PAROI CLOUEE AD/OC - UNE ALTERNATIVE AU BETON PROJETE QUI RENFORCE LE DRAINAGE ET LIMITE LES EMISSIONS DE CO2

AD/OC NAILED WALLS - AN ALTERNATIVE TO CONVENTIONAL SHOTCRETE FACINGS WHICH IMPROVES DRAINAGE AND REDUCES CO2 EMISSIONS

Philippe ROBIT[1], Jean Pierre RAJOT[2], Ali LIMAM[3]

1 GTS, Saint-Priest (69), France
2 IFSTTAR, Bron (69), France
3 INSA de Lyon, Villeurbanne (69), France

RÉSUMÉ — La paroi clouée AD/OC substitue des écailles en béton préfabriqué au béton projeté conventionnel. Sur le chantier les conditions d'hygiène et de sécurité sont améliorées, les contraintes sur le phasage sont réduites et l'industrialisation du procédé permet de limiter considérablement les quantités de ciment et d'acier. Le confinement mécanique immédiat du terrain naturel est assuré en injectant à l'arrière des écailles, au travers des barbacanes, une couche de gravette dont la forte perméabilité préserve l'ouvrage des venues d'eaux. Un chantier expérimental de surface de parement 200 m² et hauteur 7.50 m, confirme le comportement identique d'un soutènement cloué construit avec parement AD/OC ou par béton projeté.

ABSTRACT — AD/OC nailed walls technique uses prefabricated concrete panels instead of usual shotcrete. During construction, the safety of workers is improved, constraints on construction sequences are reduced and industrial manufacturing of the facing panels significantly reduces the use of cement and steel. The immediate confining pressure of the excavation facing is obtained by injecting behind the concrete panels, through the weep holes, a high permeability layer of coarse crushed gravel, which will provide long term drainage of ground water flows. A full scale experimental wall 7.5 m high and 200 m² facing surface has been constructed to compare performance of AD/OC to conventional shocrete walls.

1. Constats sur l'usage de béton projeté pour les murs cloués

Les premières parois clouées ont été construites dans les années 1970. Suite au Projet National CLOUTERRE (1991), le clouage des sols est devenu fréquent pour conforter les glissements de terrains ou construire des soutènements d'excavations. Le nombre d'entreprises à pratiquer le clouage s'est alors fortement accru, avec bien entendu la survenance de désordres liés à sa banalisation.
En exécution de murs cloués, la réalisation des renforcements est relativement bien encadrée et contrôlée notamment par des essais in situ (préalable, conformité, contrôle). Il n'en est pas de même pour le parement en béton projeté, technique en marge des textes normatifs et procédé nécessitant un double cycle ferraillage / projection qui s'avère contraignant pour la rentabilité d'un chantier. Un retour

d'expérience de vingt ans de chantiers de parois clouées réalisées par béton projeté fait apparaître les constats suivants :
(1) L'incompatibilité entre un apport rapide au terrain d'un confinement et l'installation d'un dispositif de drainage, la faiblesse des spécifications concernant l'exécution du parement et son drainage et la recherche d'optimisation des ateliers de production incite à appliquer a minima les règles et mesures de drainage du parement, pourtant cruciales pour la pérennité de l'ouvrage. La négligence du drainage est devenue l'une des causes les plus fréquentes de sinistre.
(2) La résistance et la qualité du parement obtenu (teneur en eau du béton, enrobage et écartement des treillis) est intégralement dépendante du savoir-faire de l'opérateur de projection. Il en découle une disparité du résultat obtenu y compris au sein d'un même ouvrage. C'est également une cause fréquente de sinistre.
(3) Avec de fortes pressions d'air en jeu, la technique du béton projeté est très accidentogène et engendre des lésions graves. De plus, en termes d'hygiène, l'impact à long terme sur les voies respiratoires lié à l'exposition aux poussières n'est plus à démontrer.
(4) Enfin, les surconsommations de matière première liés aux rebonds du béton et au remplissage des hors profils sont considérables. Le ciment étant très gros émetteur de CO_2, l'impact sur le bilan carbone de l'ouvrage est majeur.

2. Concept de la paroi AD/OC

Ces constats récurrents ont conduit en 2008 à établir un cahier des charges pour développer un nouveau procédé de construction des parements de parois clouées :

- Être conforme aux Eurocodes et à la norme d'application NF P 94-270,
- Intégrer dans le procédé un drainage efficace comme point de passage obligé,
- Accroître la maîtrise de la qualité de construction du parement,
- Améliorer les conditions d'hygiène et de sécurité lors de la mise en œuvre,
- Optimiser les consommations de matière première et le bilan carbone et
- Satisfaire l'écoute client en visant à réduire les délais.

Le Service R&D de GTS s'est ainsi orienté vers une industrialisation du procédé via l'utilisation d'écailles en béton préfabriqué. Un projet de recherche avec l'IFSTTAR de Lyon et le laboratoire LGCIE de l'INSA de Lyon a alors conduit à la paroi Auto-Drainante et Optimisée en Carbone (paroi AD/OC), représentée en figure 1. En termes d'interaction sol-structure, le phasage de construction d'une paroi AD/OC est équivalent à celui d'une paroi par béton projeté : excavation par passes et confinement rapide du front d'excavation. La méthode courante de dimensionnement du clouage est donc applicable.

3. Écailles préfabriquées

Après recensement et analyse des géométries de renforcements sur les chantiers des trois dernières années, l'industrialisation du procédé a conduit à standardiser la surface des écailles, fixée à 3m². Lors du dimensionnement géotechnique du clouage en projet d'exécution, la hauteur des passes est prise égale à 1.50 m et

l'espacement horizontal à 2 m. La longueur des ancrages et leur tension, fonction des conditions géotechniques, résultent du dimensionnement du clouage. Le choix du diamètre et de la technique de forage interviennent également.

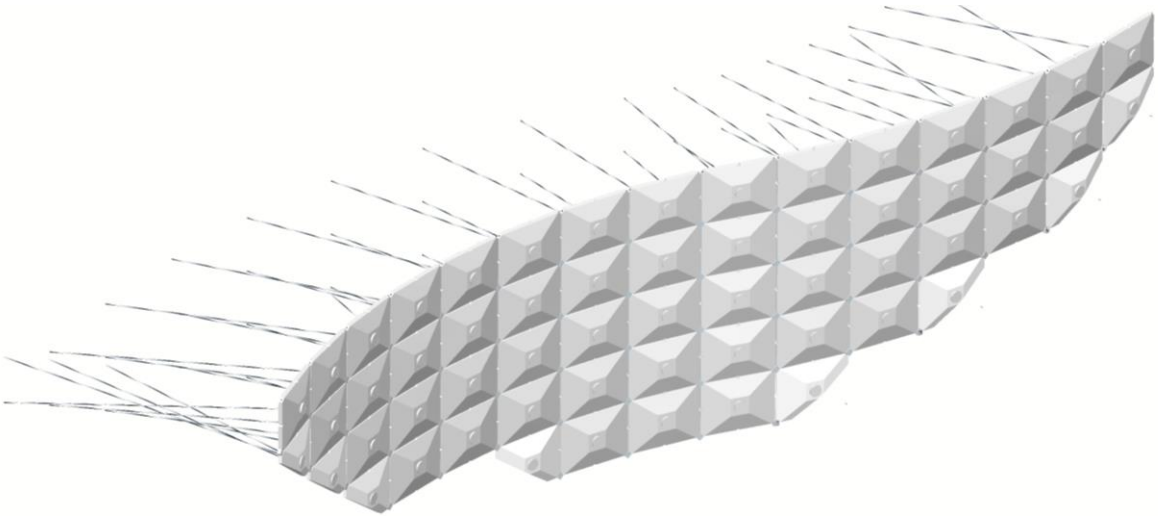

Figure 1. Vue d'ensemble d'une paroi clouée AD/OC

La figure 2 montre une écaille et le dispositif de fixation entre éléments du parement. Pour optimiser la consommation de matière première, les écailles sont pyramidales : l'épaisseur est proportionnelle aux moments internes, plus importants aux abords de l'ancrage. Ces écailles sont jointives entre elles afin d'assurer la continuité du parement. À la jonction, les efforts sont continus mais les moments sont nuls. Les écailles du parement et les jonctions entre écailles sont dimensionnées pour reprendre la traction maximale admissible dans les renforcements.

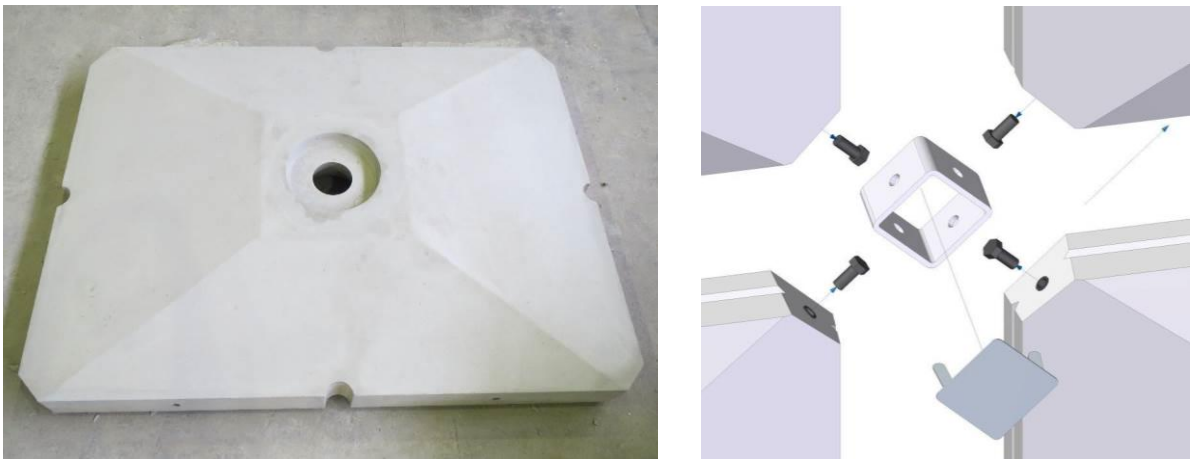

Figure 2. Écaille standard large de 2 m et haute de 1.50 m et système de jonction

L'écaille est déclinée pour trois tensions d'ancrages les plus couramment rencontrés, couvrant 85% des cas réels recensées. Un dimensionnement spécifique permet de traiter et optimiser des projets de grande ampleur. Contrairement au béton projeté

dont la teneur en eau n'est pas maîtrisée, la préfabrication permet de gérer toutes les conditions d'agressions environnementales répertoriées dans les Eurocodes (XC4, XD3, XF4…). Enfin, il est possible de retourner l'écaille pointe vers le terrain, pour une meilleure intégration urbaine avec face plane matricée.

4. La couche drainante

Lors du terrassement d'une passe d'excavation pour réaliser un lit d'ancrages, un espace ajustable minimal (10 cm par défaut) est ménagé entre la face intérieure des écailles et le front de terrassement. Immédiatement après la pose des écailles, cet espace est injecté de gravette de granulométrie 4/6 mm au travers des barbacanes (en figure 2, réservations circulaires en périphérie des écailles). La figure 3 en partie gauche montre la couche drainante placée derrière les éléments de paroi AD/OC.
Afin de permettre le terrassement des passes inférieures, le matériau drainant est doté d'une cohésion par ajout aux grains mouillés d'une faible quantité de ciment (≈ 50 kg/m^3) produisant des ponts cimentés aux contacts entre grains, par création de ménisques avant séchage. Une photo de la gravette cémentée est donnée en partie droite de la figure 3. Cet ajout de ciment est sans effet sur la forte perméabilité de la gravette. Il apporte une cohésion de l'ordre de 20 kPa, très suffisante pour maintenir le matériau entre le terrain et l'écaille pendant la passe d'excavation suivante.
Cette gravette remplit plusieurs fonctions. Tout d'abord, elle réalise un clavage entre la face intérieure des écailles et le terrain de surface irrégulière. Les pressions du sol contre le parement sont ainsi homogénéisées, sans risque de concentration d'effort. En complément, une pré-tension de l'ancrage confine la gravette et apporte une première pression au front d'excavation. La maîtrise de cette pression initiale est susceptible de limiter la déstructuration du sol avant activation du confortement.
Ensuite, la gravette garantit un drainage continu de l'ensemble du parement. Avec une porosité proche de 50 % et une perméabilité supérieure à $10^{-3}10^{-3}$ m/s, cette couche drainante est en mesure d'évacuer la totalité des venues d'eau rencontrées dans la plupart des terrains. Elle garantit donc l'absence de pressions hydrauliques que ne saurait supporter un parement de soutènement par clouage.
Enfin, pour les ouvrages de montagne dans des sols limoneux, la gravette apporte une protection du parement contre le gonflement des sols en présence d'eau produit par le gel. En effet, la distribution granulométrique de la gravette ne permet pas la formation de lentilles de glace par transfert hydrique vers le front de gel. Comme préconisé dans l'additif Clouterre (projet Clouterre II (2002)), la couche drainante remplit ainsi une fonction de contre parement, isolant les sols naturels gélifs.

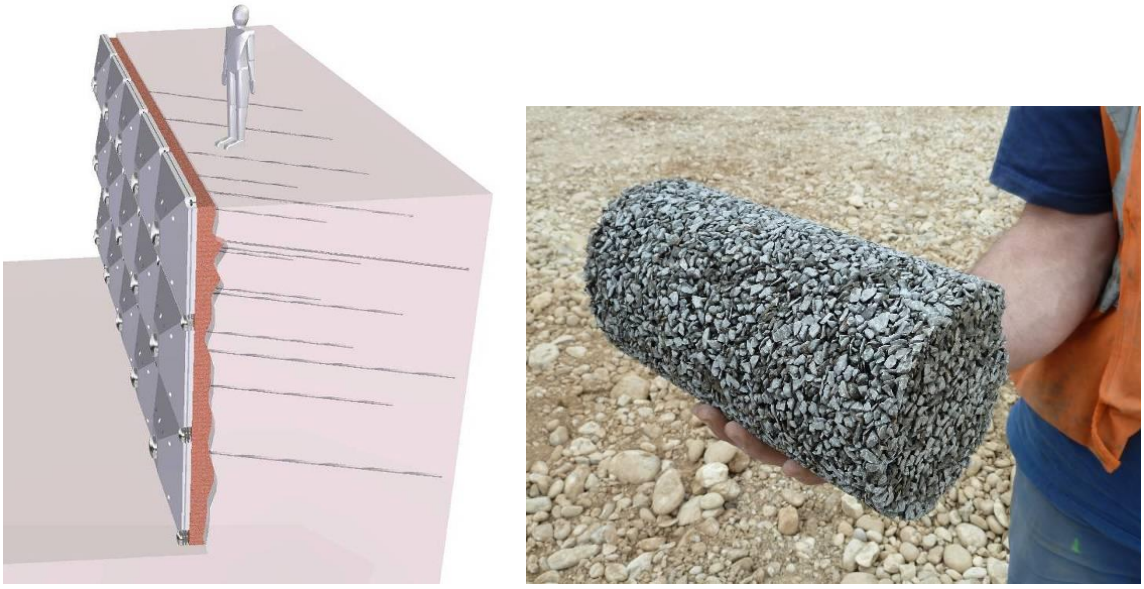

Figure 3. Couche drainante en gravette cémentée

5. Mise en œuvre

La paroi AD/OC est conçue pour être mise en œuvre en remblai (élargissement aval de chaussée, réfection suite à un glissement de terrain) ou en déblai (élargissement amont de chaussée, décaissement de terrain naturel pour créer une plate-forme). La mise en œuvre en remblai est plus simple. Elle suit un cycle de mise en œuvre similaire à celui d'un remblai en sol renforcé.

En déblai, un sous-cavage de la partie du parement déjà réalisée est susceptible d'apparaître lors des décaissements successifs et du forage des renforcements. Une projection de béton peut limiter ce sous-cavage, mais il est alors courant de constater un glissement de plusieurs décimètres de matériaux au voisinage du parement lors de l'ouverture de la troisième ou quatrième passe. Pour pallier ce phénomène, accompagné de cisaillement des renforcements près du parement, des potences de suspension provisoires sont employées pour transférer au sol le poids des écailles. Les efforts contre l'écaille résultant de la surcharge appliquée par la potence en surface du sol, comme représenté dans le schéma en partie gauche de la figure 4, peuvent être évalués par la méthode de Krey (Philipponat et al. (1998)). L'injection de gravette cémentée limite également fortement le risque de sous-cavage.

Le forage des clous est alors réalisé avec les techniques courantes, adaptées aux terrains rencontrés. Une tolérance d'implantation des clous de +/-5 cm est requise pour permettre la fixation à l'écaille de la tête du renforcement, au travers d'une plaque d'acier comportant une lumière. Un gabarit de positionnement est utilisé. Cette contrainte garantit le respect du maillage des renforcements. Enfin, l'application d'une pré-tension aux renforcements constitue un premier contrôle exhaustif du scellement des ancrages au terrain.

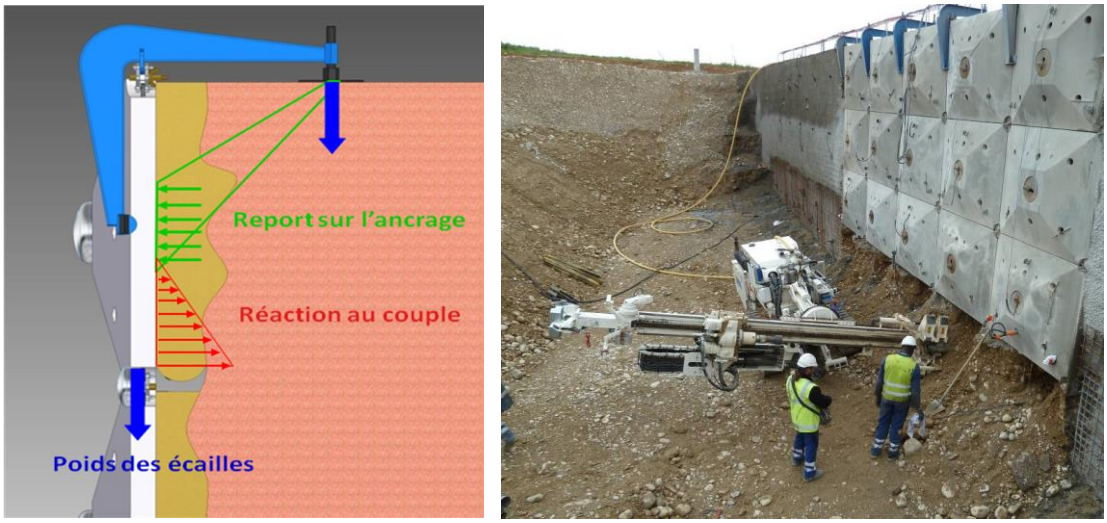

Figure 4. Principe des potences de suspension provisoire

6. Chantier expérimental

6.1. Protocole d'essai

Pour valider le comportement mécanique du nouveau procédé de construction des parements d'excavation par clouage, un ouvrage expérimental haut de 7.50 m et long de 30 m a été réalisé à Bévenais (38). L'approche a consisté à comparer le comportement de deux murs jumeaux, le premier avec paroi usuelle en béton projeté et le second avec la paroi AD/OC (photo de l'ouvrage terminé en figure 5).
Plus de 100 mires topographiques relevées hebdomadairement ont permis de suivre la déformée du parement et de la surface du sol à l'arrière du parement dans deux profils, AD/OC et béton projeté. Les efforts dans les renforcements à l'arrière des deux natures de parement ont été comparés à différents niveaux et à différentes distances du parement. L'INSA de Lyon a ainsi installé plus de 70 jauges de déformations, suivies en temps réel sur chantier. Enfin, quatre capteurs de pression ont été placés à l'arrière des parements, deux par procédé.

Figure 5. Vue d'ensemble de l'ouvrage expérimental

6.2. Analyse du comportement géotechnique

La figure 6 montre le modèle géotechnique du site, déduit des sondages et essais de laboratoire, et le renforcement des sols en place par cinq niveaux d'ancrages passifs. Le site est formé d'une couche de grave propre bien graduée, rapidement compacte avec la profondeur. La nappe ne concerne pas l'ouvrage.

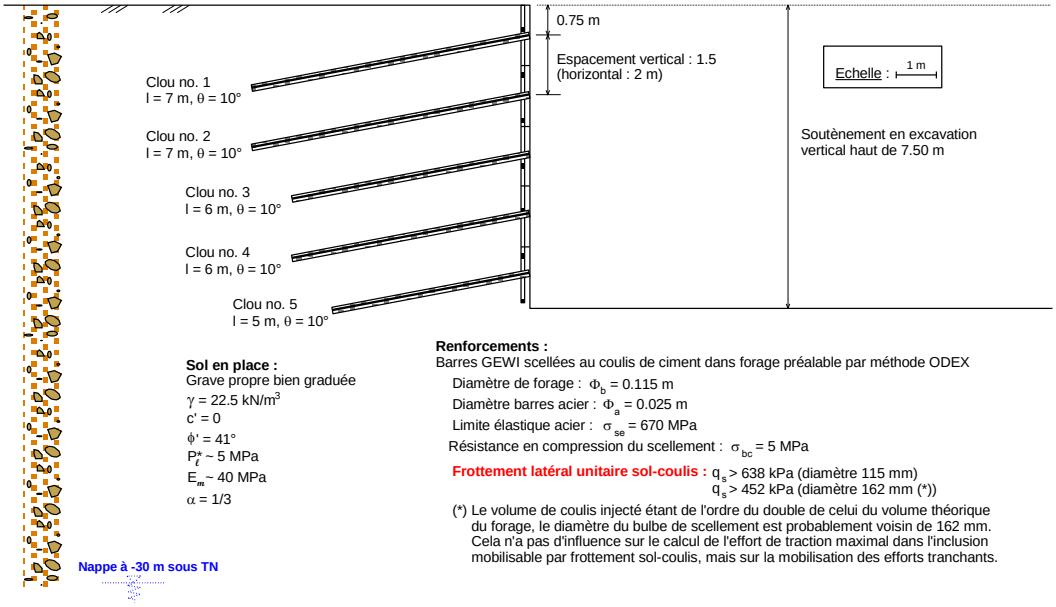

Figure 6. Modèle géotechnique du site et description de l'ouvrage

Dans cette nature de sol, un sous-cavage est susceptible d'apparaître lors des phases d'excavation et de forage, notamment dans les premières passes. Ce phénomène a affecté les deux techniques de manière égale. En partie haute, les hors profils ont conduit à exécuter une paroi de béton projeté épaisse de près de 40 cm, pour 20 cm prévus au projet. À l'arrière des écailles, l'injection de gravette cimentée a permis de combler les vides de manière relativement élégante. Le serrage de l'ancrage sur l'écaille, équivalent à une pression de l'ordre de 10 kPa, crée un confinement initial des terres et établit un certain contrôle de l'ancrage.

Des essais d'arrachement ont été effectués sur des renforcements réalisés avec la même inclinaison et technique de forage et injection que les clous de l'ouvrage. Les essais sur ces clous longs de 4 m et scellés sur les deux derniers mètres ont été limités par la résistance en traction de la barre. Les longueurs des renforcements issues du prédimensionnement ont néanmoins été conservées pendant le chantier.

Le dimensionnement d'exécution a été conduit conformément à l'Eurocode 7, approche 3, et à la norme d'application NF P 94270, hors séisme. Ce calcul multicritère permet de vérifier la stabilité de l'ouvrage avec des paramètres de résistance du sol et des renforcements pondérés. Avec la forte résistance à l'arrachement des inclusions, le mécanisme critique se situe à l'arrière du massif renforcé. Dans ces calculs, le facteur de sécurité obtenu pour ce mécanisme (1.68) n'est autre qu'un facteur supplémentaire apporté au coefficient de méthode (1.1) et

de pondération de la tangente de l'angle de frottement interne du sol (1.25). Il résulte de l'introduction dans les calculs des efforts mobilisables dans les renforcements.
Cette approche ne permet pas d'évaluer les efforts effectifs dans les renforcements car elle ne relie pas la mobilisation des renforcements à la mobilisation de la résistance au cisaillement du sol. Delmas et al. (1986) ont introduit une notion de déplacement du sol pour simuler la mobilisation progressive des renforcements. Cette approche permet de calculer les efforts nécessaires pour un degré souhaité de mobilisation de la résistance au cisaillement du sol. Gigan et al. (1987) ont montré que ces deux approches multicritères étaient équivalentes lorsque le renforcement était optimal, c'est-à-dire mobilisant au plus près la résistance des sols et des renforcements. Pour un coefficient de méthode de 1.1 et une pondération de la résistance au cisaillement du sol de 1.25, la courbe de rupture critique, mobilisant le plus les renforcements, est voisine du milieu du massif et les efforts nécessaires à la stabilité sont de 47 kN dans le 3ème niveau de renforcement, 80 kN dans le 4ème et 120 kN dans le 5ème, en partie inférieure.
Le comportement observé est similaire pour les deux natures de parement. La figure 7 montre les tassements du sol à l'arrière du parement et les déplacements latéraux des parois. Le déplacement en tête est de l'ordre de 10 mm, proche de la valeur inférieure donnée dans Clouterre (1991), H/1000, où H représente la hauteur du parement, attestant d'une exécution soignée des deux procédés.
De même, les efforts observés dans les renforcements ne font pas apparaître de tendance entre un procédé ou l'autre. À titre d'illustration, la figure 8 montre les efforts observés pendant la construction à proximité du parement dans les renforcements du 4ème niveau d'ancrage depuis le sommet (jauges 13 et 14 à l'arrière des écailles, 15 et 17 du béton projeté). À l'intérieur du massif, les mesures ne mettent pas en évidence une valeur d'effort de traction maximale bien marquée.

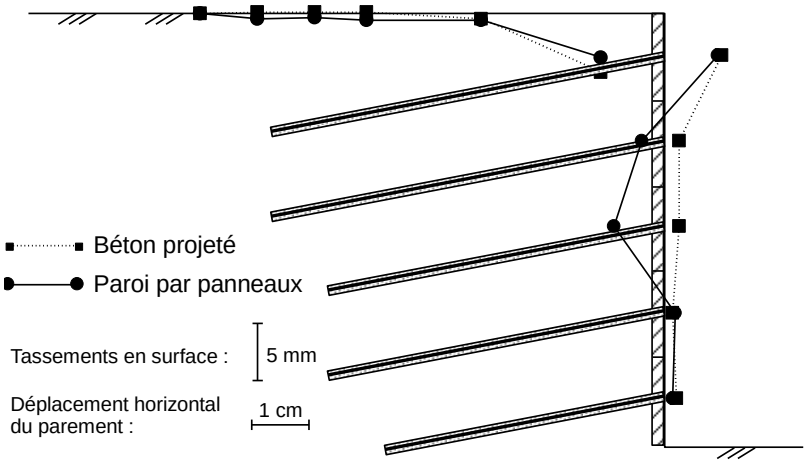

Figure 7. Tassements et déformée du parement stabilisés après la fin de travaux

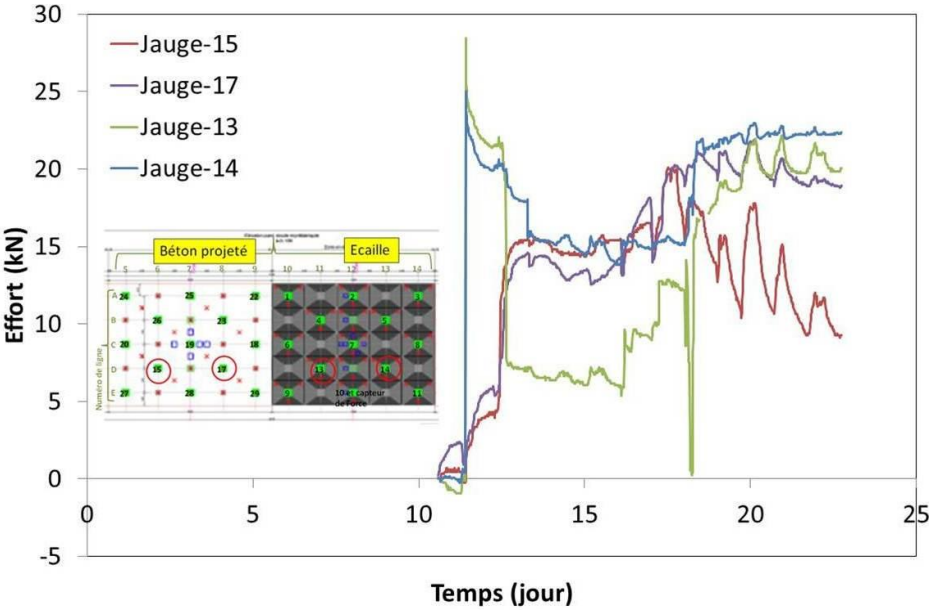

Figure 8. Efforts à proximité du parement au 4ème niveau de renforcement

Il est à noter que ces efforts, de l'ordre de 20 kN, sont très inférieurs à la valeur mentionnée précédemment (80 kN), résultant du calcul de stabilité pour une résistance au cisaillement pondérée de 1.25. Par ailleurs, le sol de fondation limitant les déformations du massif en partie basse, ces efforts sont maxima au 3ème niveau de renforcement puis décroissent progressivement dans les niveaux 4 et 5, contrairement aux prédictions basées sur les calculs à la rupture.
La sollicitation de l'ouvrage sera poursuivie au printemps 2014 par décaissement à l'aval puis surcharge en tête, dans l'objectif d'observer le comportement des deux parements plus proche de la rupture.

7. Bilan carbone comparatif

Ce chantier expérimental a été l'occasion de faire un bilan carbone comparatif entre le béton projeté et la paroi AD/OC sur la base des matériaux achetés. Les émissions unitaires proviennent du guide "Bilan Carbone" de l'ADEME. Le tableau 1 donne les résultats de cette analyse, complétée d'une équivalence en km parcouru en voiture pour faciliter la perception de l'enjeu. Sans considérer les gains liés à une durée de construction plus courte, la paroi AD/OC réduit les émissions de plus de 50 %.

Tableau 1. Analyse comparée du bilan carbone des parois AD/OC et béton projeté

Fournitures	100 m² de béton projeté		100 m² de paroi AD/OC	
Béton	52 m3	17,9 t CO2	18,7 m3	6,4 t CO2
Acier	1 920 kg	4,1 t CO2	1 500 kg	3,2 t CO2
Total	22,1 t CO2		9,7 t CO2	
Equivalence voiture	94 000 km		41 000 km	

8. Conclusion

Après cinq années de développement, la paroi AD/OC est aujourd'hui un procédé mature permettant de supprimer des défauts inhérents à l'utilisation de béton projeté, tels que surconsommation de matière première et empreinte carbone élevée, accidentologie et maîtrise de la qualité d'exécution. Cette innovation marque un progrès important dans la gestion du drainage, protégeant davantage l'ouvrage de sinistres liés aux venues d'eau. Enfin, la paroi AD/OC est susceptible de donner accès à la mesure des efforts appliqués au parement, donc de conduire à améliorer les règles de calcul des parements de parois clouées.

Remerciements

GTS remercie les organismes ayant contribué à la réussite de ce projet : OSEO, INDURA et les entreprises Plattard, Lagarrigue, Topographie Mire, Carrière CBE de Rives et Bureau technique ETL.

Références bibliographiques

Recommandations CLOUTERRE - 1991, Presses de l'ENPC, ISBN 2-85978, 302p.

Additif 2002 aux recommandations Clouterre 1991, Presses de l'ENPC, 218p.

Norme NF P 94-270, juillet 2009, Calcul géotechnique, Ouvrages de soutènement, remblais renforcés et massifs en sol cloué, Association Française de Normalisation (AFNOR).

Guide des facteurs d'émissions (2007), Bilan carbone entreprises et collectivités, ADEME, 240p.

Altazin C., Forgeot A., Robit P., Valldosera L. (2010) Parois Clouées Préfabriquées GTS, JNGG2010, pp. 901-908.

Delmas, P., Berche, J.C., Cartier, G., Abdelhedi, A. (1986), Une nouvelle méthode de dimensionnement du clouage des pentes: programme PROSPER, Bull. liaison Labo. P. et Ch. - 141, pp. 57-66.

Gigan, J.P., Delmas, P. (1987), Mobilisation des efforts dans les ouvrages cloués - Etude comparative de différentes méthodes de calcul, Bull. liaison Labo. P. et Ch. - 147, pp. 49-58.

Philipponat, G., Hubert, B. (1997), Fondations et ouvrages en terre, 4ème édition, Eyrolles, 576p.