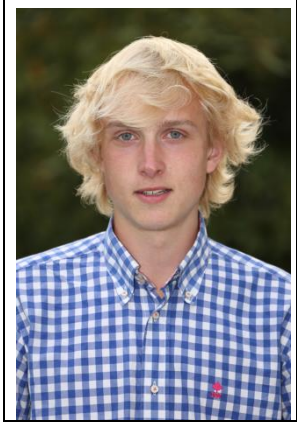
La Marlagne, Wépion, le 06 mars 2018

Journée d'information sur la gestion des ouvrages d'art

MISE EN PLACE D'UNE POLITIQUE DE GESTION DES OUVRAGES EN TERRE ARMÉE

SUJET ÉTUDIANT



FABRI LUDOVIC

Etudiant 2ème Master ingénieur industriel

École Centrale des Arts et Métiers (ECAM)

Promenade de l'Alma 50
1200 Wolluwe-Saint-Lambert

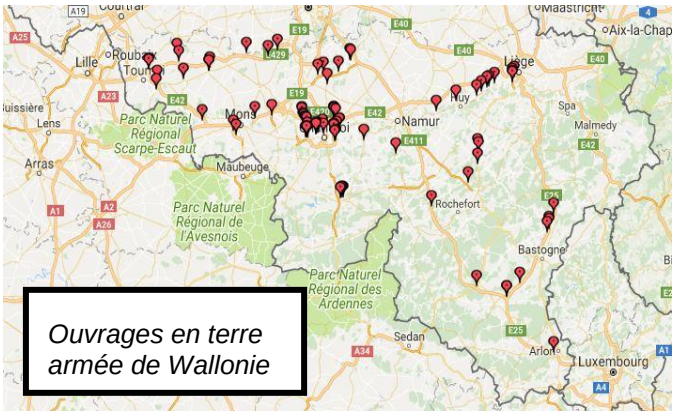
Email : ludovicfabri4@gmail.com

1. QU'EST-CE QUE LA TERRE ARMÉE ?

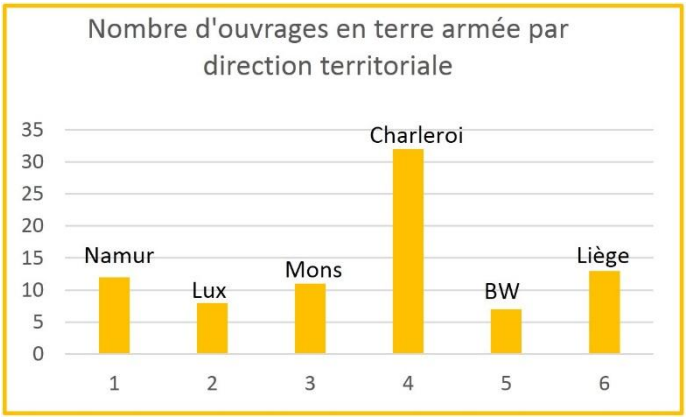
Le procédé de construction « Terre Armée » a été inventé en 1963 par l'ingénieur français Henri Vidal.

Un ouvrage en terre armée est constitué de différents composants : un parement fait d'éléments préfabriqués, des armatures en acier et du sol de remblai. Parmi ces trois composants, le parement ne joue qu'un rôle secondaire. En effet, si les ouvrages tiennent en place, c'est surtout grâce au frottement interne qui s'y développe : les efforts de poussée sont équilibrés par le frottement à l'interface entre les couches de remblai compactées et les armatures.

Les écailles préfabriquées du parement sont séparées par des joints ce qui confère aux ouvrages une certaine déformabilité particulièrement intéressante en cas de tassement différentiel ou de mouvements de terrain sous l'ouvrage. La Wallonie compte à ce jour un peu plus de 80 ouvrages en terre armée, il s'agit de culées de pont et de murs de soutènement. Un peu plus de la moitié de ces ouvrages sont situés en province de Hainaut.



Ouvrages en terre armée de Wallonie



2. MÉTHODOLOGIE ACTUELLE DE SUIVI

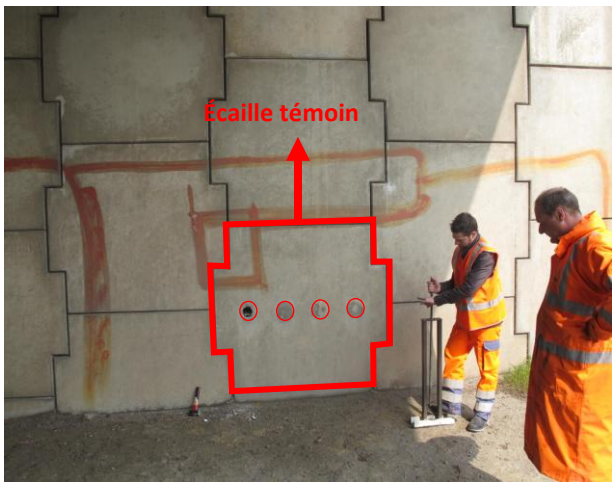
Les inspections visuelles périodiques ou inspections A sont réalisées par les directions territoriales. Ces inspections pour lesquelles une périodicité est définie permettent de déceler une éventuelle anomalie dans l'état de l'ouvrage et de rentrer si nécessaire une demande d'inspection détaillée, dite inspection de type B. Concernant les ouvrages en terre armée, ces inspections A permettent d'avoir une description de leur état extérieur, de quantifier la taille de fissures ou encore de signaler la présence éventuelle de végétation sur l'ouvrage. Enfin, l'inspection A peut préconiser certaines mesures à prendre qui, la plupart du temps, sont en lien avec l'entretien régulier de l'ouvrage, qui consiste à :

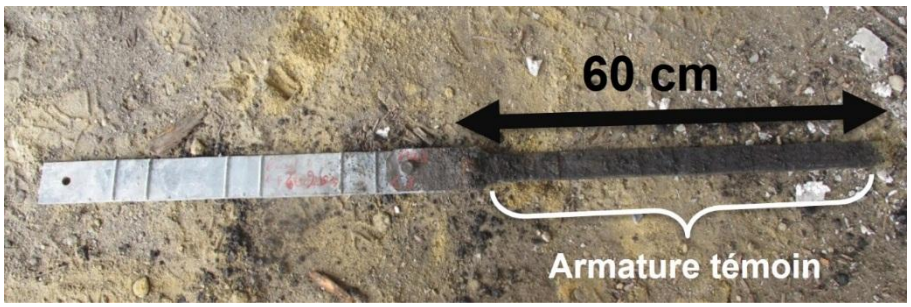
- Éliminer les végétaux qui poussent dans les joints de l'ouvrage
- Nettoyer et curer le système d'évacuation des eaux de drainage
- Entretenir les terre-pleins supérieurs et inférieurs
- Réparer les dégradations légères des écailles du parement

Les inspections B ou inspections détaillées des ouvrages sont réalisées par la Direction de l'Expertise des Ouvrages (DGO1-65). Ces inspections ont recours à des méthodes d'investigations plus précises. À ce jour à la DGO1-65, les opérations les plus pratiquées pour juger de l'état de santé d'un ouvrage sont l'extraction d'armatures témoins et la mesure des caractéristiques électrochimiques du sol de remblai.

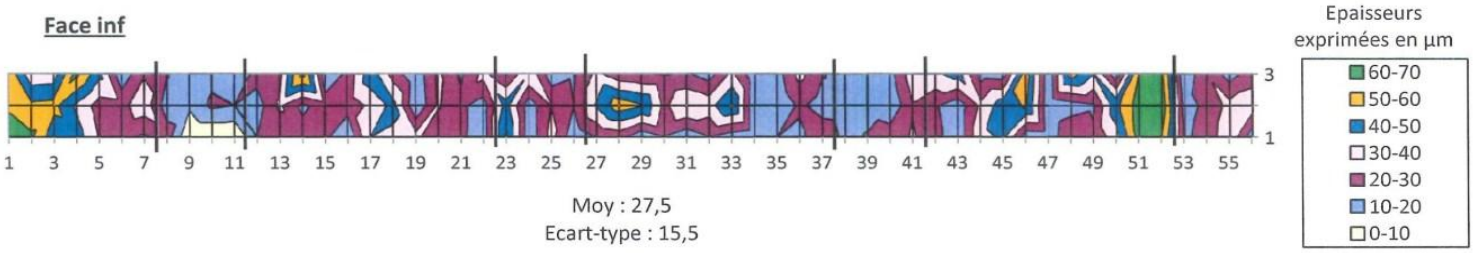
TÉMOINS DE DURABILITÉ

Les témoins de durabilité (ou armatures témoins) sont des armatures du même type que celles utilisées pour la stabilité de l'ouvrage, mesurent environ 60 cm de long et sont situées derrière des écailles spécifiques repérées sur les plans d'exécution des ouvrages, le plus souvent en partie basse de ces derniers.





Après extraction, le traitement de ces échantillons consiste à quantifier l'importance de la corrosion par analyse électromagnétique (jauge d'épaisseur) et dissolution chimique. Le résultat de ces mesures donne une épaisseur résiduelle moyenne de zinc sur l'armature qui permet d'évaluer l'état de santé de l'ouvrage et de fixer la date de la prochaine extraction.



Représentation graphique de l'épaisseur résiduelle de zinc sur une armature témoin (par analyse électromagnétique)

Si les documents de référence sur la surveillance des ouvrages en terre armée (principalement français) parlent de la réalisation d'essais de traction sur les témoins extraits, ceux-ci ont été réalisés pour la première fois récemment sur des armatures témoins prélevées dans les culées du pont RN 922 à Fosses-la-Ville. Pour ces essais, les éprouvettes étaient serrées dans les mors de la machine de traction et pour les 4 armatures testées, la rupture s'est produite près d'une extrémité, pouvant laisser supposer une concentration de contraintes dans ces zones extrêmes. Ces zones de ruptures étaient cependant localisées aux endroits des armatures présentant les morsures de corrosion les plus importantes.

Armature témoin avant et après essai de traction, rupture localisée près d'un mors

Cette méthodologie actuelle, à savoir réaliser le suivi des ouvrages en terre armée essentiellement sur base de l'analyse d'armatures témoins, pose plusieurs problèmes :

- L'état de corrosion des témoins n'est pas forcément représentatif de l'état de corrosion de l'ensemble des armatures de l'ouvrage. Les armatures les plus corrodées ont beaucoup de chance de se trouver en partie supérieure de l'ouvrage, si de l'eau pouvant de plus contenir des sels de déverglaçage (accélération de la corrosion) a pu s'infiltrer suite à un défaut d'étanchéité de la voirie supérieure. Or les écailles contenant les armatures témoins se trouvent la plupart du temps en partie inférieure des ouvrages.
- Le nombre de témoins de durabilité sur chaque ouvrage est limité : que fera-t-on quand tous les témoins d'un ouvrage auront été extraits ?
- Il est bien de connaitre la résistance résiduelle des armatures témoins mais si leur état de corrosion n'est pas représentatif des armatures résistantes, que peut-on vraiment en tirer ?

Ces différents points montrent la nécessité d'avoir d'autres approches pour juger de l'état de santé d'un ouvrage en terre armée, ce qui est l'objectif de ce travail de fin d'études, proposé par la DGO1-65.

ANALYSE DU SOL DE L'OUVRAGE

Récemment, les inspections d'ouvrages s'accompagnent de prélèvements de sol de remblai aux endroits d'où les témoins sont extraits. Le sol est analysé en laboratoire de chimie et ses caractéristiques électrochimiques sont déterminées pour être comparées aux valeurs recommandées dans les documents de référence.

Critères	Ouvrages hors d'eau
Résistivité	> 1000 Ω.cm
pH	5 < pH < 10
Teneurs en sels solubles : 1. Cl^- 2. SO_4^{--}	 ≤ 200 mg/kg ≤ 1000 mg/kg

Critères électrochimiques à respecter pour le sol de remblai des ouvrages hors d'eau

Jusqu'à maintenant, le sol analysé ne s'est jamais révélé agressif pour les ouvrages sur lesquels du remblai a été prélevé, ce qui montre que dans la plupart des cas, du sol satisfaisant aux exigences semble avoir été utilisé pour la construction.

3. NOUVELLES MÉTHODES DE SUIVI ACTUELLEMENT ÉTUDIÉES

À l'heure actuelle, l'ouvrage en terre armée de Wallonie qui présente les symptômes les plus préoccupants est la paire de culées porteuses du pont RN 922 à Fosses-la-Ville, dont la dernière inspection B a été réalisée en septembre 2017. Le rapport d'inspection met en évidence un état de corrosion avancé des armatures témoins prélevées. Ces armatures ont subi des essais de traction : la valeur de la résistance résiduelle moyenne en traction des armatures est satisfaisante. Des échantillons de sol ont également été prélevés et leur analyse les a révélés non-agressifs.

Dans le cadre du travail de fin d'études, les nouvelles méthodes étudiées se basent notamment sur une comparaison entre des mesures réalisées à Fosses-la-Ville et ces mêmes mesures réalisées sur d'autres ouvrages. Cette comparaison pourrait permettre de mettre en évidence certains critères qui pourraient avoir un impact important sur l'état d'un ouvrage, critères qui n'auraient pas été pris en compte jusqu'à présent.

ANALYSE PLUS APPROFONDIE DU SOL DE REMBLAI

Outre la mesure des critères électrochimiques actuellement réalisée, il pourrait être intéressant de recalculer les caractéristiques granulométrique et mécanique du sol des ouvrages inspectés, par la réalisation d'essais géotechniques en laboratoire sur du remblai prélevé in situ.

La mesure de l'angle de frottement interne du sol ϕ' permettrait par exemple de calculer le coefficient de poussée active réel du sol en place qui pourrait être comparé avec le coefficient de poussée considéré dans les notes de calculs des ouvrages, si elles sont disponibles. Pour les ouvrages dont la note de calcul est manquante, l'analyse approfondie du sol pourrait donner d'autres résultats intéressants comme :

- la courbe granulométrique
- la perméabilité
- les limites d'Atterberg

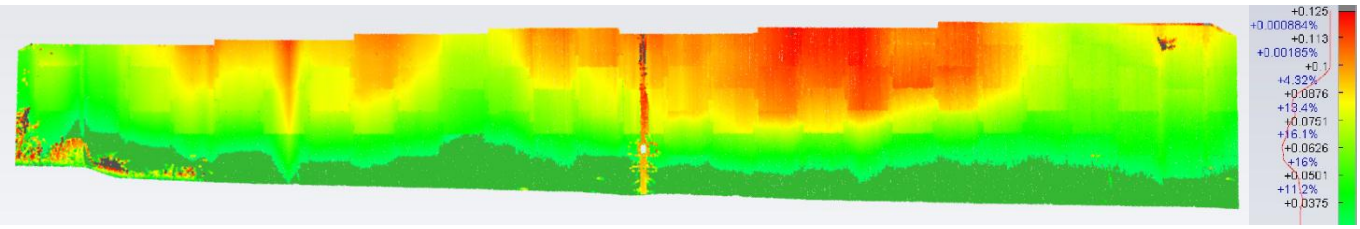
Cette piste est à ce jour simplement initiée.

SCAN 3D DES OUVRAGES

Actuellement en phase de test pour le suivi des ouvrages en terre armée, le scanner 3D est équipé d'un laser qui parcourt l'espace à 360° autour de sa position. Il relève en un ou plusieurs stationnements un nuage de points qui une fois traité sur ordinateur permet de créer le modèle 3D de l'ouvrage. Le logiciel de traitement permet de réaliser des coupes dans l'ouvrage pour quantifier sa déformation.

Nuage de point non traité d'un ouvrage

Mur de front de l'ouvrage isolé (via traitement)



Déplacement horizontal du parement par rapport à un plan vertical de référence

L'intérêt de cette méthode serait de pouvoir cerner l'évolution du déplacement des ouvrages en superposant des scans écartés dans le temps. Cette superposition n'est possible que si chaque relevé scanner est réalisé avec des points fixes qui permettront de recouvrir 2 scans avec précision. Ces points fixes sont des endroits où l'on peut placer des «sphères de référence» le temps des relevés scanner.

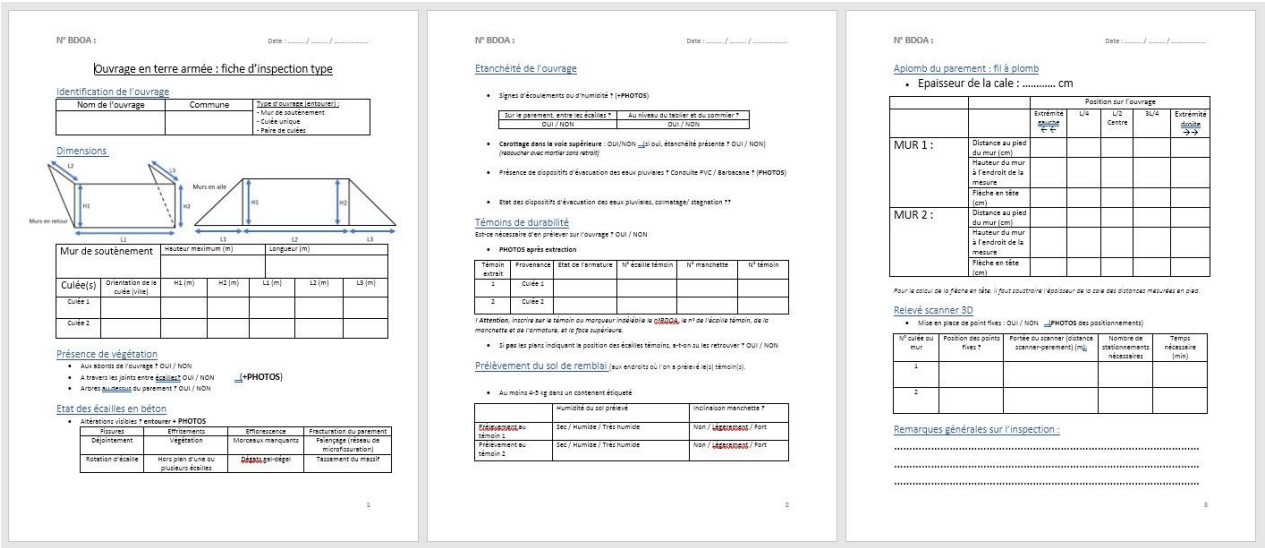
Si les tests réalisés actuellement sont concluants, c'est-à-dire que les relevés des ouvrages permettent la création de modèles 3D corrects, il y de bonnes chances pour que la superposition avec des scans réalisés à l'avenir permettent de connaitre l'évolution du déplacement des ouvrages. Il faudra alors se fixer des seuils de déplacement admissibles ce qui n'est pas évident. Ceux-ci devront être en lien avec la fonction porteuse de l'ouvrage.

Relevé scanner d'un mur de soutènement

Point fixe sur d'une pile centrale de pont

4. FICHE D'INSPECTION TYPE

L'avancée actuelle du travail de fin d'études a déjà permis de créer une fiche d'inspection type à remplir par la ou les personnes responsables de l'inspection détaillée. Ce nouvel outil permet de systématiser les inspections et de faire en sorte de ne rien oublier une fois sur place, regroupant successivement les différents points importants à relever sur un ouvrage. Cette fiche est en évolution permanente : le document actuel présenté ci-dessous n'est donc pas définitif.



N° BDOA : Date : ...../ ...../ .....

Ouvrage en terre armée : fiche d'inspection type

Identification de l'ouvrage

Nom de l'ouvrage	Commune	Type d'ouvrage (entourer) : - Mur de soutènement - Culée unique - Paire de culées

Dimensions

Murs en aile

Murs en retour

Mur de soutènement	Hauteur maximum (m)	Longueur (m)

Culée(s)	Orientation de la culée (ville)	H1 (m)	H2 (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)
Culée 1						
Culée 2						

Présence de végétation

- Aux abords de l'ouvrage ? OUI / NON
- A travers les joints entre écailles? OUI / NON (+PHOTOS)
- Arbres au dessus du parement ? OUI / NON

Etat des écailles en béton

- Altérations visibles ? entourer + PHOTOS

Fissures	Effritements	Efflorescence	Fracturation du parement
Déjointement	Végétation	Morceaux manquants	Faïençage (réseau de microfissuration)
Rotation d'écaille	Hors plan d'une ou plusieurs écailles	Dégats gel-dégel	Tassement du massif

1

N° BDOA : Date : ...../ ...../ .....

Etanchéité de l'ouvrage

- Signes d'écoulements ou d'humidité ? (+PHOTOS)

Sur le parement, entre les écailles ?	Au niveau du tablier et du sommier ?
OUI / NON	OUI / NON

- **Carottage dans la voie supérieure** : OUI/NON (si oui, étanchéité présente ? OUI / NON) (*rebouchter avec mortier sans retrait*)
- Présence de dispositifs d'évacuation des eaux pluviales ? Conduite PVC / Barbacane ? (PHOTOS)
- Etat des dispositifs d'évacuation des eaux pluviales, colmatage/ stagnation ??

Témoins de durabilité

Est-ce nécessaire d'en prélever sur l'ouvrage ? OUI / NON

- **PHOTOS après extraction**

Témoin extrait	Provenance	Etat de l'armature	N° écaille témoin	N° manchette	N° témoin
1	Culée 1				
2	Culée 2				

*! **Attention**, inscrire sur le témoin ou marqueur indélébile le **OBDOA**, le n° de l'écaille témoin, de la manchette et de l'armature, et la face supérieure.*

- Si pas les plans indiquant la position des écailles témoins, a-t-on su les retrouver ? OUI / NON

Prélèvement du sol de remblai (aux endroits où l'on a prélevé le(s) témoin(s).

- Au moins 4-5 kg dans un contenant étiqueté

	Humidité du sol prélevé	Inclinaison manchette ?
Prélèvement au témoin 1	Sec / Humide / Très humide	Non / Légèrement / Fort
Prélèvement au témoin 2	Sec / Humide / Très humide	Non / Légèrement / Fort

2

N° BDOA : Date : ...../ ...../ .....

Aplomb du parement : fil à plomb

- Epaisseur de la cale : ..... cm

		Position sur l'ouvrage				
		Extrémité gauche ← ←	L/4	L/2 Centre	3L/4	Extrémité droite → →
MUR 1 :	Distance au pied du mur (cm)					
	Hauteur du mur à l'endroit de la mesure					
	Flèche en tête (cm)					
MUR 2 :	Distance au pied du mur (cm)					
	Hauteur du mur à l'endroit de la mesure					
	Flèche en tête (cm)					

Pour le calcul de la flèche en tête, il faut soustraire l'épaisseur de la cale des distances mesurées en pied.

Relevé scanner 3D

- Mise en place de point fixes : OUI / NON (**PHOTOS des positionnements**)

N° culée ou mur	Position des points fixes ?	Portée du scanner (distance scanner-parement) (m)	Nombre de stationnements nécessaires	Temps nécessaire (min)
1				
2				

Remarques générales sur l'inspection :

.....

.....

.....

3

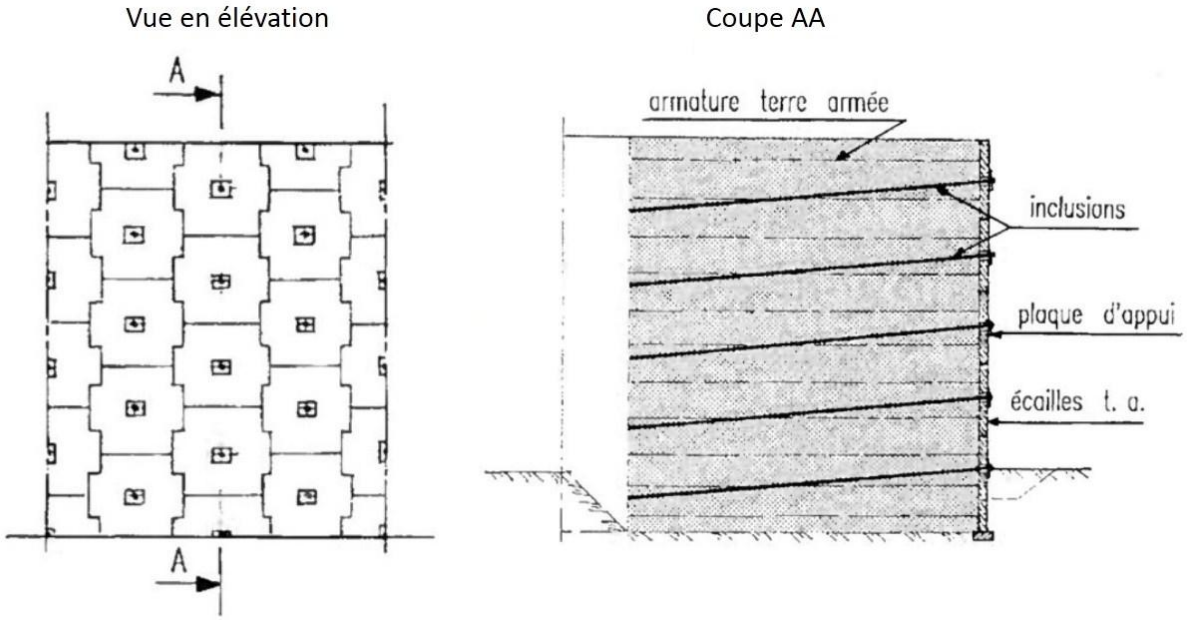
5. TECHNIQUES DE RÉPARATION

Si suite à une inspection détaillée, le nouvel état de santé de l'ouvrage est tel qu'il nécessite d'être réparé, il faudra intervenir dans les délais convenus. Différentes techniques de réparation existent :

- Les remblais de butée
- Les murs de soutènement
- Le clouage
- …

A ce jour, sauf erreur, aucun ouvrage en terre armée de Wallonie n'a encore été renforcé par une des techniques citées ci-dessus : on ne peut donc que se baser sur un retour d'expérience extérieur sur la réparation de ce type d'ouvrage. En France, c'est le clouage qui est la technique de renforcement la plus utilisée pour les ouvrages en terre armée car elle nécessite une emprise nulle et est assez rapide à mettre en œuvre.

Le procédé consiste à insérer des clous dans l'ouvrage qui vont se substituer aux armatures du massif. Ces clous sont enfoncés dans la structure et accrochés aux écailles du parement par des plaques de répartition cruciformes.



Le principe de fonctionnement du clouage est similaire à celui de la terre armée : les clous sont scellés sur toute leur longueur dans le remblai par un coulis de ciment. La poussée horizontale provenant du sol et des surcharges sur l'ouvrage est compensée par le frottement à l'interface entre les clous, le coulis de scellement, et le sol.

C'est sans doute pour le pont RN 922 à Fosses-la-Ville que cette technique de clouage sera mise en œuvre pour la première fois en Wallonie.