

# ETUDE DE LA CRITICITE D'UN PARC DE MURS TIRANTES

## CRITICALITY STUDY OF A SET OF ANCHORED WALLS

Lorella ROCHA BOTELHO<sup>1</sup>, Patrick GARCIN<sup>2</sup>, Etienne BELLENFANT<sup>3</sup>, Romain PITTET<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> EGIS Géotechnique, Seyssins (38), France

<sup>3,4</sup> APRR, Saint-Apollinaire (21), France

**RÉSUMÉ** – Comment gérer le risque d'un parc d'une trentaine d'ouvrages de soutènement tirantés de plus de 40 ans, dans un contexte montagneux? Face au grand nombre de murs, à l'âge et à certaines limites de la surveillance, il faut savoir prioriser le risque. Une méthode permettant d'attribuer rapidement une note de risque à chaque mur a été élaborée. Les résultats constituent un outil précieux pour l'aide à la décision des concessionnaires.

**ABSTRACT** – How to manage the risks associated with more than thirty anchored retaining walls more than 40 years'old, located in a mountainous setting? Due to the large number of walls, their age and the limits to monitoring of the walls, it is necessary to know how to prioritize these risks. Hence, a method was designed, to assign to each wall a "risk score", with the results being a real tool for decision support for concessionaires.

## 1. Introduction

### 1.1 Contexte

La portion de l'autoroute A40 entre Les Neyrolles (01) et Châtillon-en-Michaille (01) a été construite dans les années 1980. Elle contient plus d'une trentaine de murs tirantés sur un linéaire d'environ 15km.

APRR a travaillé avec Egis pour étudier et constituer une aide à la décision sur l'état des murs, présentant parfois des interrogations sur l'état des tirants. En effet, la surveillance se heurte à plusieurs difficultés :

- Certains murs sont masqués par un parement architectural en béton empêchant leur surveillance exhaustive ;
- Certaines cales dynamométriques sont vieillissantes et deviennent donc progressivement hors-service ;
- La variation de la tension de certains tirants depuis la construction des murs dépassent les seuils de tolérance préconisés par le TA2020.

### 1.2 Objectif

L'objectif est d'évaluer le risque d'instabilité et de défaut de résistance de l'ensemble des murs en cas de rupture ou perte de tension d'un tirant.

## 2. Surveillance actuelle

L'ensemble des murs tirantés fait l'objet du plan de surveillance suivant :

- La réalisation d'une inspection détaillée tous les 6 ans et de visites annuelles intercalées pour contrôler visuellement les différentes parties des murs (structure, équipements, zone d'influence, drainage) ;

- Une surveillance météorologique pour apprécier et quantifier le comportement et la stabilité des différents secteurs :
  - La vérification annuelle de la tension dans les tirants grâce aux cales dynamométriques installées pendant la construction ;
  - Le furetage des drains ;
  - Le suivi des versants avec l'aide d'inclinomètres et de piézomètres.

Concernant les cales vieillissantes, un diagnostic spécifique des cales dynamométriques a été réalisé sur les cales HS afin de déterminer leur réparabilité et d'apprécier leur nombre des règles prescrites par le TA2020 sur les nouveaux ouvrages.

### 3. Déploiement de la méthode matricielle

Face au grand nombre de configurations des murs (longueur des poutres, nombre de lits de tirants, espacement des tirants, hauteur des murs, murs en cascade ou non, stratigraphie, murs en déblais ou en remblais de la section autoroutière...), et afin de garder une approche homogène et cohérente, une approche globale a été adoptée.

Cette approche consiste à évaluer pour chaque mur le risque en cas de perte de tension/rupture d'un tirant, en lui attribuant une note allant de 1 (peu de risque) à 4.

Une méthodologie en 4 étapes a été mise en place et est présentée dans les paragraphes suivants.

#### 3.1. Recensement des murs et de leurs paramètres

La première étape consiste à collecter toutes les données disponibles dans les archives à disposition, et notamment dans les notes de calculs et plans TQC (« tel que construit »).

Un mur tiranté est composé de plusieurs poutres en béton armé contenant au minimum 4 tirants. L'espacement horizontal des tirants varie entre 2 et 5m et la tension de service est généralement entre 60t et 90t. La majorité des poutres sont de dimension 1,1mx0,7m ou 1,5mx0,7m. Un exemple de mur est présenté en Figure 1.

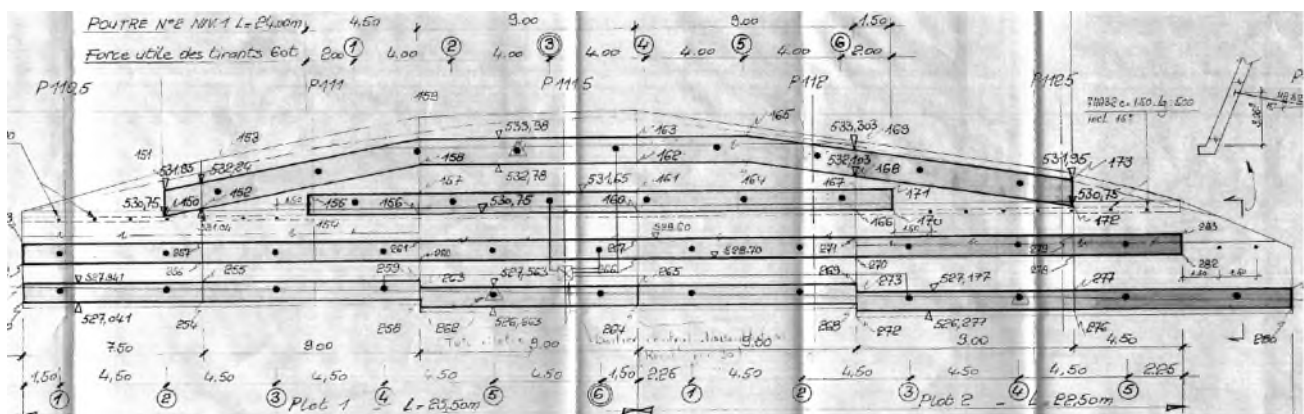


Figure 1 Exemple de plan de coffrage d'un mur tiranté

Certains profils sont constitués de plusieurs murs en cascades, comme illustré dans la Figure 2. D'autres profils contiennent une association de murs tirantés et de murs en terre armée.

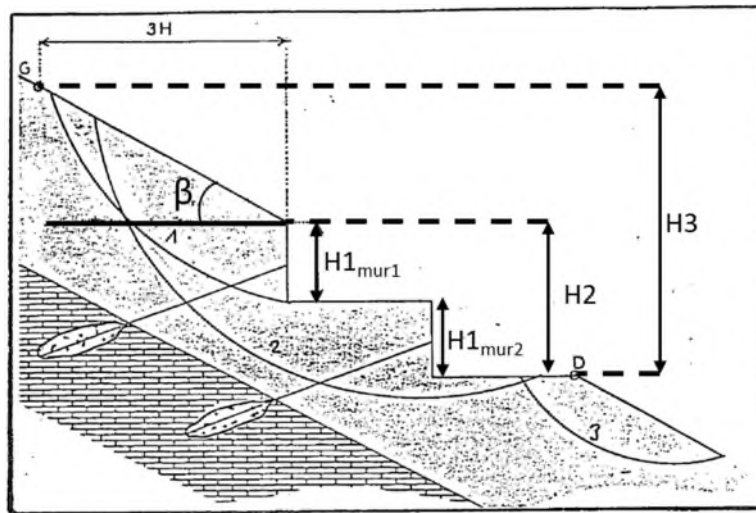


Figure 2 Principe des murs en cascade

Le Tableau 1 présente les paramètres collectés de manière exhaustive.

Tableau 1 Paramètres des murs

Localisation	Secteur, zone, n° du mur, PR début et fin, position par rapport à la route (amont, aval ou TPC)
Géométrie	Les murs situés sur le même profil, la hauteur maximale du mur seul (H1), la hauteur cumulée des murs en cascade (H2), la hauteur des murs et du talus supérieur (H3), la surface du mur, le linéaire du mur
Les tirants	Le nombre max de lits de tirants, le nombre total de tirants, le mode d'appui, le produit d'inertie EI de la poutre
Géotechnique	Le modèle géotechnique historique, la cohésion du sol sur lequel repose la poutre (s'il y a plusieurs sols, on retient le plus défavorable), l'angle de frottement du sol sur lequel repose la poutre. Le sol d'ancrage des tirants n'est pas pris en compte.
Facteur de sécurité	Le facteur de sécurité dans le cas statique issu d'études complémentaires sur la vulnérabilité sismique réalisées en 2012

### 3.2. Sélection des paramètres les plus pertinents

La deuxième étape consiste à sélectionner un nombre restreint de paramètres afin d'appliquer une méthode d'analyse de risque. Pour rappel, l'objectif final est d'attribuer une note de risque à chaque mur, afin de déterminer les murs les plus critiques.

#### 3.2.1. Définition du risque

L'étude menée est une étude de criticité et non une étude de risque. La terminologie utilisée peut donc différer de celle de l'état de l'art de la cindynique. Egis a lancé début 2024 une thèse sur le management du risque.

Habituellement, l'évaluation du risque est définie par le croisement de l'aléa (probabilité qu'un phénomène se produise à une intensité donnée) et des enjeux présents (personnes et bien susceptibles d'être affectés par un phénomène et de subir des dommages et préjudices).

La sélection des paramètres nécessite une compréhension des phénomènes qui peuvent se produire en cas de perte de tension/rupture d'un tirant. Deux mécanismes sont identifiés : le glissement de terrain et la rupture de la poutre en béton armé. L'enjeu est la chaussée et les clients de l'autoroute.

Dans cette étape, le but est de sélectionner les paramètres qui permettront d'évaluer les aléas (« glissement » et « rupture poutre ») et l'enjeu.

### 3.2.2. L'enjeu

L'enjeu théorique considéré est la plateforme autoroutière et les usagers, qui est le même sur toute la zone de l'étude. Le paramètre considéré dans l'étude est le *linéaire* d'autoroute se situant au droit des murs.

### 3.2.3. L'aléa glissement de terrain

A l'inverse des séismes ou inondations qui restent des phénomènes récurrents assimilables à des processus aléatoires, les mouvements de terrain ne sont pas périodiques. Il semblerait ainsi plus approprié d'utiliser le terme de « prédisposition » (ou susceptibilité) du site vis-à-vis du glissement. Le raisonnement est identique pour le phénomène de rupture de la poutre.

Les facteurs de prédisposition au glissement sont notamment la nature géologique, la hauteur, la présence d'eau et la pente des terrains. Pour leur part, les murs tirantés sont verticaux. La présence d'eau est une donnée non disponible.

L'intensité du phénomène est généralement évaluée par retour d'expériences des différents désordres sur site ou par des calculs théoriques en fonction des données disponibles. Dans le cas ici présent, il n'existe pas de retour d'expériences. Pour le glissement, l'intensité peut être exprimée sous forme de volume ayant glissé et sera donc directement relié à la hauteur et à l'épaisseur des terrains susceptibles de glisser (pas toujours connue).

Les paramètres retenus sont donc *la géotechnique, avec les caractéristiques de cisaillement ( $c'$ ,  $\varphi'$ )* pour les facteurs de prédisposition et *la hauteur de l'ensemble des murs en cascade ( $H_2$ )* pour l'intensité.

### 3.2.4. L'aléa rupture de la poutre

La démarche très générale et théorique de conception historique, prévoit que lors d'une perte de tension d'un tirant, les efforts de ce tirant sont repris par les tirants adjacents de la même poutre.

Il peut cependant arriver que le tirant qui lâche se trouve en extrémité de poutre. C'est a priori le cas le plus critique vis-à-vis des moments et efforts engendrés dans la poutre. Ce cas a été pris en compte pour certaines poutres, notamment quand le nombre de tirants est pair.

Les facteurs de prédisposition sont donc le nombre de tirants en extrémité de poutre et l'espacement entre deux tirants. Ces deux facteurs sont déduits des paramètres « *nombre max de lits de tirants* » et « *densité* » (nombre total de tirants/surface du mur).

En fonction des efforts supplémentaires engendrés dans la poutre, elle peut soit se déformer, soit casser, c'est ainsi que l'intensité peut être évaluée. L'intensité (augmentant l'aléa), est considéré inversement proportionnel à la *rigidité de la poutre  $EI$* .

### 3.2.5. Attribution des notes aux paramètres

Chaque paramètre reçoit une note de 1 (la meilleure) à 4. Pour la géotechnique, la théorie et les retours d'expériences permettent de facilement identifier les sols plus ou moins susceptibles au phénomène de glissement, et donc d'attribuer des notes de 1 à 4. Pour les autres paramètres, la physique des mécanismes permet de savoir dans quel sens le paramètre est favorable, mais pas de fixer des seuils. Par exemple, pour la densité de tirants, une densité faible (donc un espacement important entre 2 tirants) semble défavorable en cas de rupture d'un tirant. En effet, les efforts supplémentaires engendrés seront d'autant plus importants que la portée entre les 2 tirants adjacents sera grande.

Mais comment déterminer un seuil ? Dans cette étude, il a été décidé de répartir les murs en 4 notes de la manière la plus homogène possible, en utilisant comme seuil le 1<sup>er</sup> quartile, la médiane et le 3<sup>ème</sup> quartile. L'utilisation des quartiles est parfois délicate, et adaptée le cas échéant.

### 3.3. Croisement des paramètres

Il existe une infinité de manières de croiser tous les paramètres sélectionnés.

Pour croiser 2 notes, il est notamment possible :

- De prendre le maximum des 2 notes. Cette méthode est sécuritaire. En effet, dès que l'un des paramètres a une mauvaise note, on retient cette note même si l'autre paramètre a une bonne note. L'inconvénient est que beaucoup de murs se retrouvent avec une mauvaise note et cette méthode ne permet pas de distinguer les murs très défavorables (avec 2 mauvaises notes, par ex (4 ;4)) des murs moins défavorables ayant une mauvaise et une bonne note (par ex (4 ;1)).
- De multiplier les 2 notes. Cette méthode permet de faire ressortir les murs vraiment critiques. En effet, un mur ayant 2 mauvaises notes ( $4 \times 4 = 16$ ) sera bien distingué d'un mur ayant une mauvaise et une bonne note ( $4 \times 1 = 4$ ). Ces notes de 1 à 16 sont ensuite ramenées à une note de 1 à 4. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle risque de sous-évaluer des murs. Ainsi un mur ayant une mauvaise note de 4 peut être *in fine* noté avec une note de seulement 2.
- Il est aussi possible de pondérer les paramètres pour apporter plus de poids à ceux qui seraient plus importants. Dans cette analyse, il est considéré qu'il n'y a pas de paramètres dominants sur les autres. Aucune pondération n'a été prise en compte.

Les croisements retenus sont présentés dans la figure suivante. Pour chaque aléa, la note maximale des facteurs de prédisposition a été considéré. L'aléa « glissement » et l'aléa « rupture poutre » ont été croisés par multiplication des notes. Enfin, le risque est obtenu par multiplication de la note « aléa » et de la note « enjeu ».

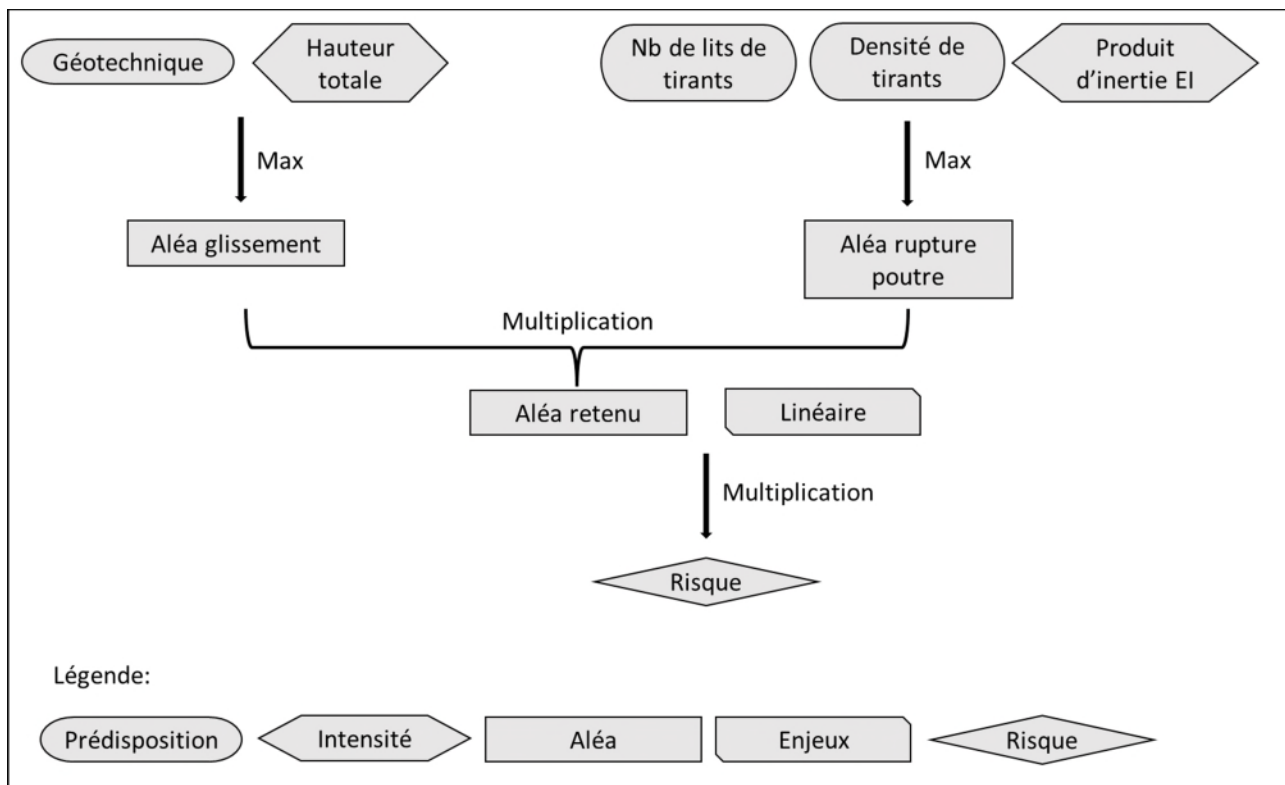


Figure 3 Logigramme de la méthode retenue

### 3.4. Identification des murs les plus critiques

A la fin du processus, chaque mur a une note de 1 à 4. La figure ci-dessous présente un extrait du tableau contenant toutes les valeurs des paramètres, la note associée et les notes à chaque étape de croisement. La note du risque est indiquée sur la dernière ligne.

Secteur	Secteur E										
Zone	-	4	4	3	3	3	2	2	2	2	1
N° Mur	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
c' (kPa)	3	3	0	5	5	5	5	0	5	5	Substratum
phi' (°)	30	30	28	37	37	37	30	35	35	35	
Note géotech	3	3	4	2	2	2	2	3	2	2	1
H2 (hte totale)	9	12	6,5	5,1	12,7	7,3	15,2	15,2	15	15	12,9
Note H2	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2
Nb lits max	3	3	1	1	1	3	4	1	1	1	1
Note Nb lits max	2	2	1	1	1	2	3	1	1	1	1
Densité (nb/m <sup>2</sup> )	0,000	0,029	0,156	0,169	0,360	0,104	0,127	0,220	0,311	0,138	0,105
Note densité	4	4	1	1	1	3	2	1	1	2	3
Produit d'inertie min (EI en t/m <sup>2</sup> )	?	49306	49306	?	49306	30000	49306	49306	65742	49306	?
Note EI	1	2	2	1	2	4	2	2	1	2	1
Mode d'appui	plaque individuelle			Cantilever							plaque individuelle
Linéaire mur (m)	76,7	86	58,5	90	80	54	60	37	72	30	48
Note ml	2	2	1	3	2	1	2	1	2	1	1

Croisement retenu : scenario 1

Aléa glissement	Max (Géotech; H2)	3	3	4	2	2	2	2	3	2	2	2
	Aléa rupture	1	4	2	1	2	4	3	2	1	2	1
Croisement aléa	Mult. Gliss x rupt	3	12	8	2	4	8	6	6	2	4	2
	Note Aléa	2	4	3	1	2	3	3	3	1	2	1
Enjeu	Linéaire (m)	2	2	1	3	2	1	2	1	2	1	1
Risque	Mult. Aléa x enjeu (linéaire)	4	8	3	3	4	3	6	3	2	2	1
	Note Risque	2	3	2	2	2	2	3	2	1	1	1

Figure 4 Extrait du tableau des résultats

## 4. Résultats

Sur les 36 murs, 13 ont été notés 4. Le graphe ci-dessous représente pour chaque mur, la note d'aléa, la note d'enjeu et la note de risque obtenue. Les 36 murs sont répartis en 5 secteurs géographiques. Ce graphe met en évidence que les murs les plus critiques sont majoritairement localisés dans le secteur « B », dont la géologie est principalement constituée d'éboulis (plutôt propice aux glissements), et dont les hauteurs et linéaires de murs sont importants.

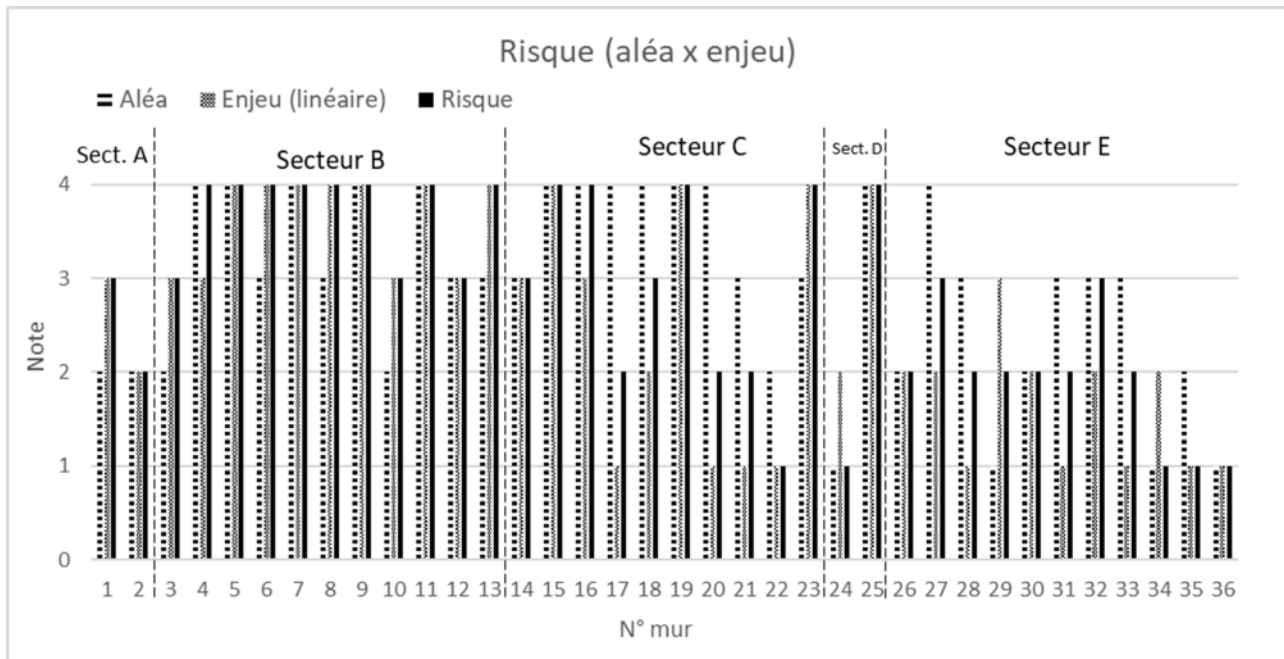


Figure 5 Notes de l'aléa, de l'enjeu et du risque par murs

## 5. Limites

Cette méthode permet de déterminer, sur un grand nombre de murs, les murs les plus critiques. Cependant, cette méthode présente à ce stade de développement certaines limites, notamment :

- Le choix des paramètres : l'approche sur un grand nombre de murs nécessite une vision globale de chaque mur et mène à des approximations. Par exemple, la densité traduit un espacement moyen entre 2 tirants. Or, sur un même mur, il peut y avoir une poutre avec des tirants espacés de 5m et une autre avec des tirants espacés de 2m. Cela ne sera pas pris en compte dans la note.
- Le choix des valeurs seuils : comme expliqué au §3.2.5., la détermination des seuils en l'absence de retour d'expérience ou de théorie est difficile. Les seuils actuels ont été définis en utilisant les 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartile et la médiane. Cette hypothèse conduit donc environ 1/4 des murs à une note 4 sur le paramètre en question. Il est possible d'ajuster les seuils pour réduire cette proportion, en utilisant par exemple le 9<sup>ème</sup> décile (ce qui donnerait 1/10 des murs pour la note 4).
- Le choix de la méthode de croisement : comme expliqué au §3.3., il existe une infinité de méthodes de croisement possibles. Pour cette étude, 3 méthodes ont été testées : une plutôt optimiste (donnant peu de murs en note 4), une plutôt pessimiste (donnant beaucoup de murs en note 4) et une intermédiaire, qui est celle retenue.

## 6. Perspectives

La prochaine étape pourrait consister à choisir un échantillon de murs critiques et de configurations différentes, afin d'en dégager les coefficients de sécurité spécifiques et de déterminer les typologies de désordres censées être observées une fois les limites de calculs statiques et ultimes atteintes.

En finalité, l'étude du risque des murs de soutènement tirantés vis-à-vis du glissement et de la rupture constitue une brique qui viendra s'intégrer dans l'analyse de risques existante et établie par le concessionnaire autoroutier APRR.

La méthode d'évaluation des risques par croisement de matrices présente plusieurs avantages :

- Traiter un grand nombre de murs en retenant des paramètres connus pour tous les murs
- Avoir une vision globale d'un parc d'ouvrages
- Prioriser les ouvrages

D'autres paramètres concernant la vulnérabilité comme les cas où le mur soutient ou protège l'autoroute n'ont pas été distingués, cela pourrait être étudié dans une version ultérieure plus complète.

Plus généralement, pour répondre à ce besoin, une thèse menée par EGIS débutera au cours de l'année 2024, dont l'objectif sera de déterminer une approche de criticité qui pourra être appliquée de manière systématique sur un grand parc d'ouvrage dans les zones montagneuses, incluant la prise en compte des phénomènes liés au changement climatique. Le secteur de l'A40 fera partie des exemples d'application de la thèse.

Suite à la réalisation de l'étude de criticité, un suivi topographique de précision va également être mis en place sur certains murs afin de compléter la métrologie, devenant insuffisante au regard du nombre de cales en bon état de fonctionnement. La société APRR mène actuellement une réflexion sur l'évolution de la surveillance de ses murs au regard des évolutions technologiques.

## **7. Conclusion**

Comment gérer le risque de perte de tension d'un tirant dans un parc d'une trentaine d'ouvrages de soutènement tirantés de plus de 40 ans ? Pour répondre à cette question, une méthodologie permettant d'attribuer dans des délais raisonnables une note de risque pour chaque mur a été élaborée, à partir d'un niveau de connaissance identique pour chaque mur. Elle consiste à sélectionner les paramètres les plus pertinents pour évaluer l'aléa « glissement de terrain », l'aléa « rupture de la poutre » et l'enjeu (plateforme autoroutière). Ces paramètres sont notés de 1 (aléas ou risque le plus faible) à 4 (aléas ou risque le plus élevé), puis sont croisés dans un ordre précis, soit par multiplication des notes, soit par le maximum des notes. Cette méthode, encore au stade de développement préliminaire, va être utilisée par APRR dans son analyse de risques plus globale, et par Egis dans le cadre d'une thèse sur le multi risque. Elle représente un précieux outil d'aide à la décision pour les maîtres d'ouvrage devant gérer un parc important d'ouvrages en milieu montagneux. Elle permet en effet d'avoir rapidement une vision globale de l'ensemble du parc et de prioriser les ouvrages sur lesquels des études plus précises doivent être menées.