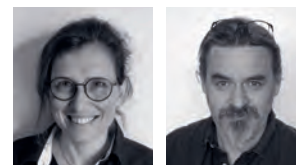


Les murs en maçonnerie et leurs pathologies

LES AUTEURS



➤ Sabrina Perlo et Bruno Vion

Afin d'aider les gestionnaires de murs de soutènement en maçonnerie, le Cerema a édité un guide d'analyse des risques pour ces ouvrages. Il consiste à évaluer les composantes du risque, c'est-à-dire l'aléa, la vulnérabilité de la structure et les conséquences d'une défaillance. Les informations présentées dans cet article sont extraites de cet ouvrage collectif.

Les murs de soutènement en maçonnerie, sèche ou jointoyée, sont très nombreux. Ils représentent à titre d'exemple plus de la moitié des murs de soutènement du réseau routier non concédé. La plupart du temps, ces ouvrages généralement très anciens sont peu documentés. De plus, la seule surveillance de leurs désordres visibles ne permet pas toujours de détecter les pathologies les affectant et pouvant mettre en cause leur solidité et leur stabilité.

Il n'est pas rare de rencontrer des ouvrages présentant d'importantes déformations, qui néanmoins « résistent » pendant des années, alors que d'autres s'effondrent sans signe avant-coureur (photos 1 et 2).

Les murs en maçonnerie représentent un enjeu fort pour les gestionnaires compte tenu de :

– l'absence fréquente des plans d'origine et du dossier d'ouvrage. De plus, ces ouvrages peuvent avoir été sujets à des modifications non documentées;

– l'impossibilité récurrente de les justifier par les règlements de calculs modernes (l'absence de données géométriques et/ou de données géotechniques comme la poussée à l'arrière du mur, l'augmentation des charges routières, l'évolution des cartes des zones sismiques¹, etc.);

1) Le nouveau zonage sismique de la France pour le bâti conventionnel à « risque normal » est entré en vigueur au 1^{er} mai 2011, suite à l'arrêté du 22 octobre 2010 « relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite à risque normal » et aux décrets n° 2010-1254 relatif à la prévention du risque sismique et n° 2010-1255 portant sur la délimitation des zones de sismicité du territoire français.

Sabrina Perlo est responsable d'études en ouvrages géotechniques au Cerema Île-de-France.

Bruno Vion est responsable d'études Ouvrages d'art au Cerema Méditerranée, copilote de l'axe « Ouvrages de référence » du projet national Dolmen.



Exemples d'ouvrage présentant des pathologies.

- la difficulté de prévoir la rupture de l'ouvrage;
- la difficulté de trouver des itinéraires de déviation en zone montagneuse (contexte courant pour ce type d'ouvrage) en cas de coupure de voie.

Afin d'aider les gestionnaires de murs de soutènement en maçonnerie, le Cerema a édité un guide d'analyse des risques pour ces ouvrages (lire page 10 encadré Bibliographie [1]), selon la méthodologie du Sétra [2]. Cette analyse consiste à évaluer les composantes du risque, que sont l'aléas, la vulnérabilité de la structure à ces derniers, ainsi que les conséquences d'une défaillance, le croisement de ces trois composantes déterminant un niveau de risque par rapport à une défaillance envisageable.

LES MURS EN MAÇONNERIE

Les murs de soutènement en maçonnerie portant des voies de communication ont des origines souvent anciennes (datant pour la plupart du XIX^e siècle). Ils présentent une grande diversité de par leur âge, leur constitution, leur mode d'exécution ou leur forme. Par exemple, leurs fondations peuvent se révéler très différentes : semelles béton, racinaux (pièces de charpentes), pilotis, pied de mur directement construit sur le sol...

Les murs de soutènement en maçonnerie de pierres sèches ou jointoyées, font partie de la famille des murs-poids, c'est-à-dire dont « la fonction de soutènement est assurée par le poids propre du mur qui équilibre la poussée des terres du massif

soutenu, en imposant de fortes contraintes au massif d'assise de fondation » [3].

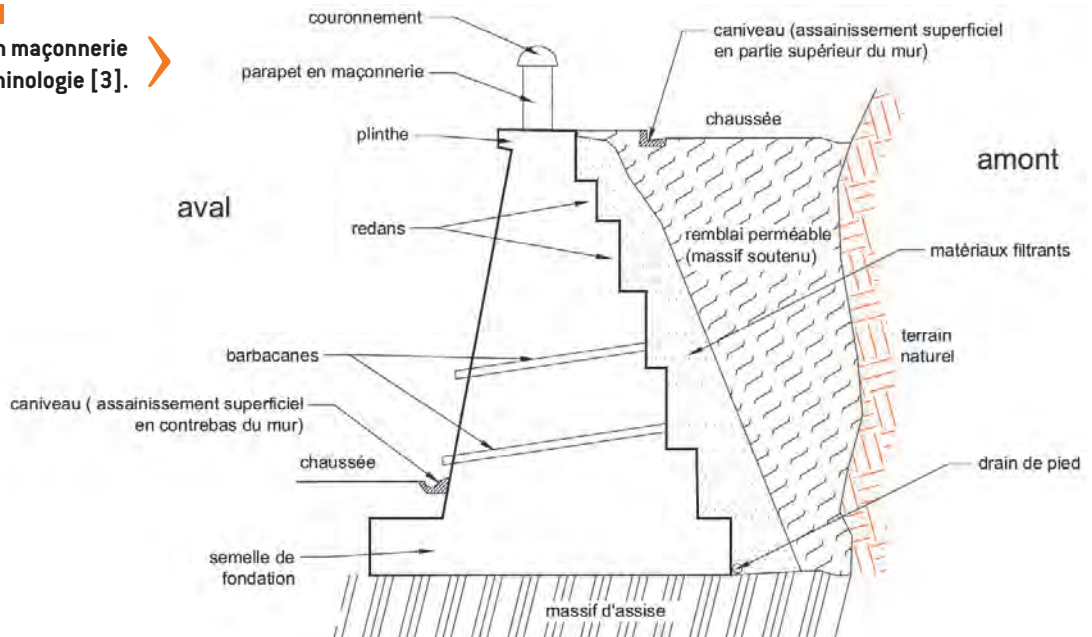
La maçonnerie est un assemblage de blocs rigides (pierres, moellons, briques...), parfois sans liant (mur en maçonnerie de pierres sèches), mais souvent reliés par des joints de mortier en plus ou moins bon état de conservation (mur en maçonnerie jointoyée). On appelle mortier un mélange de liant hydraulique (chaux, ciment ou mélange des deux), de sable et d'eau. Le choix du liant doit permettre d'éviter toute incompatibilité physique et chimique entre les matériaux existants et le mortier conduisant par exemple à une altération physico-chimique des caractéristiques mécaniques de la matrice de la roche naturelle.

Les murs en maçonnerie sont massifs, leur épaisseur moyenne, hors fondations, est comprise entre 25 et 40 % de la hauteur de terre soutenue. Ils ont le plus souvent une forme trapézoïdale², avec une largeur à la base³ couramment égale à un peu plus du tiers de leur hauteur. Les murs-poids sont généralement réalisés avec un fruit plus ou moins important. La semelle de fondation peut être légèrement inclinée vers l'amont par rapport à l'horizontale, pour améliorer la stabilité de l'ouvrage au glissement.

2) Il peut néanmoins y avoir des murs à section rectangulaire, à fruit ou à redans.

3) La largeur à la base dépend largement de la qualité des terrains de fondation, de la pente des terres soutenues et du fruit du mur.

Figure 1
Mur en maçonnerie
- Terminologie [3].



La constitution des murs en maçonnerie peut être variable. La figure 1 présente la composition classique de ces murs. Le parement côté aval présente généralement un fruit. La face côté amont peut être constituée de plusieurs redans. La maçonnerie à l'arrière du parement peut être différente de celle du parement et être constituée par exemple de moellons ordinaires non appareillés ou en maçonnerie de type béton cyclopéen.

Lorsque le mur est bâti en pierre sèche, les systèmes de drainage (barbacanes, drains représentés sur la figure 1) ne sont pas nécessaires, tant que l'eau peut s'évacuer entre les pierres (« transparence hydraulique »).

MODES DE RUPTURE ET MANIFESTATIONS DES DÉSORDRES

La maçonnerie est un matériau composite qui a une bonne résistance à la compression mais une très faible résistance à la traction lorsqu'elle est jointoyée et nulle pour les murs en pierre sèche. En

outre, les ouvrages en maçonnerie ont une assez bonne capacité à se déformer sans rompre. Cette souplesse est due :

- pour les ouvrages en pierre sèche, aux possibilités de déplacement et de réagencement entre les pierres ;
- pour les ouvrages en maçonnerie hourdée (ou jointoyée), au comportement des joints.

Le fonctionnement mécanique permet d'identifier les modes de rupture alors que le matériau constitutif permet d'appréhender les modes d'altération et éventuellement la cinétique de dégradation.

Les désordres au niveau des murs de maçonnerie peuvent se manifester par :

- des déformations localisées (ventre, déplacements en tête...) ou généralisées (basculement, déversement, bombement – photo 3, p. 6) ;
- des fissures, pouvant concerner les joints, les blocs ou les deux ;
- des fractures (photo 4, p. 6), correspondant à une rupture franche du matériau avec désolidarisation des deux parties (ouvertures d'ordre centimétrique).



INSTRUCTION DES SINISTRES CAT-NAT SÉCHERESSE

Identifier le rôle des réseaux

- Interventions France entière
- + de 70 techniciens
- +6000 interventions par an





DIAG
CAT NAT

Les + Ax'eau

- > Diagnostic exhaustif des réseaux à moins de 5m du bâti
- > Rapport détaillé avec schéma de principe des réseaux
- > Techniciens formés à ce process spécifique
- > Interventions non sous-traitées

contact@ax-eau.com - <https://pro.ax-eau.com>

▶
N° Vert 0 809 109 709



Il est possible que cette fracture s'accompagne d'un mouvement relatif (rejet, glissement...);

– des désorganisations localisées (photo 5), ou étendues, correspondant à des mouvements de lit ou lacunes de pierres ou de briques;

– des altérations des matériaux (blocs et/ou joints, photos 6 et 7) sur une profondeur variable, pouvant *in fine* entraîner une défaillance structurale.

CAUSES DE RUPTURES OU DE DÉSORDRES

Les désordres au niveau des murs de maçonnerie (photos 8 à 12) peuvent avoir différentes causes⁴.

■ Défauts de conception et de construction

Ils peuvent provenir de briques ou pierres de mauvaise qualité et sensibles au gel, de maçonnerie de remplissage hourdée avec des mortiers de mauvaise qualité (insuffisance en dosage du liant, utilisation de chaux aérienne non suffisamment éteinte, mélange de chaux et de terre...), d'absence ou de dysfonctionnement de dispositif de drainage, de remblai de mauvaise qualité (argileux, agressifs

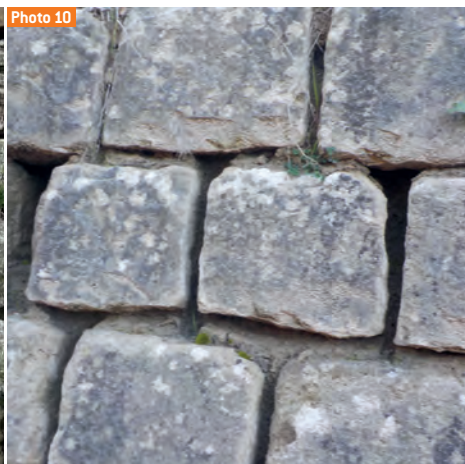
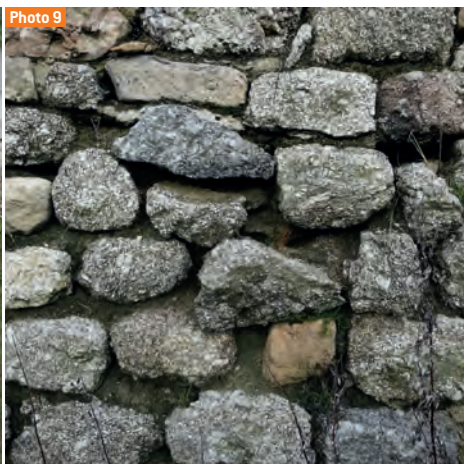
⁴ Pour plus de détails, voir Fabem 6.1 sur la Réparation et renforcement des maçonneries – Généralité et préparation des travaux, édité par le Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures (Stres) [9].



Exemples de manifestation des désordres. Photo 3 Bombement. Photo 4 Glissement. Photo 5 Désorganisation.



Exemples d'altération.



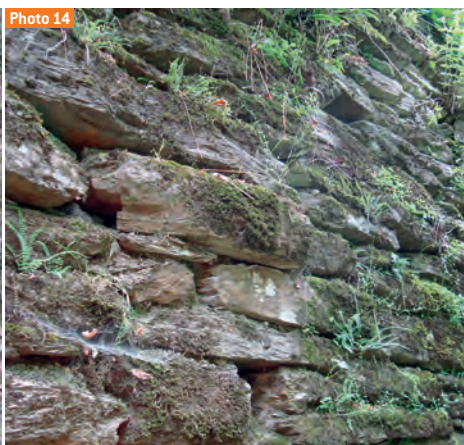
Cerema

Exemples de disjointoiement ou d'altération des joints.



Cerema

Exemples de lacunes en blocs (départ de la maçonnerie de parement) ou formation de cavité dans la maçonnerie.



Cerema

Exemples d'actions de l'eau, de l'humidité et de la végétation.

pour les maçonneries, gonflants...), de fondations affouillables, de déformations et fissures dues à une mauvaise exécution des fondations⁵ ou sur un sol support de faible résistance provoquant des tassements non maîtrisés, etc.

■ Altération des matériaux

(pierres, briques et mortiers – photos 6 et 7)

Il peut s'agir de la diminution de la qualité mécanique des matériaux ou de phénomènes de précipitation de sels dissous entraînant la formation de cavités à la surface des blocs. Le vieillissement des matériaux peut être accéléré par les actions des éléments naturels, comme la pluie ou les cycles gel-dégel. Certaines pathologies peuvent être spécifiques à la nature de la roche, dans le cas de pierre naturelle. Les principales altérations du mortier sont sa décomposition. Pour en savoir plus sur l'altération des matériaux, cf. [1].

■ Modification des conditions d'utilisation de l'ouvrage

L'augmentation des charges d'exploitation, la modification de la géométrie ou encore les vibrations dues à la circulation actuelle peuvent conduire aux déchaussements de pierres dans des maçonneries de pierres sèches ou de mauvaise qualité.

■ Modification de l'ouvrage en raison de l'environnement

Les ouvrages en maçonnerie sont sensibles à l'action de l'eau et de l'humidité ou encore de la végétation sur ou au voisinage immédiat des ouvrages (photos 13 à 15), et plus particulièrement ceux en pierre sèche⁶.

■ Impact d'une gestion inadéquate de l'ouvrage

Des réparations et/ou des renforcements mal réalisés peuvent entraîner parfois une modification du type de fonctionnement du mur (e.g. lors de la mise en œuvre de tirants) ou encore une méthode de nettoyage agressive peut endommager l'ouvrage.

Actions accidentelles

Telles que des chocs de véhicules par exemple.

L'appareillage⁷ (figure 2), la qualité de la mise en œuvre et la nature des blocs interviennent dans la réponse des murs aux agressions, mais aucun facteur discriminant simple n'a pas pu être dégagé permettant de fournir des préconisations.

Il est à noter, parmi les désordres présentés ci-avant, le fort impact de l'action de l'eau et de l'humidité pouvant conduire à des phénomènes d'affouillement des fondations et de l'assise du mur, à l'augmentation des poussées à l'arrière des murs ou encore à la détérioration des matériaux constitutifs (pour en savoir plus, cf. [1]).

SCENARIOS DE RUPTURE, ALÉAS ET VULNÉRABILITÉS

Dans le guide d'Analyse des risques appliquée aux murs en maçonnerie [1], les risques de rupture des murs en maçonnerie ont été classés en deux catégories.

■ Les ruptures par perte de « stabilité interne »

Elles adviennent en raison (figure 3a) :

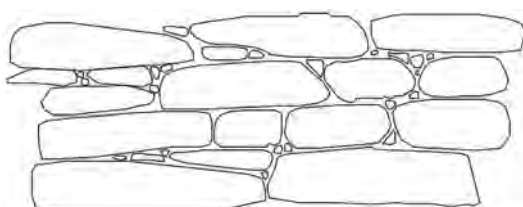
- d'une « agressivité du milieu » occasionnée par l'humidité ou par un environnement agressif ;
- d'une « augmentation des sollicitations sur le mur », par exemple en raison de l'évolution des conditions d'exploitation ou encore d'un choc de véhicule ou l'action d'une déneigeuse.

5) Les mouvements des fondations peuvent être provoqués par le tassement et le fractionnement des pierres de fondation qui sont soumises aux plus fortes contraintes et à l'humidité.

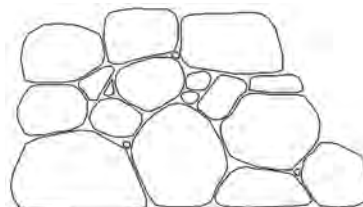
6) L'absence de liant rend les murs de pierres sèches particulièrement sensibles aux actions des éléments naturels : l'infiltration de l'eau, la pénétration de la végétation ou de petits animaux à l'intérieur de la maçonnerie s'en trouve facilitée [4].

7) On appelle « appareillage » ou « opus », l'agencement des blocs dans le mur. C'est en premier lieu le type ou la forme des blocs qui dicte le type d'appareillage utilisé. Cela peut également résulter d'un choix esthétique ou pratique du bâtisseur.

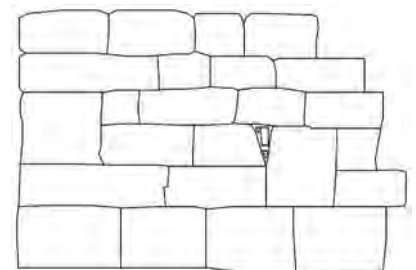
Figure 2 Exemples d'appareillage.



Opus assisé



Opus incertum



Opus quadrum ou romain

■ Les ruptures par perte de « Stabilité Externe »

Elles adviennent par glissement (figure 3b), poinçonnement ou renversement (figure 3c), qui peuvent être dues à :

- une « augmentation des sollicitations sur le mur », comme cité ci-avant;
- une « résistance géotechnique en pied défailante », pouvant résulter d'affouillements en bord de cours d'eau ou de travaux improvisés ou mal étudiés, comme une ouverture de tranchée en pied.

N'ont pas été considérés dans ce guide d'analyse des risques [1] :

- le « glissement d'ensemble », c'est-à-dire englobant l'ouvrage de soutènement, car indépendant de la nature de l'ouvrage;
- les chutes de blocs en considérant que la réparation interviendra rapidement;
- les sollicitations sismiques, car leur prise en compte dans le dimensionnement est récente et, de ce fait, tout ouvrage ancien présente une plus grande sensibilité. Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des murs de soutènement a toutefois été développée au Cerema sous le nom de « Sismur » (pour en savoir plus, voir [5] et [6]).

ANALYSE ET TRAITEMENT DU RISQUE

Au-delà du suivi régulier des ouvrages de soutènement en maçonnerie, l'analyse de toute pathologie constatée suppose d'établir ce que l'on pourrait appeler un « bilan de santé » apparent de l'ouvrage au travers d'un examen visuel, qui pourra éventuellement être complété par des auscultations ou des mesures pour aboutir au bon diagnostic. Afin de réaliser cet examen visuel, il est possible de s'appuyer sur le fascicule 2 de l'Itseoa⁸ [7] et sur les catalogues de désordres [8] produits dans le cadre de la cotation IQOA⁹ des ouvrages, qui est intégrée dans la politique de surveillance et d'entretien des ouvrages du réseau routier (Itseoa).

Après identification (ou confirmation) d'un risque avéré (ou fort) sur un ouvrage, deux axes de traitement du risque peuvent dès lors être envisagés :

- l'évitement ou la réduction de l'impact des aléas identifiés comme importants pour l'ouvrage considéré, lorsque c'est possible¹⁰;
- un examen des vulnérabilités et des solutions structurales permettant de les corriger.

Les investigations et l'instrumentation visent à permettre d'établir un diagnostic fiable de l'ouvrage et la production d'un avant-projet de réparation. Elles peuvent correspondre à (liste non exhaustive) :

- des études de caractérisation des matériaux (caractéristiques dimensionnelles et mécaniques, états de dégradation...);
- des études de caractérisation de la zone d'influence (géotechniques, écoulements hydrauliques...).

Il convient d'être vigilant sur l'adéquation entre le type d'investigation et la nature des informations obtenues¹¹.

Afin de surveiller les déformations du mur ou de son environnement, il est possible d'instrumenter

8) Itseoa: Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art, texte de référence en vigueur pour les ouvrages du réseau routier national datant de 2010.

9) IQOA: Image qualité des ouvrages d'art, outil s'inscrivant dans le processus d'évaluation périodique de l'état des ouvrages. Cette méthode permet d'inventorier, de classer et d'évaluer l'état apparent des différentes parties d'un ouvrage et d'attribuer une classe d'état ne prenant en compte que les aspects techniques (défauts, désordres affectant éventuellement l'ouvrage).

10) S'il est bien évidemment difficile d'agir sur l'aléa relatif aux conditions d'exploitation de la route, des actions sont possibles par exemple en réalisant une déviation ou en adaptant la circulation sur l'ouvrage (restrictions de circulation et de tonnage des poids lourds ou passages alternés).

11) Le guide d'analyse des risques des murs en maçonnerie [1] rappelle de manière synthétique les informations pouvant être obtenues en fonction des différents types d'essais. Un certain nombre de ces essais sont présentés sous forme de fiche dans les cahiers interactifs « Auscultation des ouvrages d'art » réalisés par l'Ifsttar et le Cerema [10].

Figure 3a

Rupture structurale.

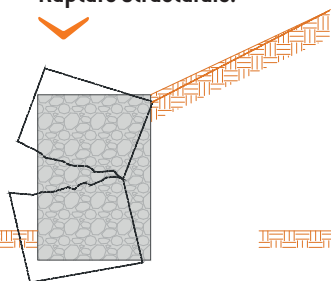


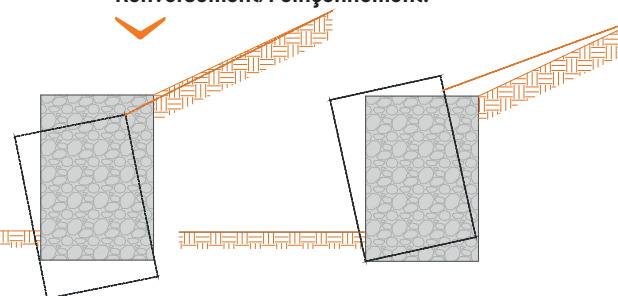
Figure 3b

Glissement.



Figure 3c

Renversement/Poinçonnement.



l'ouvrage avec, par exemple, des piézomètres ou des capteurs de pression, des appareils de mesure de déformation tridimensionnelle¹², des tassomètres, des inclinomètres... (pour en savoir plus, cf. [1]).

Il faut être attentif à l'adéquation entre la plage de mesure visée et la sensibilité du matériel utilisé. La connaissance de l'évolution des valeurs de ces mesures dans le temps est prépondérante, ce qui implique de fournir une période et une fréquence de ces dernières. Les cahiers des charges de mise en œuvre d'investigations et d'instrumentations doivent être élaborés par un spécialiste de ces thématiques.

Le report de ces essais sur un plan topographique est primordial.

ACTIONS DE MAINTENANCE PRÉVENTIVES OU CURATIVES

Un entretien adéquat permet de prévenir contre la ruine prématurée d'un mur en maçonnerie. À titre d'exemple, on distingue :

- l'entretien courant qui consiste en la maîtrise de la circulation des eaux et en l'enlèvement de toute végétation arbustive sauvage poussant dans le mur et à moins de deux mètres de ce dernier [4];

- l'entretien spécialisé qui réside en la réparation immédiate des parties de mur effondrées et le remplacement des pierres dégradées.

Pour faire suite aux exemples de solutions de type « préventives » mentionnées précédemment, les différents types d'actions curatives peuvent être (pour en savoir plus, cf. [1]) :

- la restauration de la maçonnerie (protection du mur contre les agressions, reconstruction partielle, augmentation de la résistance mécanique, limitation des déformations du mur ou de l'ouverture des fissures...);

- les interventions pour réduire les poussées côté amont (amélioration du dispositif d'évacuation des eaux côté amont, et du drainage interne¹³, diminution des sollicitations par un déchargement amont du mur...);

- les interventions côté amont pour s'opposer au glissement, au renversement ou au basculement (diminution de l'inclinaison du talus aval...);

- le confortement des fondations¹⁴ (modification des fondations, renforcement du sol de fondation, protection des fondations en milieu aquatique contre les affouillements...);

- le renforcement du soutènement pour s'opposer au renversement (clouage, tirantage, liaisonnement par « tirants d'enserrement », mise en place de butons entre deux murs de part et d'autre de la voie...), uniquement dans le cas de murs jointoyés.

Il faut faire néanmoins attention à ce que les interventions ne viennent pas déstabiliser *in fine* la maçonnerie, comme lors de l'injection du coulis par les suppressions occasionnées ou par la réduction de frottement entre les blocs en raison de la présence de ce milieu visqueux (pour d'autres exemples cf. [1]). ●

12) Comme les théodolites, les lasers, les méthodes « 3D » géométriques...

13) On peut aussi consulter le Guide Fabem 6.2, Réparation et renforcement des maçonneries – Réparation non structurale, édité par le Strres [11].

14) On peut aussi consulter le Guide Fabem 6.3, Réparation et renforcement des maçonneries – Réparation et renforcement structuraux, édité par le Strres [12].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Cerema, Analyse des risques appliquée aux murs en maçonnerie, 2021, collection Références, 76 p., ISBN : 978-2-37180-454-8
- [2] Maîtrise des risques - Application aux ouvrages d'art. Sétra, 2013, 96 p., ISBN : 978-2-11-129880-4
- [3] IQOA (Image qualité ouvrages d'art) - Murs, Murs de soutènement, Mur-poids en maçonnerie, Type 1 et Type 2, Catalogue des désordres et procès-verbal de visite, Cerema, 2018
- [4] Guide de bonnes pratiques de construction de murs de soutènement en pierre sèche, Capeb, 2007, 157 p.
- [5] D. Criado, C. Thibault, P. Marchand, D. Davi, « *Sismur, tool for evaluation of the seismic risks on the existing retaining walls* », Conférence Ecees Genève, sept. 2006
- [6] Sismur – Murs Poids. Rapport final. Cete Méditerranée, sept. 2011
- [7] Itseo (Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art) fascicule 2 – Généralités sur la surveillance. Sétra, décembre 2010, 60 p.
- [8] IQOA (Image qualité ouvrages d'art) - Murs, Murs de soutènement, Mur poids en maçonnerie, Types 1 et 2, Catalogue des désordres et procès-verbal de visite, Cerema, 2018
- [9] Guide Fabem 6.1, Réparation et renforcement des maçonneries – Généralité et préparation des travaux, version 2, Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures [Strres], février 2016
- [10] Ifsttar et Cerema, Auscultation des ouvrages d'art [en ligne]. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2015. Cahiers Interactifs, CII1. Disponible en ligne : <http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/>
- [11] Guide Fabem 6.2, Réparation et renforcement des maçonneries – Réparation non-structurale, version 2, Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures [Strres], février 2016
- [12] Guide Fabem 6.3, Réparation et renforcement des maçonneries – Réparation et renforcement structuraux, Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures [Strres], février 2016