwanted species (such as mosquitos around standing water and SUDs), Japanese knot-weed reducing channel conveyance, increased cases of accelerated low water corrosion in estuaries.	Low

Tableau 6 : Synthèse des impacts sur les ouvrages hydrauliques en fonction des aléas climatiques (P. Sayers et R. Dawson, 2014).

Les points qui nous ont semblé intéressants dans cette analyse sont :

La référence aux effets de la végétation, et notamment des plantes invasives sur la protection contre l'érosion des ouvrages en terre ;

Le lien entre un risque élevé pour l'ouvrage et des aléas climatiques faibles. Il ressort du rapport que de nombreux ouvrages ont été endommagés lors de l'hiver 2013 – 2014 au Royaume-Uni (parmi les plus humides jamais enregistré) par la succession de précipitations bien qu'aucune n'ait été exceptionnelle ;

La citation des problématiques de fluctuation des niveaux de nappes souterraines associées à des défaillances parfois catastrophiques ;

La limite du dimensionnement des ouvrages sur la base d'un événement de référence multiplié par un coefficient de sécurité qui ne prend pas en compte la possible variabilité hydrique des terrains sur lequel l'ouvrage est construit.

4.5 Failures in transport infrastructure embankments

Résumé de l'article de Briggs, Loveridge et Glendinning publié en 2016.

Bien que cet article n'intègre pas le changement climatique, nous le présentons ici car il passe en revue des phénomènes de dégradation dans le temps et de rupture des remblais d'infrastructures de transport (rail et autoroute). Les phénomènes présentés dans cet article sont dus au climat et aux détériorations à long terme. Ces phénomènes peuvent donc être mis en relation avec les effets du changement du climat. On peut citer :

- L'augmentation de la pression interstitielle au sein des remblais ;
- Les déformations de retrait / gonflement (déformations saisonnières) ;
- Les ruptures progressives de remblai (érosion interne).

4.6 Management and maintenance of infrastructure slopes: development of a multi-scalar approach & The impact of climate change on infrastructure slopes, with particular reference to southern England

Résumé des articles de F.A. Loveridge et al. (2010) et S. Glendinning et al. (2015).

Ces deux articles traitent de manière similaire (des phénomènes microscopiques aux effets sur les infrastructures) et en se basant sur les observations des réseaux exploités en Angleterre des effets du climat sur les infrastructures. Sur la base de sinistres enregistrés en Angleterre sur les pentes de talus des infrastructures routières et ferroviaires, ces articles présentent l'évolution dans le temps et à différentes échelles (du matériau à l'infrastructure) des ouvrages en terre composant les réseaux routiers et ferroviaires en Angleterre. Les événements météorologiques passés et à venir (sur la base de prévisions jusqu'en 2080) sont utilisés pour comprendre et modéliser les processus de détérioration des sols. L'objet de ces articles étant de proposer une cartographie temporelle et spatiale de la maintenance des ouvrages en terre qui sera nécessaire dans les années à venir.

Ces articles sont cités dans la présente analyse bibliographique car ils listent notamment les détériorations observées sur les infrastructures du Royaume Uni suite à une série de phénomènes météorologiques extrêmes recensés en 2010 (F.A. Loveridge), 2012, 2013 et 2014 (S. Glendinning). Ils citent également quelques articles ayant mis en relation le degré de saturation ou les cycles de saturation / dessiccation des sols avec leur résistance au cisaillement.

4.7 Impact of climate change on deteriorated US Bridge

Résumé de l'article de S. Palu et H. Mahmoud publié en 2019.

Ce document fait une analyse des effets de la température sur les ponts. Une grande partie des ponts aux Etats Unis est conçu pour fonctionner comme une poutre en flexion sur des appuis. La plupart de ces ponts ont plus de 50 ans d'âge et ont donc atteint la durée de vie prise en compte pour leur dimensionnement. Ils font donc l'objet de suivis réguliers. Parmi les problématiques soulevées par la vétusté de ces ouvrages, il y a le fait que les joints de dilatations initialement mis en place sont pour la plupart désormais bouchés par les déchets liés à l'exploitation des ponts. De ce fait, les variations thermiques deviennent dangereuses pour ces structures. En effet, les joints de dilatations mis en place entre les poutres étant obstrués, les déformations de dilatations et de contractions sont empêchées, ce qui soumet le pont à des sollicitations supplémentaires pour lesquelles ils n'est pas forcément dimensionné. Ce problème est d'autant plus à prendre au sérieux, que la plupart des scénarios liés au changement climatique prédisent une augmentation générale de la température. L'idée de cet article est donc d'étudier la vulnérabilité de ce type de ponts, sur la base de certains scénarios de changement climatique. Il faut signaler que cette étude est partielle car elle ne traite pas le changement climatique dans son ensemble mais parle uniquement des effets de l'augmentation de la température prédite par la plupart des scénarios. La méthode consiste à évaluer la valeur de l'équation d'interaction pour un certain nombre de scénarios prenant en compte une élévation de température et de regarder la corrélation entre variation de température et valeur de l'équation d'interaction. L'équation d'interaction est une équation qui rend compte de la sollicitation et la résistance d'un élément. C'est une sorte de «

coefficient de sécurité ». Dans le cadre de cette étude, les sollicitations prise en comptes sont les moments de flexions et les efforts de traction/compression.

$$\frac{\gamma P}{\phi_c P_n} + \frac{\Sigma \gamma M}{\phi_f M_n} \leq 1$$

Équation 1 : coefficient de sécurité sur la dilatation thermique des ponts (S. Palu, H. Mahmoud, 2019)

Avec :

- P : Effort de compression lié à la sollicitation thermique avec prescription de la dilatation (obstruction du joint) ;
- M : Moment fléchissant ;
- P_n et M_n résistance à la traction/compression et au moment ;
- $[\gamma, \phi]_{(c)}$ et ϕ_f : Facteurs normatifs.

La valeur de l'équation d'interaction est la valeur obtenue en calculant le terme de gauche de l'inéquation présentée par l'Équation 1. Physiquement on peut l'assimiler à l'inverse du coefficient de sécurité. La présente étude tente de faire un lien entre cette valeur et l'évolution de la température. Il ressort que pour une augmentation de température de 1°C, la valeur de l'équation d'interaction augmente de 2%.

4.8 Autres publications

4.8.1 Challenges in monitoring and managing engineered slopes in a changing climate

Résumé de l'article de Paul N Hughes, Rosaling Hen-Jones, Ross A Stirling, Stephanie Glendinning, David A Gunn, Jonathon E Chambers, Tom A Dijkstra, Joel Smethurst et Kristine Flesjo.

Cet article présente les défis pour développer un système permettant aux gestionnaires d'ouvrages géotechniques de savoir quelles parties de leur réseau d'ouvrages sont vulnérables aux défaillances induites par le changement climatique. Cet article ne sera pas détaillé ci-après plus en avant car il se concentre sur la relation entre la variation de la teneur en eau des terrains dans le temps et les résultats d'auscultations obtenus par la tomographie de résistivité électrique (ERT). Il conclut sur le fait que des systèmes ERT peuvent être intégrés à l'instrumentation géotechnique conventionnelle afin de suivre l'évolution des talus soumis, dans le temps, à l'évolution du climat.

4.8.2 The influence of desiccation fine fissuring on the stability of flood embankments

Bien qu'adapté aux digues et ouvrages fluviaux, cet article est cité ici car il aborde la question de l'influence de la fissuration liée à la dessiccation sur la stabilité des ouvrages.

4.8.3 Reducing the risk of embankment failure under extreme conditions, a framework for action

Bien que cet ouvrage ait été développé pour les ouvrages hydrauliques et fluviaux et bien qu'il n'intègre pas le changement climatique, il présente une série de 12 recommandations dont certaines semblent tout à fait appropriées dans un contexte de changement climatique. On peut citer :

- Un système de gestion du patrimoine basé sur la performance ;
- Comprendre et prévoir les défaillances : initiation par fissuration et craquellement ;
- Recherche et conseil sur la gestion de la végétation.

5. Quelques études de cas

En complément des études de cas citées en référence du projet RoadApt (A24 au Portugal, Öresund et Rotterdam-Ruhr) et de celles utilisées par l'association mondiale de la route dans l'ouvrage 'Adaptation Methodologies and Strategies to Increase the resilience of roads to climate change – Case study approach' (Mexique, Australie et Paraguay), quelques études de cas ont été analysées dans le cadre de la présente analyse bibliographique. On peut citer :

- Le rapport d'étude sur l'amélioration de la résilience du réseau routier en Géorgie établi par Egis en août 2017 pour le compte de la banque mondiale ;
- Le rapport d'étude sur l'Analyse exploratoire de la question des impacts du changement climatique sur la gestion des ouvrages de protection contre les inondations sur le bassin de la Loire et ses affluents établi par Egis en mai 2018 pour le compte de l'établissement public Loire ;
- L'analyse de la vulnérabilité des infrastructures au changement climatique des îles de Samoa établi en 2015 par l'asian institute of technologies (AIT, Bangkok) et l'université de Tokyo ;
- L'analyse de l'adaptation des routes du Royaume du Maroc aux risques climatiques et au changement climatique établi en 2015 par Ingerop, Novec et Acterra pour le compte de la banque mondiale.

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des publications

- [1] Road Era net, *A guidebook to the RIMAROCC method*, 2010.
- [2] T. Bles, J. Bessembinder, M. Chevreuil, P. Danielsson, S. Falemo et A. Venmans, *ROADAPT - Roads for today, adapted for tomorrow*, 2015.
- [3] ROADADAPT Consortium, *Guideline Part A1 on the use of data for the current and future climate for road infrastructure*, 2014.
- [4] ROADADAPT Consortium, *Guideline part A2 on Climate data requirements of National Road Authorities for the current and future climate*.
- [5] ROADADAPT Consortium, *Guideline: Part B performing a Quick scan on risk due to*, 2014.
- [6] ROADADAPT Consortium, *Guideline – Part C:GIS-aided vulnerability assessment for roads - Existing methods and new suggestions*, 2014.
- [7] ROADADAPT Consortium, *Guideline - Part D Socio-economic impacts analysis (WP3)*, 2014.
- [8] ROADADAPT Consortium, *Guideline part E: Selection of adaptation measures and strategies for mitigation*, 2014.
- [9] US Department of Transportation, Federal Highway Administration, *Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework*, December 2012.
- [10] Washington State Department of Transportation, *Climate Impacts Vulnerability Assessment*, November 2011.
- [11] AICPR, *Vulnérabilité des infrastructures géotechniques au changement climatique et mesures d'adaptation selon le contexte géographique*, 2012.
- [12] AICPR, *Risques associés aux catastrophes naturelles, au changement climatique, aux catastrophes anthropiques et aux menaces sécuritaires*, 2013.
- [13] S. Sadek, H. Al-Naghi, *A GIS-Based Landslide Hazard Framework for Road Repair and Maintenance*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, January 2005.
- [14] CEREMA, *Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat*, 2019.
- [15] AICPR, *Prendre en compte les effets du changement climatique sur les chaussées routières*, 2012.
- [16] M. Bufalo, T. Dubreucq, J.-J. Fry, J.-M. Lejeune, D. Mahmutovic et L. Boutonnier, *Conception et construction des ouvrages en sols fins*, 2019.
- [17] M. Polemio et P. Lollino, *Failure of infrastructure embankments induced by flooding and seepage : a neglected source of hazard*, 2011.
- [18] P. Sayers et R. Dawson, *Climate impacts on flood and coastal erosion infrastructure*, 2014.
- [19] Briggs K. M., Loveridge F. A., Glendinning S., *Failures in Transport Infrastructure embankments*, 2016.
- [20] S. Glendinning et Al., *Research-Informed design, management and maintenance of Infrastructure slopes: development of a multi-scalar approach*, 2015.
- [21] F.A. Loveridge, T.W. Spink, A.S. O'Brien, K.M. Briggs & D. Butcher, *The impact of climate and climate change on infrastructure slopes, with particular reference to southern England*, 2010.
- [22] S. Palu et H. Mahmoud, *Impact of climate change on the integrity of the superstructure of deteriorated US bridges*, 2019.

- [23] Paul N Hughes, Rosalind Hen-Jones, Ross A Stirling, Stephanie Glendinning, David A Gunn, Jonathon E Chambers, Tom A Dijkstra , Joel Smethurst et Kristine Flesjo, *Challenges in monitoring and managing engineered slopes in a changing climate*, 2016.
- [24] M. Dyer, S. Utili et M. Zielinski, *The influence of desiccation fine fissuring on the stability of flood embankments*, 2007.
- [25] DEFRA, *Reducing the Risk of Embankment Failure Under Extreme Conditions. A Framework for Action*, novembre 2003.
- [26] Deltares, SGI, Egis, KNMI, *ROADAPT QuickScan – A24 Portugal*, Mars 2014.
- [27] Deltares, SGI, Egis, KNMI, *ROADAPT Case study Öresund*, Octobre 2014.
- [28] Deltares, SGI, Egis, KNMI, *ROADAPT Quick scan Rotterdam-Ruhr corridor*, Août 2014.
- [29] PIARC, *Adaptation methodologies and strategies to increase the resilience of roads to climate change - case study approach*.
- [30] PIARC, B-H De Buen, J-F Mendoza, *Cadre international d'adaptation au changement climatique pour les infrastructures routières – Cas du Mexique*, 2018.
- [31] EGIS International, *Technical Assistance to Increase Climate Resilience of Georgia's Road Network*, 2017.
- [32] EGIS, *Analyse exploratoire de la question des impacts du changement climatique sur la gestion des ouvrages de protection contre les inondations sur le bassin de la Loire et ses affluents*, Mai 2018.
- [33] International Hydropower Association, *Hydropower sector Climate Resilience Guide*, 2019 (pour mémoire).



**Annexe 2 : Questionnaire et synthèse des
interviews menées auprès des exploitants du
réseau AREA / APRR**

PROJET DE RECHERCHE MARI.CC

Méthodologie d'analyse de la Résilience des Infrastructures au changement climatique

Questionnaire envoyé dans le cadre du recueil du retour d'expérience du groupe APRR

1. PRESENTATION DU PROJET

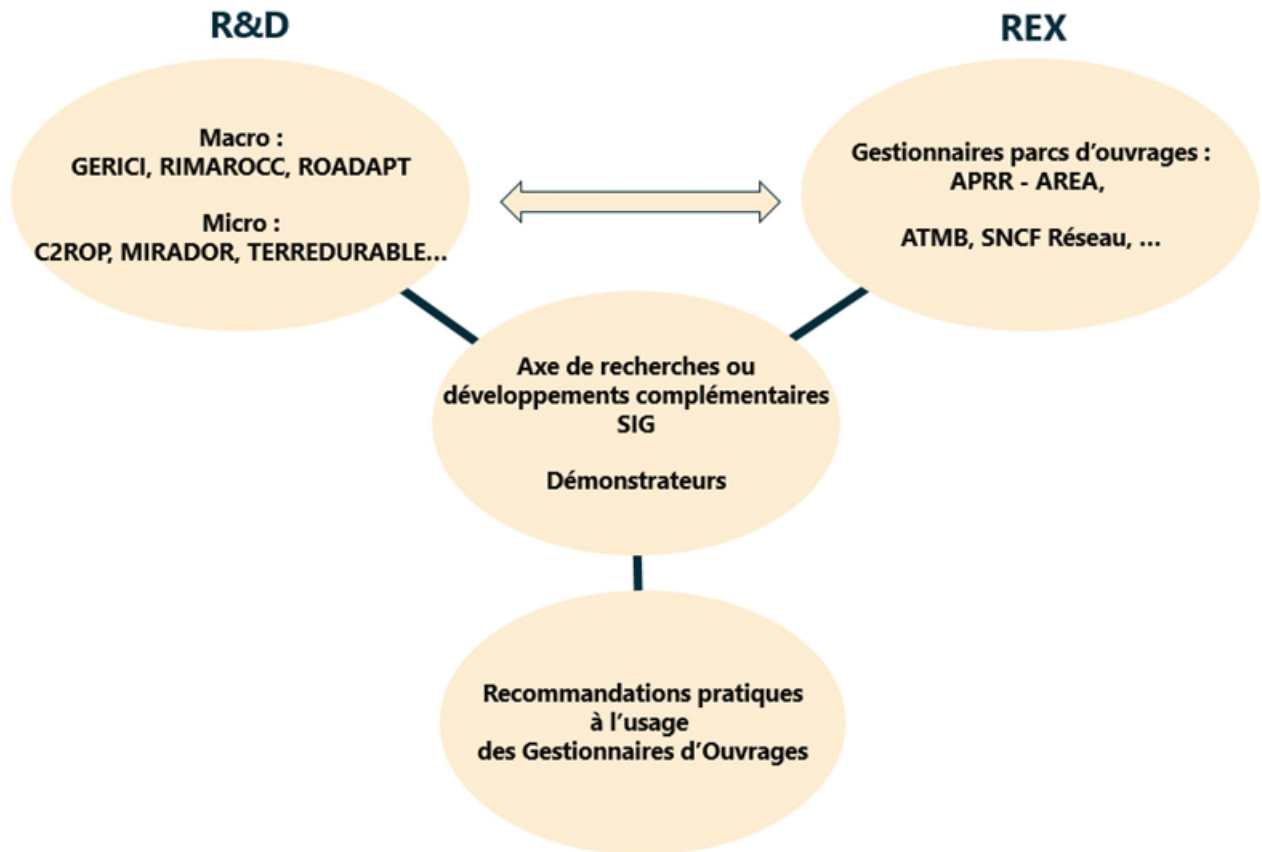
EGIS et le groupe APRR ont candidaté à l'appel à projet de la fondation d'entreprise FEREC, sur la thématique « Résilience et acceptation : quels outils pour les infrastructures » en proposant une recherche scientifique et technique sur une Méthodologie d'Analyse de la Résilience des Infrastructures au Changement Climatique (projet MARI.CC).

Les ouvrages de Génie Civil des infrastructures sont de plus en plus affectés par les effets du changement climatique. Ces évènements doivent donc être pris en compte dans la stratégie de maintenance des ouvrages.

L'objectif du projet MARI.CC est de proposer un outil simple d'analyse de la vulnérabilité des ouvrages géotechniques, puis de définir des actions pratiques et chiffrées en matière d'Asset Management pour augmenter leur résilience.

Basé sur le retour d'expérience d'EGIS (RIMAROCC et ROADAPT, notamment) et des gestionnaires d'infrastructures, comme le groupe APRR, l'outil proposé devra permettre d'adapter au contexte local Français, et de manière pratique, les recherches déjà réalisées à un niveau international.

2. STRUCTURE DU PROJET ET METHODOLOGIE



Séquences du projet :

0. Périmètre : Géotechnique et Génie Civil
1. Bibliographie / Etat de l'art
2. Recueil REX des gestionnaires de parcs d'ouvrages = interviews
3. Mise en commun des REX – SYNTHÈSE avec appui R&D
4. Application à un tronçon de réseau / Démonstrateur
5. Mini symposium (communication externe) via INDURA par exemple
6. Livrables = Recommandations pratiques à l'usage des gestionnaires d'ouvrages

3. RECUEIL DU RETOUR D'EXPERIENCE DU GROUPE APRR

L'action n°2 du projet consiste à recueillir auprès des services d'exploitation du groupe APRR les différents retours d'expériences en termes d'influence du changement climatique sur les ouvrages. Ce recueil d'expérience est envisagé sous forme d'interviews, d'une durée de 2 heures environ. Ci-après les thèmes qui seront abordés.

L'interview portera sur les observations/constats simples de la part des exploitants qui sont en contact « au quotidien » avec leur infrastructure.

- **Observations ou non d'indices sur le changement climatique régional ?**
(à l'échelle de la zone géographique concernée, en fréquence et en intensité)
 - Augmentation significative de la température en été ;
 - Périodes de sécheresse (fréquence, intensité) ;
 - Augmentation des pluies extrêmes (orages violents en été) ;
 - Augmentation des tempêtes (vents violents) ;
 - Augmentation des fortes pluies en hiver ;

- **Observations sur le réseau exploité :**
 - Erosion ou glissement sur les talus de déblais ;
 - Constats sur la végétation (laquelle joue un rôle dans la stabilité des talus ou dans l'encombrement des systèmes d'assainissement) ;
 - Constats sur le fonctionnement de l'assainissement de surface ;
 - Constats sur les chaussées ;
 - Constats sur les ouvrages de GC (matériau béton notamment...) ;
 - Appréciation sur le fonctionnement des ouvrages hydrauliques...

- **Travaux d'entretien/maintenance**
 - Augmentation ou non de la fréquence ?
 - Modification de la nature des travaux de maintenance ?
en considérant une échelle de temps de la dizaine d'années.

Les résultats des interviews seront restitués aux exploitants après analyse.

Nota : les entretiens seront enregistrés pour favoriser les échanges sans prise de notes.

PROJET DE RECHERCHE MARI.CC

Méthodologie d'analyse de la Résilience des Infrastructures au changement climatique

1. PRESENTATION DE LA PERSONNE INTERVIEWEE ET DU DISTRICT

Mr David Garcia (DGa) responsable viabilité en poste depuis 2011 sur le secteur ;

District Val de Saône – extension environ 75km :

- Le secteur démarre au niveau du péage de Tournus au PR356 sur A6 ;
- Le secteur descend jusqu'au PR404 limite entre les départements du Rhône et de la Saône et Loire à environ 10 km de Belleville pour la partie A6 ;
- Le secteur comprend également un tronçon sur A40 du raccordement avec l'A6 jusqu'au PR189 aux environs de St Cyr sur Menton tronçon d'environ 20km ;
- Le secteur comprend également le barreau A406 – contournement Sud de Mâcon – qui fait la liaison entre A40 et A6 et qui se raccorde sur la RCEA direction Moulin (travaux de mise à 2x2 voies terminés en novembre 2019 1,5km entre A406 existante et raccordement RCEA) ;
- Le district est assez plat et situé à l'altitude de 220 / 230 m NFG, majoritairement en remblai.

2. OBSERVATION CLIMATOLOGIQUES

2.1. Températures

Constat d'hivers plus doux ;

Températures extrêmes en été : à l'été 2019 constat de températures de l'ordre de 38 à 40°C sur une période assez longue.

Températures basses : minimas constatés depuis 2011 : -10°C. Dernier phénomène marquant de froid durable constaté en 2012/2013 qui a fait que la Saône a gelé (températures à -12°C / -15°C pendant une grosse semaine). Depuis plus d'évènement de ce type constaté.

Cet hiver les températures sont descendues 3 fois à -4°C suivies de températures de +8°C deux jours après. On constate plus des phénomènes d'alternance des températures (augmentation de la fréquence de la variation d'amplitude des températures). Variations d'amplitude importante (exemple : -4°C à +8°C en 2 jours) sur des temps très courts.

2.2. Pluviométrie

Phénomènes de sécheresse constatés, notamment en 2015 et l'été dernier (été 2019).

2.3. Tempêtes / phénomènes exceptionnels

Vallée de la saône sujette aux brouillards, DGa constate cependant une diminution des phénomènes de brouillard depuis 2011 ;

La vallée de la Saône est également exposée aux brouillards givrants (marqués sur PIOA).

Pluies verglaçantes (phénomène qui apparaît au moment du changement entre une période froide (longue) et une période chaude – phénomènes court et localisés) : 1 alerte il y a deux ans – 2018 (pluie en surfusion). Phénomène constaté par DGa sur 10 minutes, mais (JLD) phénomènes qui se déplace avec la vague de précipitations ;

2 gros orages marquants 2 ans auparavant (2018) en juin et en juillet à quelques semaines d'intervalle phénomène inconnu par DGa depuis sa prise de poste en 2011 ;

Question sur les tempêtes (vents violents) : DGa constate une augmentation de la fréquence des évènements de vents violents (60 à 80 km/h). Avant ces phénomènes n'existaient pas ou peu sur le district. Ces phénomènes précèdent en général un changement de temps ;

3. OBSERVATION SUR LE RESEAU EXPLOITE

Inondation de l'A6 au même endroit au PR386.400 deux fois de suite lors des pluies extrêmes de juin et juillet 2018 (évacuation d'eau par TPC puis réseau sous voies circulées) ;

Ces inondations des voies circulées ont conduit à des débordements sur la BAU et au ravinement des talus de remblai de manière assez importante. L'eau a submergé l'extrusion (bourrelet) en béton qui, à cet endroit, a une hauteur proche de 10cm ;

En raison des grandes quantités d'eau – la grille d'évacuation s'est retrouvée bouchée malgré qu'elle ait été nettoyée au préalable ;

Suite aux phénomènes de sécheresse, constat le long d'A40 et d'A406 de zones de surcreusement qui sont habituellement toujours en eau qui en 2015 et 2019 (épisodes de sécheresse marqués) étaient sèches. DGa fait référence à une photo prise dans une de ces zones de surcreusement sur A406 et qui présente d'importantes fissures de retrait avec des profondeurs de fissure de l'ordre de 15cm. Ces zones de surcreusement se situent en bordure de PI. Cependant, à ce jour, ces observations de sécheresse de ces zones humides ne donnent pas lieu à des désordres observables sur la structure.

Question sur les crues de la Saône : DGa précise que cela fait 2 ans que n'ont pas été observés des phénomènes de crues. Et que les phénomènes de crue observés depuis sa prise de poste en 2011 sont d'ampleur limité. Les dernières belles crues datent de 4 / 5 ans en arrière (2015 / 2016) avec des phénomènes qui durent dans le temps (crues longues, l'eau reste longtemps), notamment sur A406 dont les talus de remblais étaient marqués par la trace de la crue, sans cependant que le talus n'ait été particulièrement érodé.

La dernière crue de la Saône date de 2001 illustrée par la photo des ouvrages de décharge ci-dessous montrée en réunion :



Crues de Saône : crues lentes montée longue et descente longue.

Idem pour réseau des confluent de la saône.

Pas d'effet observable sur les PIOH non plus. Dimensionnement des PIOH (datant des années 60) convenable.

Constats sur la végétation : Les forts coups de vents observés conduisent parfois à des chutes d'arbres / chutes de branche sur clôture / aire de service.

Egalement, en raison des périodes de sécheresse, et un peu sur tout type de zone au pourtour du réseau, il est constaté que les arbres meurent (ne repartent pas au printemps l'année suivant un épisode de sécheresse marqué). DGa prend l'exemple d'un talus situé au niveau de l'échangeur de Mâcon Nord sur lequel le nombre important d'arbres morts est visible en cette période hivernale. Phénomène généralisé sur l'ensemble du district suite au coup de chaud de l'été dernier.

Stabilité de talus : sur les constats effectués par JBo sur A6 y-a-t-il un lien avec les phénomènes pluvieux particuliers ? La réponse semble non. Idem sur talus A406 instables nombreux depuis 2012 dans une zone naturellement gorgée d'eau (secteur de Replonges, Saint-André-de-Bâgé). Ces instabilités ont lieu dans des talus de déblai et la sécheresse évoquée avant a plutôt tendance à ralentir ces phénomènes ;

Question JLD : tassements sur PS / PI ? (Phénomène de 'tape cul' tassement des remblais d'accès supérieurs au tassement de l'ouvrage). DGa constate ce phénomène sur A406, autoroute majoritairement en remblai observé sur tous les PI de l'A406, le différentiel de tassement observé est de l'ordre de 3 à 4 cm entre l'ouvrage et le remblai sans cependant d'apparition de fissure. Le tassement est uniforme sur toute la largeur de la plateforme. La zone sur laquelle se situent ces ouvrages est la zone inondable de la plaine de la Saône, zone sur laquelle ont été observées les fissures de dessiccation citées ci-avant.

Talus équipé de descentes d'eau / barbacanes il y a 15 ans sur aire de Mâcon Saint-Albain sens Paris Lyon. Les barbacanes crachent à mi-hauteur de talus mais le talus ne présente plus de signes d'évolution (talus stabilisé). En revanche les barbacanes crachent régulièrement –elles jouent bien leur rôle.

Observation par DGa d'une augmentation de la fréquence d'apparition de nids de poule sur les chaussées après les périodes longues de grande chaleur en été. Les arrachements d'enrobés ont lieu en début et fin d'hiver sur des enrobés qui ne sont pas très vieux. Ces arrachements peuvent avoir lieu hors zones ou des soucis récurrents d'enrobés sont constatés (viaduc de la salle sur lequel existent des fissures transverses avant l'entrée de l'ouvrage). Exemple un peu avant et un peu après le viaduc de la salle arrachements constatés sur des enrobés de 2013/2014, petits arrachements entre la voie lente et la voie médiane apparus au cours de cet hiver pendant lequel le salage a été faible ;

2006, suite à l'été très chaud sur A39 apparition d'orniérage assez marquée (JLD) mais pas de phénomène de ce type constaté depuis 2011 sur le district (DGa).

Impact sur la végétation : modification de la biodiversité. Apparition d'espèces invasives : l'ambrosie et de la renouée du Japon sur le secteur (l'ambrosie n'existait à l'époque pas sur le secteur). Apparition il y a une dizaine d'année.

Constat sur la végétation : lors de la dernière réunion de suivi environnemental sur A406, il a été annoncé la disparition du rôle des genêts dont la présence est liée à la présence de zones humides.

4. TRAVAUX D'ENTRETIEN / MAINTENANCE

Suite au constat d'hiver plus doux DGa donne l'exemple de l'hiver 2019/2020 au cours duquel 3 salages préventifs au total ont été réalisés (en 2011/2012 10 à 12 salages préventifs + 3 à 4 sorties curatives dans l'hiver sans toutefois de gros cumuls) ;

Consignes société dans le cas de phénomènes de pluie en surfusion : deux tours de salage en préventif + traitement au Calcium en curatif si glace sur les chaussées. Lors du phénomène de 2018 le salage préventif a suffi ;

Suite aux inondations de juin et juillet 2018, le service viabilité a réalisé des investigations sur le réseau d'assainissement pendant lesquelles des anomalies de conception / construction (coudes – réduction de section dans les réseaux d'évacuation...) ont été mises en évidence – dispositifs qui toutefois fonctionnaient correctement en condition pluviométriques « normales » ;

Entretien des PIOH courant non modifié (1/5 du réseau fait chaque année) ;

Assainissement chaque sortie d'hiver 100% du réseau est visité et nettoyé auquel s'ajoute des tournées régulières de tous les avaloirs ou au préalable d'évènement pluvieux importants annoncés ;

Constats sur la végétation : chaque année est établi le pv arbres à risque qui conduit à la coupe des arbres qui pourraient entraver la circulation en cas de chute. Cependant le nombre d'arbres abattus chaque année ne semble pas s'être accéléré ;

Suite au constat des tassements des PI sur A406, réparation en 2013 et nouvelle campagne nécessaire en 2019 – deux réparations sur ouvrages récents (<10 ans). Les réparations consistent à récupérer le défaut de profil avec des enrobés (rechargement en enrobés). Les zones réparées sont sous surveillance particulière.

Nettoyage annuel des barbacanes du talus de l'aire Mâcon Saint-Albain.

DGa signale un besoin de réparation accru du BAC (Béton Armé Continu – corps de chaussée béton – béton sous les couches de chaussée et de liaison) mais peut-être dû au vieillissement de la structure. Dès 2012 premières réparations de pièces de BAC suivies par DGa, depuis besoin de réparation tous les ans (les travaux consistent à retirer les chaussées, casser le BAC à l'hydrodémolition / marteau piqueur jusqu'à retrouver les aciers 'sains' puis reconstitution des aciers bétonnage et refaçon des chaussées (une semaine pour une pièce)). Ces travaux surviennent sur les fissures longitudinales qui apparaissent tous les 4-5 m par endroits. Cette structure est continue et ferrillée pour reprendre les efforts de traction (ferraillage sous fibre neutre). A la construction des fissures de retrait apparaissent tous les 5-6m et contribuent au vieillissement précoce de la structure. Lorsque les désordres surviennent sur les enrobés, la cellule viabilité met en œuvre des enrobés à froid avant la programmation de la réparation de la structure. Normalement les dilatations de la structure BAC sont empêchées par le ferraillage. Structure : cdf performante surmontée de 10cm de béton maigre surmonté du BAC d'une épaisseur de 20cm (épaisseur mise à mal par les opérations de refaçon des enrobés). L'augmentation des fréquences d'entretien du BAC est plus liée au vieillissement de la structure

qu'à des problèmes de modification du climat. Longueur du tronçon BAC : de Mâcon Nord à Tournus – 25km dans les deux sens.

Augmentation des besoins en fauchage suite à l'apparition d'espèces invasives : les quelques endroits qui posent problème sont transformés en zones d'écopâturages (chèvres).

PROJET DE RECHERCHE MARI.CC

Méthodologie d'analyse de la Résilience des Infrastructures au changement climatique

1. PRESENTATION DE LA PERSONNE INTERVIEWEE ET DU DISTRICT

En raison des instructions de confinement liées à la crise due au virus Covid 19, la présente réunion a lieu par téléphone et ne peut être enregistrée.

Mr Yann Castellani (YCa) est responsable viabilité au centre du Crozet. YCa est entré chez AREA il y a 20 ans en tant qu'agent routier sur le district des 3 massifs et est passé responsable viabilité du district des 3 massifs en juin 2019 ;

District des 3 massifs :

- Comprends l'A51 Grenoble – Col du Fau et l'A480 depuis 3 ans ;
- Comprends un secteur de plaine de la traversée de Grenoble à la sortie de Grenoble (plaine du Lavanchon) ;
- Longe le Drac sur le secteur de la traversée de Grenoble ;
- Monte progressivement en altitude depuis la traversée de la Gresse altitude 250m NGF jusqu'au au col du Fau à l'altitude de 900m NGF ;
- Comprends les ouvrages notables du tunnel du Riol (après la traversée de la Gresse) et du viaduc de Monestier de Clermont ;
- Le secteur compte 13 bassins de récupération des eaux ;

2. OBSERVATION CLIMATOLOGIQUES

2.1. Températures

En 20 ans, constat de la diminution des quantités de neige sur la section A51, Col du Fau. Ces dernières années, les températures lors des opérations de déneigement étaient de l'ordre de -5 à -6°C. L'hiver dernier (2019/2020) les températures lors des opérations de déneigement étaient plutôt de l'ordre de -2°C ;

Lors de la saison hivernale 2019/2020 (de novembre à mars), presque aucun déneigement n'a été effectué. Ces dernières années, les quantités de neige par rapport à 20 ans en arrière ont été divisées par 3 ou 4. Cependant certaines années des pics d'enneigement (chutes de neige importantes) ont été constatées ;

En période estivale : constat de l'augmentation de la durée et de la fréquence des périodes de grandes chaleurs (périodes de canicule). Les derniers été ces périodes de canicule s'étalaient sur des durées de 15j à 3 semaines. Les températures relevées sont fréquemment de l'ordre de 35 à 37°C ;

Constat de phénomènes de fortes gelées matinales qui suivent parfois une période plus douce accompagnée de précipitations (grande alternance des températures sur des durées très courtes. Avant cela n'arrivait pas, les vagues de froid s'étalant dans la durée (sur 3 à 4 jours minimum) avec des précipitations tombant sous forme de neige ;

2.2. Pluviométrie

Constat ces dernières années d'une quasi disparition de la rosée matinale, notamment lors des périodes de canicule ;

A mitiger par la persistance des phénomènes orageux estivaux (notamment au mois d'août) ;

2.3. Tempêtes / phénomènes exceptionnels

Constat ces dernières années d'une augmentation des phénomènes de vent important : augmentation du nombre de journées avec un fort vent du Sud mais pas de phénomène de tempête de vent sur le réseau, à contrario des sommets alentours ;

Ces épisodes de fort vent de Sud sont, ces dernières années suivis d'orages et de précipitations. L'année passée, des phénomènes concomitants de vent fort et de précipitations ont été observés. Jusqu'à ce jour le district des 3 massifs reste épargné par les phénomènes de grêle, à contrario de l'A49 (centre de Saint Marcellin) lourdement frappé l'année dernière (2019) par un phénomène de grêle remarquable ;

Persistance (pas d'évolution notable en terme de fréquence /t années précédentes) des phénomènes de grêle et d'orages violents. En revanche une augmentation des quantités de pluie est pressentie lors de la survenance de ces événements ;

Aucun phénomène de pluie verglaçante n'a été observé sur le réseau en 20 ans.

3. OBSERVATION SUR LE RESEAU EXPLOITE

Constat sur la végétation : suite aux événements de canicule / sécheresse, les merlons / talus sèchent plus vite et la végétation est quasiment grillée par moments. Cependant ce constat est à mitiger car suite aux phénomènes orageux fréquents en été, la végétation repart immédiatement au vert ;

Cet assèchement de la végétation peut également être liée à l'augmentation de la fréquence des épisodes de fort vent du Sud ;

L'année passée (été 2019) sur le centre de Saint Marcelin (A49) suite au phénomène remarquable de grêle cité ci-avant, de nombreuses casses ont été constatées : sur le centre de Saint Marcellin de nombreux véhicules d'entretien ont fini en carrosserie avec notamment des pare-brise fendus, la grêle a également provoqué la casse de toitures d'entrepôts et d'arbres (quelques arbres ont fini couchés sur les clôtures de l'A49). Idem sur l'A48 à Saint Egrève ou de nombreux grands arbres ont fini couchés sur les clôtures de l'autoroute. L'A51 est toutefois épargnée notamment car phénomène moins violent sur le secteur mais aussi le secteur ne se situe pas en lisière de forêts et ne compte pas sur son domaine d'arbres d'eau (peupliers, Saules) ;

De fait sur le district des 3 massifs, malgré la persistance des phénomènes de grêle et d'orages violents, aucun dégât attribuable à ces événements n'est à déplorer ;

La première année de mise en service de l'A51, un talus situé au-dessus de la gare de péage du Crozet a présenté des signes d'instabilité : lors de phénomènes pluvieux, des poches d'eau se sont formées dans la terre végétale présente sur le talus et ont conduit à des phénomènes d'érosion importants qui a conduit à des coulées de terre jusque sur la chaussée. Depuis que la végétation s'est développée sur le talus concerné, ce phénomène n'a plus été constaté ;

YCa a constaté en 2018 une légère crue de la Gresse à proximité du tunnel du Riol. Cette crue n'a cependant pas eu d'impact sur l'infrastructure ;

Globalement aucune détérioration pouvant être liée aux phénomènes climatiques n'est observée sur l'infrastructure :

- Pas de problème d'inondabilité de la plaine du Lavanchon observé ;
- Pas de problème de réseau d'assainissement qui déborde observé ;
- Pas de problème d'érosion constaté sur talus.

Constats sur les chaussées : d'un point de vue des chaussées, l'A51 peut être divisé en deux tronçons. Sur le premier tronçon (15 premiers kilomètres à la sortie de Grenoble) les enrobés ont 20 à 21 ans d'âge. Ces enrobés sont donc à refaire mais cela est plus lié à leur vieillissement 'normal' qu'à l'évolution des températures (ce phénomène est d'autant plus visible sur une section très usée revêtue d'enrobés drainants) ;

Des phénomènes d'orniérage / ramollissement des enrobés peuvent être constatés en partie haute de la section mais YCa rattache ces phénomènes au trafic PL ;

YCa n'est pas en mesure de nous faire de retour sur l'état des ouvrages courants (PS / PI). YCa nous suggère pour cela de nous rapprocher de Mr Sébastien Michel en charge de l'inspection des ouvrages sur le district.

Sur le secteur de la plaine du Lavanchon, YCa a toutefois pu constater l'apparition de différentiel de tassement entre les remblais d'accès et les PS des voies communales (les remblais d'accès bougent, les ouvrages de type PS non). Des opérations de rechargement en enrobés ont déjà eu

lieu sur ces ouvrages. Les terrains alentours sont constitués d'argiles détremées / glaise. L'année dernière (2018, 2019 ?) de nombreux relevés sur ouvrages ont été effectués et certains PS ont été révisés ;

YCa signale également que les équipes de suivi OA lui ont déjà remonté des soucis liés aux piles non flottantes du viaduc de Monestier (les piles flottantes semblent bien se comporter). Les piles non flottantes 'modifient' actuellement les contraintes sur le viaduc.

Zones de talus de déblais équipés de descentes d'eau : il existe deux zones de talus équipés de descentes d'eau sur le secteur. Le curage des barbacanes est fait chaque année sur ces ouvrages, certaines coulent d'autre non, mais globalement, l'ouvrage se comporte bien.

Concernant l'usure des ouvrages en béton lié à l'utilisation du sel, seuls les ouvrages vieux (supérieurs à 13 ans) présentent des pieds de pile érodés jusqu'aux ferrailles apparentes. Des opérations d'hydrodémolition et d'application de résine sont programmées. Constat de vieillissement normal des ouvrages non lié au changement climatique.

4. TRAVAUX D'ENTRETIEN / MAINTENANCE

Constat sur le district des 3 massifs et les secteurs A49 à Saint Marcellin et sur le centre d'Annecy d'une réduction de la fréquence des déneigements ;

Les responsables du district restent cependant mobilisées sur les périodes hivernales (novembre à mars) car des pics de chute de neige restent possibles ;

En période estivales : augmentation des fréquences des pics de pollution qui conduit à la mise en place des réductions de vitesse des usagers sur les 8km de l'A51 en sortie d'agglomération Grenobloise ;

Impact des périodes de sécheresse sur les opérations de viabilité / espaces verts du district. Un constat de la diminution de la nécessité des opérations de tonte est fait. Actuellement 2 campagnes de fauchage, une au mois de juin, une au mois d'octobre sont réalisées. D'ici 3 ans YCa ne serait pas surpris de n'avoir à faire qu'une seule campagne de fauchage dans l'année ;

Impact des périodes de canicule sur la gestion des équipes de viabilité : l'activité des agents est adaptée avec des horaires adaptés : travail le matin de 6h à 10h pour les espaces verts et arrêts de ce type de travaux l'après-midi en raison des températures élevées. Lors de ces périodes, le planning journalier est adapté (amplitude horaire des postes inchangés mais changement des activités / tâches), des pacs d'eau en quantité sont provisionnés pour les opérateurs, les chefs d'équipes sont sensibilisés aux phénomènes liés à l'exposition aux fortes chaleurs (insolations) ;

Augmentation de l'amplitude des phénomènes orageux estivaux : dorénavant, en prévision de phénomènes pluvieux marqués, une vigilance plus accrue sur les réseaux d'assainissement est déclenchée : 1 équipe est envoyée sur le terrain pour faire le tour des réseaux d'assainissement (caniveaux à fente / caniveaux en béton / grilles de regards avaloirs) et un tour des bassins pour constater leur état général (absence d'embâcles). 10 à 15 ans auparavant, moins d'importance était attaché à la capacité des bassins et réseaux d'assainissement ;

Suite au constat de l'augmentation des phénomènes d'alternance des températures à l'échelle de la journée / nuit, création d'une astreinte de nuit pour des opérations de salage en fin de soirée (22h) afin d'éviter le gel des précipitations (pluies) de la veille si apparition de gelées matinales.

Les précipitations sous forme de pluie plus fréquentes en hiver conduisent au maintien du nombre des opérations de salage et de quantité de sel répandus ;

Organisation liée à la crise du Coronavirus : 1/3 des équipes sont actuellement sur le terrain. Les rotations d'équipes ont lieu tous les 15 jours. Les équipes en place sont actuellement composées d'une équipe de 4 agents le matin et d'une équipe de 4 agents le soir qui ne se croisent pas au moment du changement de poste. 1 cadre est sur place (tout cela représente 1/3 des équipes), le reste des cadres étant en situation de télétravail. Les mécanos sont priés de rester chez eux.

PROJET DE RECHERCHE MARI.CC

Méthodologie d'analyse de la Résilience des Infrastructures au changement climatique

1. PRESENTATION DE LA PERSONNE INTERVIEWEE ET DU DISTRICT

En raison des instructions de confinement liées à la crise due au virus Covid 19, la présente réunion a lieu par téléphone et ne peut être enregistrée.

Mr Jacques Moutier (JMo) – AREA est conducteur de travaux sur le district Lyon Chambéry, secteur de Chesnes. JMo fait partie des quelques conducteurs de travaux qui sont pluridisciplinaires (chaussées, bâtiment, OA, terrassements) et ont en charge les parties contrôles du patrimoine, les études simples et les travaux jusqu'à des montants limités à 8M€. La réalisation des travaux nécessite un contact permanent avec les personnes en charge de la viabilité (balisage). JMo est en poste sur le district depuis 1995 (25 ans).

Extension / Particularités du District Lyon Chambéry :

- Le secteur comprend l'A43 depuis le Pk3 à l'entrée de Lyon, Chesnes (gare de péage de Saint Quentin Fallavier), la bifurcation A43 Chambéry / A48 Grenoble, jusqu'à la Tour du Pin ;
- Le secteur comprend également le début de la branche de l'A432 (accès à l'aéroport de Lyon St Exupéry) ;
- La particularité du secteur est la largeur variable de la plateforme avec une section à 4 voies en secteur urbain (du Pk3 au Pk20 – gare de péage de Saint Quentin Fallavier), une section à 3 voies (du Pk20 au Pk40 – bifurcation A43 / A48) et une section à 2 voies du Pk40 à la Tour du Pin ;
- Le secteur comprend peu d'ouvrages exceptionnels : un viaduc en secteur urbain à Bourgoin, le reste des ouvrages étant des ouvrages courants (PS/PI/ouvrages hydrauliques) ;
- Le trafic sur le secteur est très dense (100 à 110 000 véhicules/jour) impliquant la réalisation des travaux d'entretien majoritairement de nuit ;
- Le secteur est majoritairement usité en trajets domicile / travail (affluence de trafic aux heures de pointe) et comprend 1 diffuseur tous les 5 à 7 km ;
- Sur le secteur de l'Isle-d'Abeau, l'A43 longe la rive gauche de la Bourbe qui est canalisée mais l'A43 traverse une zone de marécages de la Bourbe. Un projet de désensablement de la Bourbe est en cours car la Bourbe déborde régulièrement. L'idée est de modifier le canal actuellement rectiligne pour créer des méandres.
- Le secteur se situe principalement en zone de plaine (entre 220 m NGF et 350 à 380 m NGF du côté de la Tour du Pin).

2. OBSERVATION CLIMATOLOGIQUES

2.1. Températures

Constat de l'augmentation globale des températures sur l'ensemble de l'année.

2.2. Pluviométrie

Pas de constat particulier.

2.3. Tempêtes / phénomènes exceptionnels

Constat de l'apparition de tempêtes de courte durée mais violentes l'exemple du 14 novembre 2019 est cité, passage de la tempête Amélie, générant de forts vents et des précipitations sous forme de neige lourde et collante.

Les chutes de neige sur le secteur sont rares à exceptionnelles. Cependant il est tout de même constaté qu'il y a de moins en moins de chutes de neige sur le secteur. Les plus grosses chutes de neige ont lieu sur le secteur à proximité de l'intersection A43 / A432 où se situe une usine de laquelle s'échappe de grandes quantités de vapeur d'eau qui provoque des chutes de 'neige artificielle'.

Des phénomènes de brouillards / brouillards givrants peuvent être constatés le long du secteur de la Bourbe (secteur marécageux).

3. OBSERVATION SUR LE RESEAU EXPLOITE

Impacts sur la végétation : Les tempêtes violentes observées conjuguées à la sécheresse ont un impact sur la végétation (casse d'arbres).

L'un des impacts observable sur la végétation peut aussi être attribué aux débordements réguliers de la Bourbe. Les peupliers qui se trouvent dans les zones marécageuses pourrissent et finissent par être dangereux.

Il est constaté l'apparition et le développement des plantes invasives (renouée du Japon, Ambrosie) sur le secteur, l'ambrosie ayant tendance à prendre le dessus sur la végétation existante.

Impacts sur les ouvrages hydrauliques : l'envasement constaté de la Bourbe a pour effet d'envaser de façon très régulière l'un des OH situé 1 km après le diffuseur de l'Isle-d'Abeau constitué d'un cadre multiple de 3 travées de 3x2m sur 20 à 30 m de longueur. La canalisation de la Bourbe conduisait quelques années auparavant à une inondation régulière du secteur de l'Isle-d'Abeau. Depuis que la Bourbe sort de son lit ces problèmes d'inondation et d'ensablement ont tendance à diminuer (pertinence du projet de désensablement (création de méandres)).

A proximité de saint Quentin Fallavier, l'A43 traverse un canal (confluent de la Bourbe) qui peut avoir tendance à déborder et à inonder les chaussées de la voie lente en cas de phénomènes pluvieux importants (alentours du Pk22). Lors de ces phénomènes de pluie importantes des remous apparaissent à la surface du canal et le font déborder sur les chaussées. Ce phénomène peut cependant plutôt être rattaché à l'imperméabilisation des surfaces à l'amont du canal où se situe de nombreuses et grandes bases logistiques qu'aux phénomènes pluvieux.

Globalement, pas de problèmes particuliers de gestion des eaux sur le secteur puisqu'un système de surveillance, d'adaptation des ouvrages et d'entretien est en place depuis de nombreuses années. Les bassins situés le long des voies ne présentent pas de soucis de capacité particuliers.

JMo a constaté une seule fois, il y a un ou deux ans (2018 ou 2019) le débordement d'un bassin de grande capacité.

Actuellement est en cours le projet EPIA qui consiste à étancher l'autoroute entre Saint Quentin Fallavier et Coiranne (création de bassins et de biefs) afin de protéger les zones de captage à proximité.

Impacts sur les ouvrages : Des travaux de renforcement des pieds de piles de PS sont en cours. Ces travaux visent à renforcer les piles aux chocs des véhicules. Il est constaté que les pieds de pile sont attaqués par le sel, mais rien d'anormal.

Sur les ouvrages en terre, pas de constat de désordres particuliers (érosion / glissement de terrain).

Il existe un secteur de chaussées décalées à proximité de Bourgoin ayant fait l'objet d'une opération de coupe d'arbres. Les talus surplombant le secteur sont équipés en drains. Aucun désordre particulier n'a été constaté sur ces talus lors des opérations d'entretien de la végétation.

Aucun affaissement des chaussées n'est constaté (pouvant être dû à la sécheresse).

Impacts sur les chaussées : Aucun constat d'usure prématurée liée aux grandes chaleurs estivales n'est réalisé sur les chaussées du secteur. Tous les enrobés (couches de roulement) du secteur

ont été refaits entre 2003 et 2010. La campagne de réfection a été réenclenchée en 2016, soit 13 années après -> usure normale au regard du trafic.

Les zones revêtues par des enrobés drainants (proximité St Quentin Fallavier et Tour du Pin), présentent des problèmes de désenrobage et de fissuration des couches de roulement. Cependant ces problèmes apparaissent après 15 années de service de ces enrobés.

Le secteur est peu sujet à la formation de nids de poule.

Les plus gros impacts sur les chaussées sont liés aux problèmes de véhicules qui prennent feu sur la chaussée.

Le secteur comprend également une zone revêtue d'enrobés phoniques pour lesquels les constats sont similaires aux enrobés drainants (difficultés lors des opérations de déneigement).

4. TRAVAUX D'ENTRETIEN / MAINTENANCE

L'augmentation significative des températures en été conduit à la mise en place de consignes à destination des agents routiers, des bouteilles d'eau sont mises à disposition et les tâches sont adaptées en fonction de la température (principalement en viabilité étant donné la nécessité de réaliser la plupart des travaux sur voies de nuit en raison du fort trafic).

Les impacts observables sur la végétation conduisent d'année en année à mobiliser de plus en plus de moyens en abatage (afin d'éviter d'avoir des chutes d'arbre sur les chaussées). Des fois des talus entiers sont traités afin d'étêter les arbres.

Le traitement des plantes invasives est traité par les équipes en charge de la viabilité qui opèrent classiquement une campagne de fauchage au mois de juin et qui traitent le développement de l'ambrosie à la saumure.

Intervention tous les deux mois pour dévaser l'ouvrage hydraulique situé à proximité de l'échangeur de l'Isle-d'Abeau.

L'une des opérations menée par les équipes travaux (entretien classique) est le dégagement des bords de chaussée dans les zones revêtues d'enrobés drainants. Les enrobés drainants s'évacuant en bordure de chaussée à la limite entre les couches de roulement et les couches de base, afin de bien garantir le fonctionnement de ces enrobés, il convient de venir nettoyer / curer régulièrement les bords de chaussées (sur une épaisseur de 10 à 15cm).

Opérations de salage : chez AREA, il y a une culture de réaliser beaucoup de salages préventifs. Les agents suivent donc les évolutions de température et les courbes d'alerte météo et déclenchent des rondes au besoin. Les salages effectués sur le secteur sont donc majoritairement plus préventifs que curatifs.

Ces salages sont plus fréquents sur les secteurs revêtus d'enrobés drainants. En effet sur ces enrobés (25% de vides) le passage des poids lourds a tendance à faire pénétrer la neige dans les vides de l'enrobé, rendant plus délicats les opérations de déneigement et nécessitant l'emploi de calcium.

Il est constaté sur cet hiver 2019/2020 une baisse des opérations de salage.

PROJET DE RECHERCHE MARI.CC

Méthodologie d'analyse de la Résilience des Infrastructures au changement climatique

1. PRESENTATION DE LA PERSONNE INTERVIEWEE ET DU DISTRICT

En raison des instructions de confinement liées à la crise due au virus Covid 19, la présente réunion a lieu par téléphone et ne peut être enregistrée.

Mr Damien Mangez (DMA) est responsable travaux planification sur le district de Champagne dans le département de la Haute Marne, centre de Chaumont-Semoutiers. Dma assure ce poste depuis 2013 et était précédemment et depuis 2005 en charge de la viabilité ;

District de Champagne :

- Le district est composé de l'A31 du Pk86 (Langres) au Pk140 (péage de Montigny le Roy, au nord du département de la côte d'or) et de l'A5 du Pk186 (gare de péage de Ville-sous-la-Ferté) au Pk226 et la jonction avec l'A31 ;
- Le district se situe en zones boisées à une altitude moyenne de 350m NGF ;
- La zone est réputée pour ces températures annuelles moyennes froides ;
- 2 viaducs (dont un VIPP) et un mur en terre armée sont recensés sur le district.

2. OBSERVATION CLIMATOLOGIQUES

2.1. Températures

Constat de l'apparition de périodes de canicules en été ;

Constat de grandes variabilité des températures sur des périodes de temps courtes (passage du jour au lendemain de températures normales à des températures élevées) ;

Constat d'une augmentation des températures en hiver. L'une des conséquences est la diminution des phénomènes neigeux. Cet hiver 2019/2020 quasiment aucune sortie de déneigement n'a été réalisée, l'hiver précédent (2018/2019) une sortie ou deux alors que les hivers précédents étaient marqués par de fréquents épisodes neigeux d'une durée de deux à trois jours ;

L'impression de réchauffement en hiver se constate aussi par la disparition des températures extrêmes en hiver. Dans le passé, des températures de l'ordre de -10°C pouvaient s'installer durablement sur de longues périodes en hiver. L'hiver dernier des températures minimales de -3 à -5°C sur quelques jours ont pu être constatées et le reste du temps les températures sont restées positives.

2.2. Précipitations

Constat ces dernières années d'une augmentation des périodes de sécheresse, surtout ces 2 à 3 dernières années (depuis 2017) pendant lesquelles les précipitations restent importantes en hiver mais pendant lesquelles pas ou peu de précipitations ne tombent après les giboulées de mars et jusqu'à l'automne suivant ;

Constat également de l'apparition de phénomènes pluvieux de grande intensité en hiver souvent corrélées aux coups de vent cités ci-après.

2.3. Tempêtes / phénomènes exceptionnels

Constat de l'augmentation du nombre de tempête (vent fort) en hiver : le nombre des phénomènes de vent violent ont encore augmenté en cet hiver 2019, en remplacement du froid qui pouvait régner dans une météo plus calme auparavant ;

DMA ne constate pas d'augmentation de la fréquence, de l'étendue ou de l'intensité des phénomènes de grêle par rapport aux années précédentes (cela arrive comme les années précédentes une fois ou deux dans l'année générant quelques dégâts) ;

Constat ces dernières années d'une augmentation de la fréquence des pluies verglaçantes composées de pluies en surfusion et de pluie sur sols froid au moment du dégel (augmentation de la fréquence des périodes de dégel en hiver). DMA décrit une impression que le phénomène de pluies en surfusion devient plus fréquent que les épisodes neigeux ;

Constat également de phénomènes de pluie en soirée qui gèle dans la nuit (chaussée mouillée qui gèle).

3. OBSERVATION SUR LE RESEAU EXPLOITE

Constats sur l'infrastructure : Dma cite l'exemple d'un talus de déblai « en plaquettes » pour lequel est constaté une augmentation de l'érosion due aux phénomènes de fortes pluies en hiver. Le déblai est situé dans une zone agricole, les champs en amont du déblai sont équipés de drains agricoles. Lors de fortes pluies ces drains sourcent dans le talus du déblai générant l'érosion importante des plaquettes qui composent le talus du déblai. Avant 2011, le produit de cette érosion venait colmater les fossés et les grilles des regards avaloirs le long des voies de circulation. Cette situation a conduit à provoquer des travaux sur le réseau d'assainissement (création de réseaux de collecte des eaux de ruissellement en amont des voies).

A proximité de ce secteur, au Pk128, les fortes pluies ont également entraîné un lavage des fines des matériaux constituant le remblai qui a généré l'apparition de fissures longitudinales sur une centaine de mètres de long sur la BAU. Depuis et suite à expertise géotechnique, les masques drainants de ces remblais ont été refaits.

Au niveau des ouvrages courants (PS et PI), les équipes travaux sont vigilantes sur le cheminement de l'eau pendant les pluies pour éviter le ravinement des remblais techniques et l'apparition de désordres sur ces ouvrages.

Des apparitions de 'sauts' au niveau des joints d'ouvrages sont constatés certainement dus au vieillissement de ces joints sans que Dma ne puisse affirmer si ces vieillissements de joints sont dus aux chaleurs estivales ou au vieillissement naturel des joints.

Concernant les OH de traversée (PIOH) les équipes travaux réalisent fréquemment des visites d'inspection afin de suivre l'apparition d'embâcles, mais aucune évolution n'est constatée ces dernières années.

La majeure partie des phénomènes d'érosion constatés sur les ouvrages en terre sont dus aux problèmes liés à la canalisation des eaux de ruissellement.

Constat sur les chaussées : pas de dégradation particulières notées sur les chaussées dues à l'augmentation des températures en été.

En hiver, en raison de l'augmentation des précipitations, constat d'une apparition de nids de poule et de phénomènes de désenrobage.

Constat sur la végétation : les alternances de phénomènes pluvieux intenses et de périodes de vent fort en hiver ont conduit à l'arrachement de certains grands arbres sur des talus de déblais. La force du vent sur ces grands arbres alliés à l'état détrempe des terrains constituant les talus ont conduit à ces arrachements.

Constats sur le réseau d'assainissement : cité dans le paragraphe 4 ci-après.

Dma cite également des travaux de grenailage / rainurage entrepris sur une partie de la plateforme à 2x3 voies dans une zone de changement de pente longitudinale sur laquelle les eaux de pluie avaient du mal à s'évacuer générant des accumulations lors de fortes pluies. Depuis ces travaux une amélioration de l'évacuation de ces eaux est constaté. La zone traitée nécessite désormais un nettoyage régulier des rainures au karcher.

4. TRAVAUX D'ENTRETIEN / MAINTENANCE

Diminution des phénomènes neigeux qui réduisent la fréquence des opérations de déneigement en hiver.

L'apparition de pluies de forte intensité en hiver a conduit au constat que le réseau d'assainissement de l'autoroute était en capacité limite lors de ces événements. Cela conduit les équipes de viabilité à être très vigilante sur l'entretien de ce réseau d'assainissement afin de s'assurer que l'ensemble des exutoires (grilles des regards avaloirs, fenêtres sous GBA) restaient bien propres et exemptes d'embâcles.

Une vigilance accrue est apportée sur le suivi des arbres à risque.

Dma cite également une augmentation de l'entretien afin de retirer les mauvaises herbes des joints en béton et des grilles qui est due à l'abandon de l'usage de produits phytosanitaire pour le désherbage.

PROJET DE RECHERCHE MARI.CC

Méthodologie d'analyse de la Résilience des Infrastructures au changement climatique

1. PRESENTATION DE LA PERSONNE INTERVIEWEE ET DU DISTRICT

En raison des instructions de confinement liées à la crise due au virus Covid 19, la présente réunion a lieu par téléphone et ne peut être enregistrée.

Mr Vincent Verstracte (VVe) est responsable viabilité / sécurité au centre de Pouilly-en-Auxois. Vve assure ce poste depuis 12 ans ;

District du Morvan :

- Le district est composé de 50km d'autoroute sur 2 voies. Il comprend l'A6 à quelques km de Dijon jusqu'à quelques km d'Auxerre ;
- La section comporte beaucoup de courbes et oscille entre 300 et 400m NGF. Elle culmine au col du Bessay à 565m d'altitude (situé au Sud du district et exposé au Nord) ;
- La section comprend une rampe pour véhicules lents de 8km avant le col de Bessay ;
- La section comprend le viaduc de Pont d'Ouche (entre Pouilly et Beaunes) qui est un viaduc de 600m en courbe ;
- La section franchit le canal de Bourgogne et traverse également les rivières Armançon et la Vandenesse ;
- C'est une section où la viabilité hivernale est prononcée, le Morvan étant sujet à des hivers rigoureux. La plupart des précipitations arrivant de l'ouest tombent sur le Morvan sous forme de neige en hiver ;
- La section se situe majoritairement en zone rurale ;
- Le trafic sur la section est important.

2. OBSERVATION CLIMATOLOGIQUES

2.1. Températures

Constat de l'augmentation des températures élevées en été avec les exemples des années 2003 et 2019 exceptionnelles en termes de canicule ;

Constat d'un hiver exceptionnellement doux cette année avec des températures basses atteintes de -6°C lors de 2 matinées et des températures positives le reste du temps. Habituellement des périodes de froid durable s'installent sur le secteur avec il y a 10 ans en arrière des températures de l'ordre de -10°C à -15°C s'installant sur des périodes de 3 semaines avec des pics de froid jusqu'à -20°C.

Constat également d'une variabilité rapide des températures à l'échelle de la journée avec des rafraîchissements rapides pouvant avoir lieu la nuit (phénomènes de gelée matinale sur chaussée humide à cause des pluies de la veille survenus 3 à 4 fois cette année).

2.2. Pluviométrie

Constat ces dernières années d'une augmentation des grandes périodes de sécheresse ;

Constat également de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des fortes pluies en hiver. Il y a 3 à 4 ans (2016 / 2017) ces phénomènes pluvieux ont donné une impression de mousson sur le secteur.

2.3. Tempêtes / phénomènes exceptionnels

En hiver, les pluies en surfusion (pluies verglaçantes) avaient habituellement lieu une seule fois dans l'hiver sur une longueur de section de 500 à 600m. Depuis quelques années ces phénomènes peuvent se produire 2 à 3 fois dans l'hiver sur l'ensemble de la section (30 km) ;

Augmentation de la fréquence des phénomènes d'isothermie en début d'hiver. Ces phénomènes consistent en des précipitations sous forme de neige fondue par des températures positives (*définition MF : Phénomène caractérisé par l'abaissement de la limite pluie neige au cours d'un épisode de fortes précipitations assez durable sans vent significatif. La transformation du flocon en goutte (solide à liquide) demande de la chaleur et donc refroidi l'atmosphère, la goutte rencontre une atmosphère plus sèche et donc s'évapore, ceci consomme aussi de l'énergie (en chaleur) et donc refroidi à nouveau l'atmosphère. Ce sont les précipitations qui font descendre la limite pluie neige jusqu'au sol. La neige dite "d'isothermie" ainsi formée est souvent lourde et humide (mouillée ou collante)*). Ces phénomènes occasionnels dans le passé et générant une neige qui ne tient pas au sol sont devenus depuis 3 à 4 ans systématiques au mois de novembre avec des quantités importantes de précipitations neigeuses sur des durées de 1 à 3 h générant d'importantes quantités de neige qui tient au sol. Ces phénomènes survenant par températures positives, ils sont difficiles à prévoir et surviennent alors qu'aucune action préventive préalable n'ai pu être mise en œuvre par le service de viabilité. En général il s'agit d'une neige lourde facile à retirer des voies de circulation malgré les quantités importantes ;

Constat de l'augmentation du nombre de tempête (vent fort) en hiver : Auparavant, ce type de tempête de vent arrivait une fois dans l'hiver. L'hiver dernier des coups de vents avec des vitesses de l'ordre de 70 à 80 km/h sont survenus plusieurs fois dans l'hiver ;

Vve semble ne pas avoir constaté une augmentation de la fréquence ou de l'intensité des phénomènes de grêle par rapport aux années précédentes.

3. OBSERVATION SUR LE RESEAU EXPLOITE

Constat sur la végétation : les périodes de grande chaleur associées à une augmentation de la sécheresse ont tendance à griller la végétation.

Ajouté à ce phénomène on constate une apparition de phénomènes de feux d'accotement qui nécessite de faire intervenir les pompiers. Ces phénomènes qui n'existaient pas auparavant peuvent désormais se reproduire 2 à 3 fois dans l'été (3 à 4 interventions de ce type lors de l'été 2019).

L'augmentation de la fréquence des coups de vent fort en hiver ont un impact sur les grands arbres (pins, charmes) avec constat de casse de branche et de chutes d'arbres sur aire de service et clôtures. Phénomène peut être augmenté par un affaiblissement de ces arbres en été en raison de la sécheresse.

Constats sur l'infrastructure : La sécheresse ainsi que la diminution des niveaux de nappe induite ont tendance à provoquer le tassement des infrastructures. Ce tassement se matérialise sur le district par le tassement des remblais aux abords des PI et PIOH perceptible par les utilisateurs par l'apparition d'un dénivelé entre le PI et ses remblais d'accès : « ça tape quand on franchit le PI » (les PI semblent surélevés).

Sur le district, ces phénomènes de tassement ont également généré des désordres sur certains grands talus de remblai : exemple au Pk269 (entrée d'une aire de repos) ou un talus de remblai de 7 à 8 m de hauteur sur lequel sont apparues des crevasses longitudinales entre la BAU et l'accotement (crevasses dans laquelle il est possible de passer la main) ainsi que l'apparition de fissures longitudinales sur les enrobés principalement sur la BAU mais à certains endroits jusqu'à la voie lente. Vve décrit ce phénomène en disant que cela donne l'impression que le talus s'écarte de la chaussée. Les remblais objet de ces désordres se situent dans des zones plutôt plates avec des cultures (champs) aux abords de l'infrastructure. Ces désordres apparaissent plutôt en septembre / octobre (fin d'été).

Ces phénomènes d'affaissement sont encore plus prononcés sur l'A38 entre Dijon et le district du Morvan (partie de réseau gérée par la DIR). Où l'apparition des fissures telle que décrite dans le paragraphe ci-avant est plus avancée avec décollement de morceaux d'enrobés, signalisation en place pour des réductions de voies, affaissements prononcés sur voie lente sur des profils en léger remblais et en profil rasant. Ces désordres sont également apparus en septembre / octobre.

Les périodes de grande chaleur induisent également des défauts sur les joints d'ouvrage (PS) qui se dilatent de façon importante. Les joints tapent quand on franchit les PS sur le réseau extérieur. Matérialisant un déplacement du joint ou peut-être des remblais d'accès des PS.

Des travaux en urgence de reprise des joints sur le viaduc du pont d'Ouche ont dû être lancés récemment. Cependant, Vve estime que ces travaux en urgence peuvent ne pas être dus aux chaleurs importantes mais pourraient être liés au remplacement des joints par des joints mécaniques quelques années auparavant.

D'une manière générale, les chaussées ne semblent pas souffrir des périodes de canicule.

Un phénomène de faïençage des chaussées est cependant apparu sur les chaussées du viaduc du pont d'Ouche.

Le district possède un déblai rocheux revêtu de filets de récupération des chutes de pierres mais aucun souci particulier n'est noté sur ce déblai (fréquence de nettoyage des filets inchangée).

Constats sur le réseau d'assainissement : Lors des phénomènes de fortes pluies en hiver, Vve constate des phénomènes de stagnation d'eau sur les chaussées au plus fort des phénomènes pouvant provoquer quelques accidents mais rattache cela à l'intensité des pluies et non à un dysfonctionnement du réseau d'assainissement. Réseau qui donne plutôt l'impression d'être encore adapté à ces phénomènes.

Concernant les rivières aux abords du réseau autoroutier : les niveaux d'eau dans les rivières étant globalement bas en raison des grandes périodes de sécheresse, Vve constate plutôt une diminution des phénomènes de crue malgré les phénomènes pluvieux forts de l'hiver. Les dernières crues observées remontent à 3 à 4 années en arrière (2016 / 2017) sans être exceptionnelles. Pas d'impact sur le réseau.

4. TRAVAUX D'ENTRETIEN / MAINTENANCE

Les chaleurs estivales importantes conduisent à des aménagements de poste en été avec des prises de poste tôt le matin et l'aménagement de pauses toutes les 2 heures. Des efforts de prévention sont également mis en œuvre.

Les périodes de sécheresse en été ont un impact sur les opérations de tonte dont la fréquence est diminuée. Les opérations de fauchage sont toujours de deux dans l'année.

En hiver, les phénomènes de refroidissement rapide dans la nuit conduisent les équipes de viabilité à plus de réactivité, les équipes devant être présente la nuit pour sortir les sapeurs le cas échéant.

En hiver, l'augmentation de la fréquence des coups de vent induisent une augmentation de la fréquence des visites des arbres à risque. Auparavant une visite annuelle était programmée. Les derniers hivers, une douzaine de visites de ce type ont été réalisées. Augmentation également du nombre d'abatage d'urgence à réaliser.

L'augmentation du nombre de pluies fortes en hiver conduisent les équipes de viabilité à tourner plus régulièrement sur le réseau afin de nettoyer, notamment les fenêtres d'évacuation des eaux sous GBA.

Plus généralement, Vve a mis en place une sensibilisation / prévention du personnel aux phénomènes météo peu habituels.

PROJET DE RECHERCHE MARI.CC

Méthodologie d'analyse de la Résilience des Infrastructures au changement climatique

1. PRESENTATION DE LA PERSONNE INTERVIEWEE ET DU DISTRICT

En raison des instructions de confinement liées à la crise due au virus Covid 19, la présente réunion a lieu par téléphone et ne peut être enregistrée.

Mr Raphaël Grand (RGr) est responsable travaux / planification sur le district du Haut Bugey, poste qu'il occupe depuis 3 ans, mais RGr a occupé d'autres postes sur le district depuis plus de 15 ans ;

District du Haut Bugey :

- Le district est composé des autoroutes A40 et A404 à l'est du département de l'Ain ;
- Le district se situe dans le massif du Jura avec en point haut le viaduc de Charix à 683m d'altitude et comprends également le col de Ségure à 650m d'altitude avec une rampe d'accès au col assez conséquente ;
- Le district comporte 40 km de voies riche en OANC : 3 tunnels, pas mal de viaducs de quelques centaines de mètres de longueur à 3 km de longueur ;
- En terme d'exploitation, il n'y a pas de BAU ;
- L'A40 a été ouverte en 1989 et l'A404 en 1997 ;
- L'A404 culmine à 400m avec une chaussée décalée à flanc de coteau ;
- Le district comporte donc pas mal d'ouvrages de soutènement de tous types : remblais renforcés, murs poids, murs ancrés, parois clouées ;
- Un plan de surveillance des ouvrages est en place depuis l'ouverture et est actuellement suivi par Egis (Pascal Ordrenneau et Bernard Charles). Ce suivi comporte un suivi d'instrumentation (cables dynamométriques, inclinomètres, balises à fibres optiques, fissuromètres...) ;
- Certaines forêts en amont des voies et sous des falaises sont des forêts de protection (protection contre la chute de masses rocheuses). Ces forêts appartiennent au patrimoine autoroutier APRR et sont exploitées comme des forêts communales avec mise en place de principes de coupe en rapport avec la protection des voies ;
- Le climat sur le district est de type climat continental marqué.

2. OBSERVATION CLIMATOLOGIQUES

2.1. Températures

Constat de l'augmentation des températures élevées en été ;

En hiver : constat de disparitions des masses froides (périodes anticycloniques liées au froid). Dans le passé de longues périodes avec des températures comprises entre -15°C et -20°C (extrema à -30°C en 1990) pouvaient s'installer et durer plusieurs semaines. Ces derniers hivers : absence de telles périodes.

2.2. Pluviométrie

Les périodes sans pluie l'été sont plus marquées et s'alternent avec des passages de pluie intenses de type épisodes cévenols.

Il est constaté une diminution pour cet hiver des cumuls de neige. Habituellement il tombe sur le district des cumuls pouvant atteindre 3,5m sur l'hiver. Cette année le cumul estimé est de l'ordre de 0,5m.

2.3. Tempêtes / phénomènes exceptionnels

Constat d'une augmentation des conflits de masses d'air qui se manifestent par des orages violents et de la grêle. Ces phénomènes plutôt habituels en fin d'été ont désormais lieu toute l'année. « il n'y a plus de saison d'orage ».

Les phénomènes de pluies verglaçantes de type pluies en surfusion deviennent plus rares et sont remplacés par des phénomènes de type pluies sur sol gelé plus fréquents.

Ressenti d'une augmentation des grands coups de vent avec des vitesses de vent de l'ordre de 100km/h. Ces phénomènes existaient déjà dans le passé mais sont désormais plus fréquents.

3. OBSERVATION SUR LE RESEAU EXPLOITE

Constats sur l'infrastructure : Le district est peu sujet aux phénomènes de glissements de talus ou d'érosion.

Sur A40, RGr a cité un mouvement de talus dans une zone argileuse qui a été traité avec succès par la mise en œuvre d'un masque drainant.

Sur A404, RGr cite quelques désordres sur des talus également repris par la mise en place de masques drainants ou de poutres ancrées mais ne peut affirmer que ces désordres pourraient être liés au changement climatique.

RGr ne constate pas d'évolution notable sur les talus de déblais rocheux. Les filets de protection ne se remplissent pas plus vite qu'à l'habitude.

RGr ne constate pas de soucis particuliers sur les joints des viaducs, ces joints sont à son sens surdimensionnés et RGr n'a jamais constaté que l'un d'eux pouvait se trouver en situation de dilatation bloquée.

Dans la traversée de la plaine du Brion un ouvrage cadre a déjà provoqué des fissures sur les GBA (ouvrage de décharge en amont du viaduc). Cependant cet ouvrage est surveillé (B. Charles) depuis 1997 pour des problèmes de tassement. Ceux-ci ne peuvent donc être mis en relation avec les effets du changement climatique.

Aucun constat sur une dégradation avancée du béton des ouvrages n'est fait.

RGr signale que certains revêtements peuvent avoir une résistance faible aux UV et sels de déverglaçage, mais ceux-ci sont connus.

Sur les remblais renforcés, aucun constat de corrosion avancée ou précoce des armatures n'a été fait lors des premières opérations de contrôle des armatures témoin.

Lors des derniers IPOA sur des viaducs sur appuis néoprène ou sur appuis glissants, aucun constat de modification du principe de fonctionnement des ouvrages n'a été fait.

Fonctionnement des PIOH, RGr cite l'un des ouvrages qui nécessite un curage régulier de l'alluvionnement (galets) afin de conserver sa section hydraulique. Cependant ce besoin de curage et l'alluvionnement constaté sur cet ouvrage existe depuis toujours.

Aucun ouvrage (PIOH) n'est sujet à un éventuel affouillement de ses berges.

Constat sur la végétation : RGr cite les conséquences du passage de la pyrale du buis. Les buis sont en effet présents sur les falaises surplombant le viaduc de Nantua (seule espèce présente sur les falaises). RGr craint que la disparition des buis induise une augmentation du risque de chute de blocs sur le viaduc.

RGr cite également un autre parasite, le Bostryche de Scolite. Ce parasite apparu dans les forêts d'épicéa conduit à ce que des bouquets entiers d'épicéa rougissent puis meurent. Cela a pour conséquence de faire disparaître les écrans de protection forestiers.

RGr cite un troisième parasite, qui attaque les frênes et font mourir et chuter les têtes de frênes, induisant un risque pour les usagers et une détérioration des clôtures.

L'ambrosie a également fait son apparition désormais jusqu'à 700m d'altitude (apparue depuis 5 ans ou plus).

Constats sur le réseau d'assainissement: Aucun constat de dysfonctionnement du réseau d'assainissement n'est fait. Le réseau semble bien fonctionner. En 15 ans RGr n'a connu qu'une seule fermeture de bretelle momentanée suite à une forte pluie ayant inondé la bretelle.

Aucun soucis d'inondation des chaussées n'a été constaté.

Quelques soucis d'accumulation d'eau pendant de fortes pluies peuvent parfois être constatés dans les zones de changement de dévers. En cas de constats de ce type les équipes travaux se mobilisent par la suite pour créer des avaloirs complémentaires sur le réseau.

Les bassins hydrauliques fonctionnent correctement. Ceux-ci peuvent déborder (surverse) lors d'évènement pluvieux marqués, et il est vrai que la fréquence de ce cas de figure semble augmenter, cependant aucun désordre induit ne peut être constaté. Sur certains ouvrages, il se peut que ce soit la rivière qui reflue dans les bassins mais ce phénomène est considéré de l'ordre du normal.

Constats sur les chaussées: lors des fortes chaleurs, une recrudescence des orniérages notamment sur les viaducs ont pu être constatés. Ce type d'orniérage était particulièrement visible sur l'un des viaducs en courbe où des bourrelets d'enrobés conséquents ont, par endroits, commencé à apparaître.

Ce phénomène a pu apparaître en raison des températures élevées mesurées à la surface et accentué par les effets dynamiques sur les joints du viaduc. Ces phénomènes peuvent conduire à la formation de nids de poule.

Sur le reste des sections aucun constat anormal de ressuage ou de remontée de bitume.

Une vigilance des équipes travaux est apportée sur les opérations de pontage car ceux-ci ont constatés que les pontages réalisées de nuit pendant les périodes de canicule avaient une durée de vie limitée.

4. TRAVAUX D'ENTRETIEN / MAINTENANCE

Une modification des plans d'exploitation des massifs forestiers victimes du Bostryche de Scolite en vue d'en limiter son expansion est mise en œuvre.

Cette année réduction importante des sorties de déneigement. Ces sorties ont majoritairement consisté en un traitement préventif alors qu'habituellement des sorties en curatif sont nécessaires.

PROJET DE RECHERCHE MARI.CC

Méthodologie d'analyse de la Résilience des Infrastructures au changement climatique

1. PRESENTATION DE LA PERSONNE INTERVIEWEE ET DU DISTRICT

En raison des instructions de confinement liées à la crise due au virus Covid 19, la présente réunion a lieu par téléphone et ne peut être enregistrée.

Mr Baptiste Jeannin (BJe) est adjoint au chef de district en charge de la viabilité.

Mr Fabien Laurence (FLa) est responsable travaux et planification sur le district et est en poste sur le district depuis 7 ans.

District du Dijonnais :

- Le district est situé dans le département de la Côte d'Or jusqu'à la limite au Nord avec le département de la Haute-Marne. Il est composé de l'autoroute A31 depuis Nuits-Saint-Georges au Pk9 jusqu'au plateau de Langres au Pk86 ;
- Le district comporte aussi l'A39 du Pk0 au Pk22 et l'A311 (prolongement de la rocade de Dijon jusqu'à l'A31) ;
- Le climat sur le district est globalement continental. Le district peut être divisé en deux ensembles climatiques : un climat doux sur le secteur de Chevigny-Saint-Sauveur et un climat froid plus au nord sur le secteur de Til-Châtel jusqu'au plateau de Langres avec du gel.
- Le district est globalement plat à une altitude voisine de 400 à 420m et comporte la rampe d'accès au plateau de Langres jusqu'à l'altitude de 600m.
- Le district est donc un district en étoile avec un trafic pendulaire dense (sur les sections A311 et A39) et un trafic routier lourd important sur la section A31 ;
- Un chantier d'élargissement de l'A31 à 2x3 voies a été mené de 2008 à 2010 ;
- Le district est majoritairement en remblai (80% du linéaire). Une seule zone de déblai est mentionnée, il s'agit d'un déblai rocheux (craie) au Pk 70 de l'A31.

2. OBSERVATION CLIMATOLOGIQUES

2.1. Températures

Constat de l'augmentation des températures élevées en été ;

En 2019, les températures ont dépassé les 40°C pendant 1 mois.

Diminution des périodes de grand froid en hiver. L'hiver dernier (2019/2020), il y a eu un jour ou deux pendant lesquels la température est descendue à -5, -6°C pendant une heure. Il y a dix ans des périodes de -5°C à -10°C pendant une semaine étaient normaux. Cela n'est pas arrivé ces 5 dernières années. Le dernier grand froid notable qu'ont FLa et BJe en mémoire date de 2008 avec un pic à -18°C pendant deux jours.

2.2. Pluviométrie

Augmentation des périodes de sécheresse : cela fait plusieurs années (3 à 4 ans) que les restrictions d'eau durent presque toute l'année « il y a une dizaine de jours on est sorti de la restriction d'eau de l'année dernière » ;

Ces phénomènes de sécheresse sont couplés à des phénomènes de forte pluies en hiver. Ces phénomènes de forte pluies entraînent une augmentation notable des crues en hiver (2 crues notables ont eu lieu ces 5 dernières années, l'une en hiver, l'autre au mois de mai). L'eau des cours d'eau peut monter très rapidement (sans toutefois d'apparition de régime torrentiel). Les fortes pluies sont des phénomènes ponctuels et de durée limitée. Les phénomènes d'inondation cités peuvent durer une semaine sans effet sur les restrictions d'eau. Ces inondations concernent principalement les terrains avoisinants l'autoroute mais peuvent déborder sur les chaussées (peut atteindre la voie médiane).

En raison des fortes chaleurs et des grandes périodes de sécheresse, diminution de la rosée matinale.

Les phénomènes de neige sont et restent rares sur le secteur de Chevigny-Saint-Sauveur.

Sur le secteur de de Til-Châtel au plateau de Langres entre 2013 et 2017 quelques sorties de déneigement étaient nécessaires chaque hiver. Depuis 2017 les sorties de déneigement se font de plus en plus ponctuelles.

2.3. Tempêtes / phénomènes exceptionnels

Constat que les phénomènes de grêle ne sont pas plus fréquents qu'auparavant. Il est cependant arrivé que BJe ai à sortir les lames de déneigement en été du côté de Langres afin de dégrêler les chaussées.

Augmentation des phénomènes de pluies sur sol gelé / pluies en surfusion. Pendant l'hiver 2018 / 2019, une dizaine de phénomènes de ce genre ont été recensés. Impression que ces phénomènes sont plus réguliers qu'auparavant.

Les phénomènes de grand vent sont plus fréquents avec apparition de quelques phénomènes plus violents (toits des maisons emportés). Ces dernières années (et notamment pendant l'hiver 2019/2020 pendant lequel ces tempêtes hivernales se sont enchainées), il arrive plusieurs fois dans l'hiver des phénomènes de vents supérieurs à 80 km/h.

Impression de diminution des phénomènes de brouillards. Avant 2013, il y avait du brouillard 1 jour sur deux en hiver dans le secteur de Mirande Chevigny. Cet hiver (2019/2020), moins de 20 jours de brouillard ont été recensés (à Dijon il y a habituellement 60 à 80 jours de brouillards dans l'année).

3. OBSERVATION SUR LE RESEAU EXPLOITE

Constats sur l'infrastructure : En raison des périodes de sécheresse, de nombreux affaissements de chaussée ont été constatés sur A31. Ces affaissements sont constatés principalement sur les zones élargies de l'A31 (affaissement plus prononcés) mais se constatent également sur toute la largeur de la chaussée au droit de certains PI (marche de 5 à 8cm parfois constatée). Depuis 2 ans, chaque année, il faut refaire les enrobés à cause de ces phénomènes d'affaissement. Cela concerne l'ensemble du district. Ce phénomène est visible depuis maintenant 5 ans. BJe et Fla estimerait que l'ensemble de la section s'est affaissée d'une moyenne de 3cm.

BJe et Fla citent un phénomène de tassement de la voie de droite (élargie) au PK70 sur un linéaire de 200m.

Des affaissements peuvent aussi être constatés sur certains PS.

Supposition d'une augmentation de la fréquence des chutes de blocs du déblai rocheux (craie) au Pk70. Depuis quelques années (environ 5ans), les agents d'entretien demandent à faire des visites préalables au pied de ce déblai afin de retirer les blocs pouvant endommager les pales des engins de fauche. Ces deniers temps, des cailloux se sont décrochés et ont atteint la BAU.

Constat sur la végétation : en raison des périodes de sécheresse conjuguées à l'augmentation des phénomènes de vent violent, BJe et Fla constatent depuis 2 à 3 ans une augmentation du nombre de chutes d'arbres sur accotement et aires de repos et une augmentation de la fréquence de coupe des arbres dangereux.

En raison des grandes chaleurs estivales et des périodes de sécheresse associées, les phénomènes de feu d'accotement sont plus fréquents. Ces phénomènes sont parfois dus aux tracteurs de pente utilisés pour le fauchage qui prennent feu lors des opérations de fauchage ;

En raison du beau temps plus fréquent, la végétation démarre plus tôt en saison avec des phénomènes de pousse au printemps assez vigoureuse.

L'ambrosie est présente depuis toujours sur le district mais grâce au traitement réalisé, celle-ci a plutôt tendance à disparaître.

Apparition en revanche des chenilles processionnaires sur les pins noirs et sapins présents sur le district. Récemment des voisins ont alerté le district car une centaine de nids sont apparus sur une dizaine d'arbres d'une zone mitoyenne. Une opération de traitement est prévue sur cette zone.

Constats sur le réseau d'assainissement : en raison de l'augmentation de l'intensité des pluies en hiver, un constat du manque de capacité de l'infrastructure est fait par Fla. Les lumières sous GBA sont réparties de façon normées mais lors de fortes pluies, il arrive que l'eau ne soit pas évacuée suffisamment rapidement de la chaussée et il arrive que la BAU et la voie lente (parfois jusqu'à la moitié de la voie médiane) soient inondées. BJe se rappelle d'une nuit assez compliquée en 2019 pendant laquelle, lors d'un épisode de forte pluie sur deux endroits d'A39 et d'A31 la BAU et la voie lente se sont retrouvées inondées ainsi que l'une des bretelles d'accès à l'autoroute.

Le reste du réseau d'assainissement semble fonctionner correctement. BJe et Fla n'ont jamais constaté de problème de bassin qui déborde.

Constats sur les chaussées : pas de constat de dégradation particulières sur les chaussées des voies principales.

Les problèmes de chaussée constatés sont aux alentours des zones d'affaissement au passage des PI. Lorsque les sauts sont importants (5 à 6cm), les passages de roue (début d'orniérage) deviennent visibles 200 à 300 m autour du franchissement de l'ouvrage.

En général les prestations de traitement des nids de poule sont déclenchées plus fréquemment en hiver en raison de l'éclatement des chaussées à cause du gel. Ces dernières années le recours à ces prestations a diminué.

BJe cite le cas de l'aire de service de Dijon-Brognon sur laquelle est constatée de nombreux phénomènes d'orniérage et de nids de poule (« la surface de l'aire est un véritable champ de bosses »). Cependant Fla rappelle que cette aire est très utilisée par les PL, que les enrobés de cette aire ont 30 ans et que l'on constate de façon générale une augmentation du chargement des PL (aujourd'hui plus fréquemment supérieurs à 40 tonnes).

4. TRAVAUX D'ENTRETIEN / MAINTENANCE

L'entretien de la végétation (opérations de tonte, fauchage) doivent être menés plus tôt en saison.

Les phénomènes de chutes d'arbres cités ci-avant induisent une augmentation des opérations d'entretien des clôtures.

Lors des phénomènes de fortes pluies en hiver, mobilisation des équipes en cas d'apparition de phénomènes d'inondation des chaussées pour créer des saignées dans la terre des accotements (si pas de GBA) et pour nettoyer les lumières sous GBA.

Constat d'une réduction des sorties de déneigement.

Pendant l'hiver 2018/2019, sur le secteur de Til-Châtel au Nord du département, une dizaine de sorties de salage préventif pour du verglas ont eu lieu et une sortie de déneigement. Cet hiver, aucun salage n'a été réalisé sur le secteur de Beaune / Dijon. La conséquence est une réduction du besoin en sel. Cet hiver 150 tonnes ont été consommés contre 1500 tonnes les hivers précédents.

Fonctionnement lié à la crise du Covid 19 : les équipes ont été divisées par trois. Elles se composent d'équipes de 4 personnes plus un encadrant qui reste toujours avec la même équipe. Les équipes enchainent les postes avec une heure de battement afin de ne pas se croiser. Tout est cloisonné.