



André HORTH

DGITM

IGR Résilience au changement
climatique, chef de pôle de Lyon



Retour d'expérience méthodologique de l'étude de résilience du RRN

André HORTH
DGITM/DMR/ENT



**MINISTÈRE
DES TRANSPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Les routes sont impactées par les épisodes météorologiques et subissent les impacts du changement climatique



L'étude de vulnérabilité du réseau routier national (RRN) au changement climatique, menée par la direction des mobilités routières (DMR) entre septembre 2023 et octobre 2025, portant sur 21 073 km de voirie, dont 11 629 km d'autoroutes, financée par l'État et au prorata du linéaire de réseau par les sociétés concessionnaires, confiée à Setec/RWT :

- est utilisée par les gestionnaires pour élaborer leur plan d'adaptation
- est une référence méthodologique pour la communauté technique

L'étude de vulnérabilité du RRN est d'intérêt général

PNACC 3 Mesure 30 : « Assurer la résilience des systèmes de transport et de mobilité »

L'action n°1 de cette mesure demande à tous les gestionnaires d'infrastructures et services de transport d'établir des plans d'adaptation et cite comme RÉFÉRENCE :

➔ l'étude de vulnérabilité du RRN au changement climatique

- Le changement climatique est un facteur de dégradation sur un patrimoine estimé à 311 Mds€ pour le RRN, avec aussi des pertes de fonctionnalités, et l'étude est un outil pour permettre aux gestionnaires d'arbitrer entre des politiques préventives d'adaptation et des actions curatives.
- Elle répond également à deux autres enjeux d'intérêt général :
 - L'exemplarité pour l'élaboration des plans d'adaptation par l'ensemble des gestionnaires, avec le partage de préconisations méthodologiques ou techniques, déclinables à d'autres échelles territoriales
 - La prise en compte des résultats généraux pour l'évolution des référentiels, normes et règles de l'art, tant pour la conception des projets que pour les technologies utilisées pour l'entretien ou la régénération
- Mais l'approche utilisée, qui est une déclinaison de la méthode « ASAIT » du Cerema, pour la 1^{ère} fois sur un périmètre aussi vaste, un nombre d'aléas aussi complet, et une analyse aussi détaillée, connaît des limites et des enseignements peuvent être tirés de sa mise en œuvre :

➔ avec la diffusion des livrables, un « Retour d'expérience méthodologique »

Consistance de l'étude et hypothèses adoptées

L'étude se présente en 3 volets successifs :

- **Volet 1** : vulnérabilités physiques et fonctionnelles du RRN
- **Volet 2** : coût de l'inaction (en utilisant les résultats du 1^{er} volet)
- **Volet 3** : pistes d'action d'adaptation

La méthode ASAIT « *Approche systémique de l'adaptation des infrastructures de transports* » du Cerema concerne les volets 1 et 3 tandis que le volet 2 est une innovation de Setec

Pour définir la vulnérabilité (volet 1) Setec part d'un découpage très fin du réseau :

- en **13 400 mailles** élémentaires avec pour chacune l'ensemble des composantes de l'infrastructures recensées et leur **sensibilité physique** à chaque aléa évaluée (note « S »)
- en **2 337 tronçons** élémentaires pour lesquels la **sensibilité fonctionnelle** à une perturbation du trafic provoquée par un aléa est évaluée (note « S »)

L'évolution de **11 aléas climatiques** est analysée en détail à l'échelle de la maille Safran (8X8 km) à partir d'un scénario de référence (1976-2005) et dans 3 scénarios projetés : ceux définis par la TRACC (*trajectoire de réchauffement pour l'adaptation au changement climatique*) aux horizons 2050 (+2°C) et 2100 (+3°C), et aussi dans un scénario extrême avec les maxima du modèle à +3°C d'où $4 \times 11 = 44$ cartes d'expositions déclinées dans chaque maille Safran avec une note « E »

➔ **Vulnérabilité** : croisement exposition sensibilité (« ExS ») des millions de résultats élémentaires

Volet 1 : vulnérabilité – résultats généraux issus de la synthèse des cartes de vulnérabilité

Zones les plus vulnérables	Aléas les plus problématiques
• Secteurs sud et sud-est • Île-de-France • Lorraine • Grandes agglomérations	• Inondations par ruissellement • Mouvements de terrain (glissements et chûtes de blocs) • Précipitations extrêmes • Retrait gonflement des sols • Cas particulier des incendies de forêt (vulnérabilité reste modérée, mais obligations légales de débroussaillage)
Secteurs les plus évolutifs	Infrastructures les plus impactées
• Île-de-France • Large zone centre-est, de Lyon à Metz • Côtes de PACA et de la Manche • Pays toulousain, Aquitaine, Bretagne	• La chaussée dans son ensemble • Les différents ouvrages en terre • Certains ouvrages d'art spécifiques (Franchissements de cours d'eau, traversées hydrauliques, soutènements ...)

Volet 1 : vulnérabilité – les limites du recensement des composantes et de l'évaluation de la sensibilité

Le RRN : un ensemble de 13 400 mailles (hexagone de 1 km de coté) qui contiennent chacune des composantes de l'infrastructure (560 000 au total)

Linéaire routier



- Chaussée
- Ouvrages en terre sur 75% des mailles



Équipements

- Écrans acoustiques sur 10% des mailles
- PPHM sur 35% des mailles
- Caméras, capteurs, compteurs sur 25% des mailles

Ouvrages d'art



- PS et PI sur env. 50% des mailles
- Ouvrages exceptionnels sur 10% des mailles
- Murs de soutènement du 10% des mailles
- Tunnels et TC sur 1% des mailles



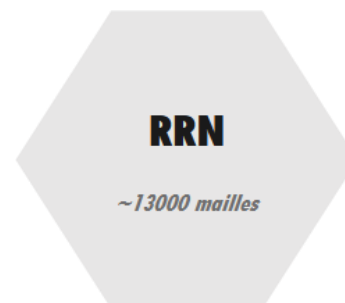
Assainissement et hydraulique

- Bassins sur 40% des mailles
- Ouvrages hydrauliques sur 40% des mailles



Aménagements_batiments

- Passages à niveaux sur <1% des mailles
- Aires sur 10% des mailles
- Péages et CEI sur 5% des mailles
- Accès sur 20% des mailles



Volet 1 : vulnérabilité – les limites du recensement des composantes et de l'évaluation de la sensibilité

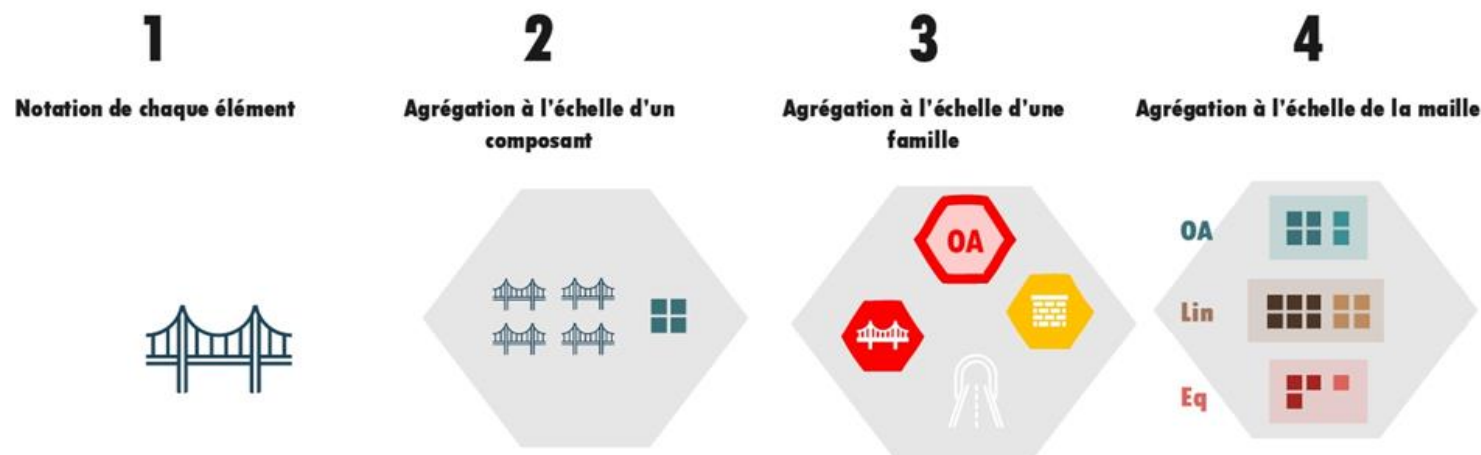
Sensibilité de chaque composante physique de l'infrastructure à un aléa

NOTATION RELATIVE		Type d'infrastructure	Composant	Liste des aléas																					
Notation du composant	Modulation de la notation (facteurs différenciants)			Températures		Incendie	Terrain			Précipitations, inondations et submersions								Tempêtes							
0 : Pas de sensibilité identifiée				Nombre de jours de fortes chaleurs	Cycles de gel/dégel	Nombre de jours avec une sensibilité feu météo fort	Retrait et gonflement des argiles	Nombre de jours avec sol sec	Mouvements de terrain : glissement	Mouvements de terrain : chutes de blocs	Nombre de jours par an de précipitations de journées extrêmes	Inondations par débordement de cours d'eau	Inondations par ruissellement	Inondations par remontée de nappes	Submersion marine temporaire	Submersion marine permanente	Nombre de jours de vents forts								
1 : Sensibilité faible	Détail de la modulation (typiquement +/- 1) ou de la modification (note très différente dans le cas d'une typologie particulière par exemple) de la notation initiale, pour prise en compte ultérieure dans l'analyse automatique des bases de données	Linéaire routier	Couche de roulement	3	4	1	3	0	0	2	3	0	0	2	4	2	2	0	0	0	0				
2 : Sensibilité moyenne			Couche d'assise	3	3	0	2	0	0	2	3	0	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0			
3 : Sensibilité forte			Plateforme	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	2	4	0	0	2	2	2	2	0	0		
			Déblais	0	0	1	1	0	2	0	0	0	2	2	3	0	0	2	2	2	3	0	2		
4 : Sensibilité très forte			Remblais	0	0	1	1	0	1	0	0	0	2	2	4	0	0	3	3	2	4	4	0	1	
CONSEQUENCES	Amplitude de la dégradation	Assainissement et ouvrages hydrauliques	Assainissement longitudinal	0	1	0	3	0	3	0	0	2	3	2	4	3	3	3	3	0	0	0	0		
			Ouvrages de traitement des eaux	0	2	2	2	0	3	0	0	2	3	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0		
			Ouvrages d'assainissement ponctuels	1	1	3	3	0	0	0	0	0	2	4	3	3	0	0	0	0	2	2	0	0	
			Ouvrages d'assainissement transversaux	0	0	2	2	0	0	3	3	0	0	2	4	0	0	3	4	3	4	0	0		
		Ouvrages d'art	Passages supérieurs	0	0	0	1	0	2	1	2	0	0	3	4	2	3	1	1	1	1	1	0	0	
			Passages inférieurs	0	0	0	1	1	3	1	3	0	3	3	4	2	3	2	2	1	1	1	1	0	0
			Ouvrages d'art non courants ou exceptionnels	0	2	0	0	0	3	0	0	0	3	3	4	2	3	2	2	0	4	2	2	0	0
			Murs de soutènement	0	0	2	2	0	1	1	2	0	0	3	4	0	0	2	4	0	4	3	4	1	1
			Tunnels	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	2	3	2	3	0	0	2	2	2	2	1	1
			Tranchées couvertes	0	0	0	0	3	3	1	1	0	0	3	4	3	4	0	0	2	2	2	2	2	1
Équipements	Ecrans acoustiques	0	0	0	0	0	4	2	2	0	0	4	4	2	2	0	0	2	2	2	2	0	0		
	Autres ouvrages de protection	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Pylônes	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	2	2	2	2	0	0		
	PPI&M	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	2	2	2	2	0	0		
	PMV	1	1	0	0	2	2	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Aménagements et bâtiments	Caméras, capteurs et compteurs	1	1	0	0	2	2	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0		
	Réseaux d'exploitation	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2		
	Dispositifs de retenue	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Passages à niveau	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	3	4	0	0	0	0	2	2	1	1	0	0	
	Aires	2	2	2	2	3	3	0	0	0	0	2	3	0	0	2	2	2	2	1	1	0	0		
Destruction	Destruction de type « fragile » ou cad non précédée de dégradations mineures ou majeures qui auraient permis l'identification et le traitement du problème, généralisée à l'ensemble du composant – Nécessitant un remplacement / une reconstruction urgente et complexe	Gares de péages	2	2	2	2	0	0	0	0	0	2	3	0	0	2	2	2	2	2	2	1	1		
		Centres d'exploitation et bâtiments administratifs	1	1	0	0	2	2	1	1	0	0	3	4	0	0	2	2	2	2	2	2	2	1	1
		Accès de service et de secours	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Volet 1 : vulnérabilité – les limites du recensement des composantes et de l'évaluation de la sensibilité

RÉSEAU ROUTIER NATIONAL	Famille	Composants
	Linéaire routier	Couche de roulement
		Couche d'assise
		Plateforme
		Déblais
		Remblais
	Assainissement et ouvrages hydrauliques	Assainissement longitudinal
		Ouvrages de traitement des eaux
		Ouvrages d'assainissement ponctuels
		Ouvrages d'assainissement transversaux
	Ouvrages d'art	Ponts courants
		Ouvrages d'art non courants ou exceptionnels
		Murs de soutènement
		Tunnels
		Tranchées couvertes
		Écrans acoustiques
		Autres ouvrages de protection
	Équipements	Pylônes
		PPHM
		PMV
		Caméras, capteurs et compteurs
		Réseaux d'exploitation
		Dispositifs de retenue
	Aménagements et bâtiments	Passages à niveau
		Aires
		Gares de péages
		Centres d'exploitation et bâtiments administratifs
		Accès de service et de secours

Au vu du grand nombre de données, pour pouvoir effectuer des analyses, une agrégation des notes de sensibilité à l'échelle de la maille est nécessaire



Pour chaque maille les notes de sensibilité de chacune des composantes sont agrégées en 4 étapes selon la méthode définie par Setec (moyenne, max, max pondéré, ...)

Volet 1 : vulnérabilité – les limites du recensement des composantes, de l'évaluation de la sensibilité et de la notion de vulnérabilité

Les résultats de l'étude doivent être utilisés en intégrant les limites dues aux difficultés de collecte des données et à la méthodologie :

- Une partie des données relatives aux composantes de l'infrastructure n'étaient pas disponibles ou pas homogènes entre les gestionnaires (ouvrages hydrauliques, dimensions des déblais et remblais, protections de talus) et ont dû être reconstituées si possible, ou non renseignées.
- L'attribution d'une note de sensibilité physique est donnée par catégorie de composant par rapport à un type de dégradation lié à un aléa climatique, mais ne prend pas en compte les caractéristiques réelles de chaque composant et de son environnement
- L'agrégation des sensibilités physiques des composantes à l'échelle de la maille, nécessaire pour obtenir une synthèse, conduit à des approximations.

→ caractère global du diagnostic, utile pour avoir une vision d'ensemble et élaborer les stratégies d'adaptation, mais pas pour les solutions opérationnelles locales

- La notion de vulnérabilité est globale sur une maille ou un tronçon et ne renseigne pas de façon précise sur le risque de dégradation (l'occurrence des dommages reste à déterminer)

Volet 2 : coûts de l'inaction (scénario 2 / 10 ans)

Résultats - Méthode

- Coûts physique : 1,8 Mds€, très différents selon les aléas et les composants

	Chaussée	OT	Assainissement	OA	Équipements	Aménagements	Total par groupe d'aléas	% par groupe d'aléas
Fortes chaleurs	619 899 000	-	13 026 000	75 005 000	1 610 000	60 065 000	769 605 000	43%
Incendie	2 720 000	3 632 000	741 000	26 728 000	3 022 000	16 376 000	53 219 000	3%
Inondations	346 173 000	154 013 000	7 353 000	175 670 000	8 833 000	5 969 000	698 011 000	39%
Mouvements de terrain	20 073 000	24 568 000	1 331 000	46 332 000	731 000	3 913 000	96 948 000	5%
Sécheresse et RGA	88 573 000	5 671 000	29 130 000	10 400 000	10 527 000	8 891 000	153 192 000	9%
Submersion marine	196 000	142 000	25 000	233 000	-	3 000	599 000	0%
Total par groupe de composants	1 077 634 000	188 026 000	51 606 000	334 368 000	24 723 000	95 217 000	1 771 574 000	
% par groupe de composants	61%	11%	3%	19%	1%	5%		

Coût 1: Report d'itinéraires et/ou allongement temps de parcours (M€)	-1 175,9
Usagers	-893,7
Augmentation des temps de parcours	-697,5
VL	-529,3
PL	-168,2
Augmentation des distances parcourues	-281,6
VL	-196,1
PL	-85,5
Collectivité	-282,3
Pollution atmosphérique	-16,6
Nuisances sonores	-0,5
Effets amont-aval	-22,2
Recettes fiscales	81,0
Effet de serre	-140,7
Sécurité routière	-117,9
Voirie, police et circulation	-65,3
Coût 2: Renonciation au déplacement (M€)	-662,1
Effets économiques transport de marchandises	-662,1
Coût 3: Perte d'accessibilité à certains biens et services (M€)	-411,1
Effets économiques de la perte d'accessibilité des services de santé	-352,5
Effets économiques indirects dus au changement d'itinéraire des PL	-58,6
COÛT DE L'INACTIION (FONCTIONNEL) (M€)	-2 249,2

◀ **Coûts fonctionnels : 2,2 Mds€, liés aux coupures de circulation et au trafic**

Méthode analytique exploratoire, à partir du volet 1

- 1) sensibilité physique corrélée à un niveau de dommage et à un coût de réparation.
- 2) occurrence du dommage, différent de la vulnérabilité évaluée sur 10 ans, en situation de référence et en situation future (+2°C)
- 3) **Coût physique** : coût unitaire des dommages multiplié par fréquence, **le coût de l'inaction est la différence entre et situation future et situation de référence**
- 4) **Coût des pertes de fonctionnalité** : idem à partir des données de vulnérabilité fonctionnelle et des impacts économiques (reports d'itinéraire, perte d'accès, renonciation à certains déplacements)

Volet 2 : coûts de l'inaction - les limites de la méthode

- La prise de conscience des enjeux économiques du changement climatique est récente, la question du coût de l'adaptation est complexe et encore mal maîtrisée et celle du coût de l'inaction reste théorique
- A la différence des bâtiments pour lesquels les assurances disposent de statistiques il n'y a pas de bases de données de référence de l'impact des événements météorologiques passés sur les infrastructures

Jusqu'ici les estimations sont essentiellement globales à partir d'études générales

- L'étude Setec est différente des approches antérieures : elle utilise une méthode analytique, en évaluant les coûts composante par composante, tronçon par tronçon, mais avec de fortes marges d'incertitude
- Ces marges d'incertitude sont essentiellement dues à la valeur retenue pour le coefficient d'occurrence des dommages, différent de la vulnérabilité.
- Elles peuvent être corrigées à l'avenir si des retours d'expérience suite aux événements météorologiques sont effectués systématiquement et capitalisés
- Des développements méthodologiques sont néanmoins nécessaires pour déterminer la part de l'impact du climat dans le processus d'usure de l'infrastructure

En conclusion, quelques enseignements généraux

- Le temps passé (donc le coût) et la complexité de la méthode s'accroissent fortement avec le nombre de scénarios étudiés, la précision attendue sur les données recueillies et le nombre de cas analysés pour caler les modèles.
- Ces éléments doivent être définis en amont en cohérence avec les attendus de l'étude et les objectifs poursuivis, pour lesquels des approches simplifiées peuvent être suffisantes
 - ➔ Ainsi, l'étude du scénario extrême a été décidée deux ans avant l'approbation de la TRACC, et compte-tenu du travail et des moyens nécessaires pour s'adapter successivement à +2°C, puis à +3°C, il est probable que les résultats de ce scénario maximal ne seront pas exploités
- L'étude a permis aux différentes sous-directions de la DMR et aux services gestionnaires (11 DIR et 20 SCA) de monter en compétence sur le sujet de l'adaptation au changement climatique et de prendre conscience des enjeux
- L'association des différents gestionnaires au cours de l'étude par des présentations régulières et en organisant des ateliers est indispensable pour une bonne appropriation