

VALORISATION DE LA PAROI AU COULIS PROVISOIRE DE LA PART DIEU CINQUANTE ANS APRES SA CONSTRUCTION

VALUATION OF THE DIAPHRAGM WALL OF THE PART DIEU FIFTY YEARS AFTER ITS CONSTRUCTION

P. CAZES^{1*}, R. KASTNER², C. JUSTINO³, L. BRIANÇON², C. POINCLOU⁴

¹ Antea Group, Rillieux la Pape, France

² Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Villeurbanne, France

³ Soletanche Bachy France, Rueil Malmaison, France

⁴ Antea Group, Orléans, France

RÉSUMÉ – En 2018, les travaux d'extension du Centre Commercial Part Dieu à Lyon ont conduit à réutiliser une paroi au coulis ciment/bentonite provisoire réalisée dans les années 70 pour maîtriser les contraintes hydrogéologiques. Le présent article décrit cette paroi et le diagnostic qui en a été fait et s'interroge sur l'évolutivité de ce type d'ouvrage.

ABSTRACT – In 2018, work to extend the Part Dieu shopping center in Lyon led to the reuse of a temporary diaphragm wall with cement / bentonite grout made in the 1970s to overcome hydrogeological constraints. This article describes this diaphragm wall and the studies that was made and questions the scalability of this kind of structure.

1. Introduction

La réutilisation d'ouvrages géotechniques abandonnés dont le rôle était uniquement provisoire et donc dimensionné pour une durée limitée peut poser question. Plusieurs parois au coulis furent utilisées dans les années 70 sur la zone Lyonnaise pour assécher des fouilles en vue de la construction d'infrastructures. La réutilisation de l'une d'entre elles fut un challenge au regard de la connaissance très parcellaires de ces ouvrages et des risques induits par une éventuelle défaillance. Une réflexion fut alors menée pour tester et valider leur fonctionnement et analyser leur vieillissement. Afin de disposer d'une analyse croisée des caractéristiques du coulis de la paroi, les laboratoires d'AnteaGroup, de l'INSA de Lyon et de Soletanche-Bachy ont été sollicités.

2. Historique

2.1. Rappel des travaux de années 70

En 1972, dans le cadre de l'aménagement du quartier de la Part Dieu à Lyon, les SERL/SEMALY lançaient une consultation pour l'exécution d'une enceinte étanche destinée à maîtriser les contraintes hydrogéologiques pour la construction des trémies des rues Bonnel, au nord, Servient au sud et la trémie longeant le boulevard Vivier-Merle, à l'Est, ainsi que la station et une partie du tunnel du métropolitain. Cet ouvrage s'inscrivait dans le cadre d'une mutualisation des besoins en termes de rabattement de nappe entre ces différents ouvrages. La solution retenue consistait à construire une enceinte générale en paroi moulée dans le sol, ancrée dans le substratum molassique.

Réalisé par SOLETANCHE en 1973, le voile d'étanchéité constitué en argile ciment dit « plastique » présentait alors un périmètre de 980 m, recoupait les alluvions du Rhône sur environ 15 m et s'ancrait dans la molasse sur 3 m. Il s'agissait de mettre hors d'eau une

emprise de 60 000 m². Il permettait un rabattement jusqu'à 8,5 m pour des débits de pompage de l'ordre de 1000 m³/h.

A usage provisoire, son utilisation fut limitée dans le temps et son existence fut partiellement oublié.

Lors de l'exhaure de cette fouille, exceptionnelle à Lyon à cette époque, la SEMALY confia à l'INSA la mesure et le suivi des débits de pompage en relation avec l'évolution des rabattements. L'analyse de ces résultats a permis notamment une première évaluation de la perméabilité en grand du substratum molassique.

2.2. Rappel des travaux de la tour OXYGENE et du centre commercial PART DIEU

En 2007, une caractérisation par pompage de l'enceinte fut à nouveau réalisée pour évaluer l'efficacité de l'ouvrage dans le cadre de la construction de la tour OXYGENE. Bien que toujours efficace, le nombre de sous-sol à réaliser ne permettait pas la réutilisation de l'enceinte et une nouvelle paroi moulée fut réalisée pour répondre aux besoins de rabattement et de soutènement.

En 2018, le Centre Commercial de la Part Dieu souhaita se rénover et s'étendre vers l'ouest en lieu et place de l'ancien parking 3000 situé au pied de la tour Part Dieu. Les caractéristiques du projet conduisaient à exécuter des ouvrages sous le niveau de nappe et donc à procéder préalablement à son rabattement. Afin d'obtenir des débits de pompage réalistes et de maîtriser les impacts sur les environnants, il était exclu de procéder à un pompage pleine fouille sans mesure de protection.

La géométrie du futur projet venait alors s'inscrire à près de 90% dans le périmètre protégé par la grande enceinte ce qui conduisit à envisager sa réutilisation plutôt que de procéder à l'exécution d'un nouvel ouvrage. Dès lors une nouvelle campagne de caractérisation fut menée avec notamment l'exécution d'un pompage en grand.

Entre 2018 et 2019, les pompages associés à l'enceinte générale qui fut étendue ponctuellement au sud-ouest par un réseau de pieux séquents associé à un bouchon injecté permirent de réaliser les infrastructures de l'extension du centre commercial au sec avec des niveaux de débits inférieurs à 250 m³/h.



Figure 1. Photographie de la paroi au coulis lors du terrassement en 2017

3. Essais en grand

3.1. Mesures réalisées en 1974 pour l'aménagement du site de la Part-Dieu

Début 1974, le rabattement de la nappe au sein de l'enceinte générale, a été effectué à l'aide d'un dispositif de 7 puits et suivi par un réseau de 6 piézomètres à l'intérieur de l'enceinte et 4 piézomètres à l'extérieur. L'analyse de l'évolution du débit et du rabattement, qui a atteint 7.5 m pour un débit de 1000 m³/h (Kastner, 1974) a permis de confirmer les ordres de grandeur de la perméabilité en grand de la molasse déduite de l'exhaure du tronçon de métro en paroi préfabriquée. La perméabilité équivalente de la molasse déduite de ce suivi est de 3 à 4.10⁻⁵ m/s, sans qu'il soit possible d'en préciser le degré d'anisotropie, qui pourrait être compris entre 3 et 10. Cette analyse a par ailleurs mis en évidence une fuite de l'ordre de 10% du débit total, située à l'interface de la paroi avec les parois du métro.

3.2. Essai de 2007

Réalisé entre le 13 février et le 23 février 2007, un pompage d'essai longue durée fut mené avec un débit constant de 184 m³/h et suivi au moyen d'un réseau de 8 piézomètres. Le rabattement constaté à l'intérieur de l'enceinte atteignait 1,11 m à 37 m du puits et à 1,19 m à 190 m du puits dans l'enceinte générale. Les piézomètres disposés à l'extérieur de l'enceinte ne subissaient que très peu de variation au cours de l'essai.

3.3. Essai de 2017

Un pompage d'essai a été mené entre le 4 avril 2017 et le 3 mai 2017 (incluant les phases de développement, pompage et suivi piézométrique post-pompage). Il avait pour objectif de tester d'une part l'enceinte générale en paroi moulée ceinturant le centre commercial et les tunnels Brotteaux-Servient et Bonnel ainsi que le Parc 3000 et d'autre part d'estimer le rabattement généré par un pompage de 200 m³/h à l'intérieur de cette enceinte.

Dans le cadre de cette opération, un puits a été réalisé et un réseau de piézomètres a été équipé d'enregistreurs. Les ouvrages sont implantés suivant la figure 2.

Après équipement du forage et des piézomètres, l'ouvrage a été développé par pompage, de manière à optimiser son efficacité. Des pompes d'essais ont été ensuite réalisés avec suivi des niveaux d'eau lors de la descente et de la remontée.

Le programme de pompage longue durée a été le suivant :

- Pompage d'essai longue durée pendant 118 heures à 200 m³/h (à noter que préalablement à ce pompage 2 essais ont été interrompus suite à une panne survenue sur le compteur de débit). Lors de chacun de ces événements, la remontée a été attendue avant de relancer l'essai.
- Suivi de la remontée pendant 40 heures. Le pompage longue durée ainsi que la remontée sont présentés sur la figure 3.

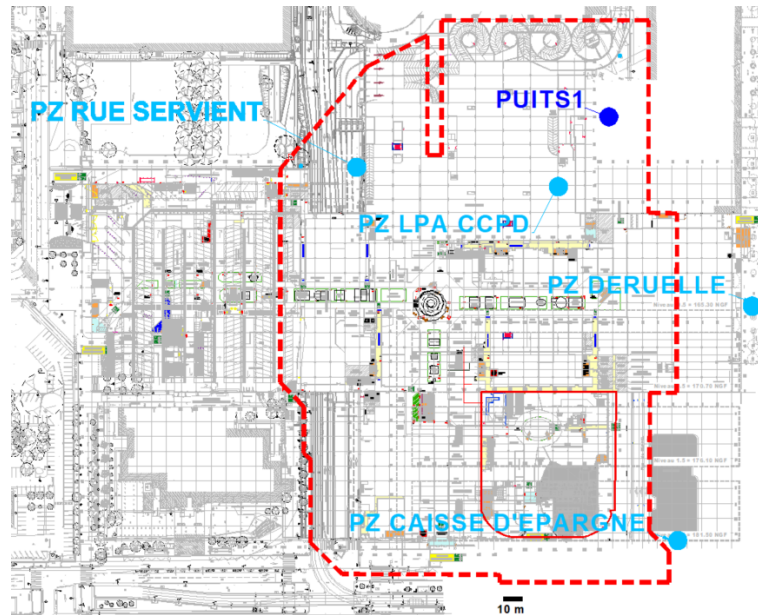


Figure 2. Implantation des puits et du réseau de piézomètres de suivi

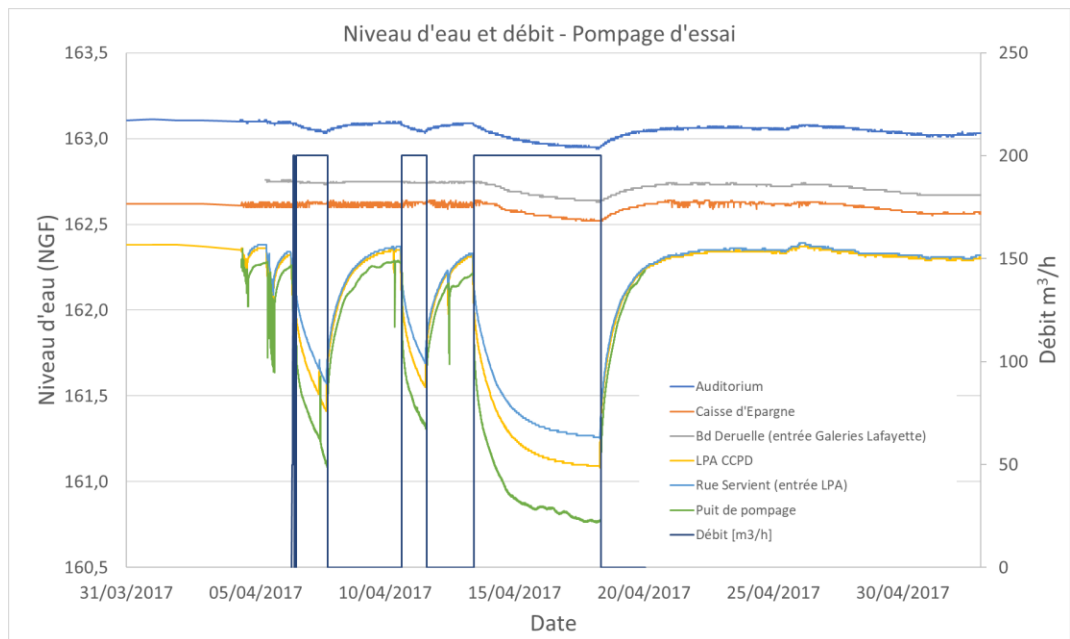


Figure 3. Graphe des débits et du suivi piézométrique dans le temps lors des différentes opérations de pompage d'essai

L'essai met alors en évidence les points suivants :

- Les mesures montrent qu'un pompage de $200 \text{ m}^3/\text{h}$ permet de rabattre le niveau de la nappe d'au moins $1,10 \text{ m}$ en situation quasi-stabilisée et avec une valeur moyenne de rabattement de $1,15 \text{ m}$ sur l'ensemble de la fouille. Ce résultat confirme bien l'impact de la paroi moulée de l'enceinte générale sur le fonctionnement hydrogéologique de la zone ;
- L'ouvrage permet d'obtenir un niveau d'efficacité de $173 \text{ m}^3/\text{h}$ par mètre de rabattement
- Le niveau de nappe est sensiblement inférieur dans l'enceinte générale à ce qui est constaté à l'extérieur (niveau d'eau inférieur de 20 à 45 cm à l'intérieur de l'enceinte sans doute lié au pompage au droit du Cour OXYGENE).

- L'impact à l'extérieur de la fouille d'un rabattement de 1,1 m dans l'enceinte se traduit par un abaissement de 10 cm. A noter que cet effet est plus marqué au droit de l'auditorium (zone de réinjection des eaux issues du Cour OXYGENE) car le pompage doit « soulager » le dispositif de rabattement d'OXYGENE et donc réduire légèrement les débits réinjectés.

4. Essais en laboratoire

Des analyses chimiques, hydrauliques et mécaniques ont été menées sur des prélèvements réalisés par carottage (Figure 4) sur toute la hauteur de la paroi au coulis dans la zone ouest.



Figure 4. Photographie de prélèvement sous gaine (13,65 m à 15,15 m).

4.1. Analyse chimique

Les mesures réalisées sur le coulis de l'époque n'ayant pas été conservé, il n'est pas possible de préciser la composition exacte du matériau lors de sa mise en œuvre.

Le CCTP fournit néanmoins des compositions de coulis qui devaient être comprises entre les deux formulations présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Composition des coulis suivant CCTP de 1972

	Coulis n°1	Coulis n°2
Ciment CLK 325	30 %	20 %
Bentonite type G2	3,6 %	4,5 %
Eau	66,4 %	75,5 %
Densité	1,28	1,19

Il était en outre précisé que le C/E = 0,10 à 0,15 et le C/B = 3 à 5.

En 2019, Une analyse par diffraction des rayons X permet de remonter à la composition du coulis sur 3 échantillons (Tableaux 2 et 3).

Tableau 2. Pourcentages des différentes phases présentes identifiées sur poudre de roche totale

Echantillon / Prof. (m)	Phases minéralogiques							Total en %
	Quartz	Calcite	Ettringite	Mrx Argileux	Goethite /Fsp	Mrx C.	HK2 NO6 S2	
0,00 à 0,75	4,8	25,8	46,0	13,7	4,0	3,8	1,9	100
0,00 à 0,75	1,8	26,1	28,1	32,8	4,5	4,6	2,1	100
6,15 à 6,90	23,3	48,1	7,3	17,7		3,2	0,4	100
13,6 à 14,4	28,9	19,5	2,4	26,5	Fsp 21,6	1	0,1	100

Tableau 3. Pourcentages des différentes phases présentes identifiées sur lame orientée

Echantillon / Prof. (m)	Phases minéralogiques								Total en %
	Calcite	Ettringite	Goethite	Mr x C.	HK2N O6S2	Muscovite	Chlorite	Montmorillonite	
0,00 à 0,75	64,7	6,5	5,8	5,6	4,9	10,0		2,5	100
13,6 à 14,4	62,6	5,3		2,6	0,3	21,2	6,5	1,5	100

Par ailleurs, des mesures de teneur eau complètent l'analyse (Tableau 4).

Tableau 4. Teneur en eau

Echantillon / Prof. (m)	W (%)	Densité	Porosité
0,00 à 0,75	270 à 345 %	1,13 à 1,21	
1,50 à 3,00		1,17 à 1,25	81,6 à 88,7 %
4,70 à 6,15		1,25 à 1,39	84,6 %
6,15 à 6,90	114 à 127 %	1,25 à 1,45	
9,20 à 10,7		1,32 à 1,35	76,8 %
13,6 à 14,4	61 à 69 %	1,41 à 1,72	

On notera une variabilité des compositions avec la profondeur. Les teneurs en eau varient fortement avec une diminution en profondeur. Cette observation peut s'expliquer par le principe constructif d'un écran étanche au coulis bentonite ciment. Le coulis de composition calibrée en production est utilisé comme fluide de forage et celui-ci se charge en particule de sols au fur et à mesure du forage. En fin d'excavation, le mélange fluide reste statique avant sa prise, durant cette phase une ségrégation des particules de sols et ciment peut avoir lieu, de même qu'un phénomène de filtration du coulis dans le terrain plus ou moins intense en fonction de la profondeur. La présence de Quartz en partie basse illustre ce phénomène.

En fin, les proportions d'ettringite + calcite comparées aux proportions de matériaux argileux sont dans un rapport de 1 à 5 ce qui témoigne d'une homogénéité variable du mélange.

Les densités sèches moyennes sont conformes aux prescriptions du CCTP avec toutefois une grande variabilité suivant la profondeur (Figure 5).

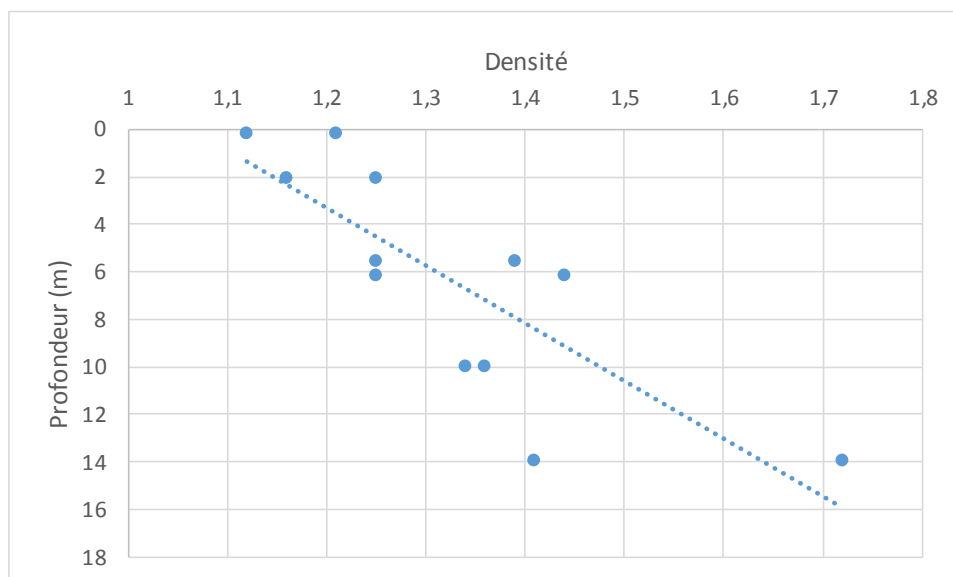


Figure 5. Evolution de la densité avec la profondeur

4.2. Perméabilité

Des mesures de perméabilités verticales à l'appareil triaxial en régime permanent ont été réalisées à plusieurs profondeurs. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 5.

Tableau 5. Perméabilités mesurées

Echantillon / Prof. (m)	Kv (m.s ⁻¹)
0,00 à 0,75	2,3 10 ⁻⁸
1,50 à 3,00	2,4 10 ⁻⁸ - 4 10 ⁻⁹
4,70 à 6,15	8,3 10 ⁻⁷
6,15 à 6,90	4,8 10 ⁻⁹
9,20 à 10,7	7,4 10 ⁻⁹
13,6 à 14,4	1,8 10 ⁻¹⁰

On constate une diminution de la perméabilité avec la profondeur. Ce résultat peut s'expliquer en partie par une densité sèche avec des composantes ciment, bentonite et l'incorporation d'alluvions plus élevée. Sur la base de l'expérience de Soletanche, on peut indiquer que le coulis décrit au CCTP possède en laboratoire une perméabilité inférieure à 10⁻⁸ m/s ; ce qui est cohérent avec les mesures réalisées sur des échantillons prélevés in situ.

4.3. Résistance mécanique

Comme pour la composition, les mesures réalisées sur le coulis de l'époque n'ont pas été conservées. Seul, le CCTP fournit des valeurs « objectifs » attendues (Tableau 6).

Tableau 6. Rc des coulis suivant CCTP de 1972

	Coulis n°1	Coulis n°2
Résistance à la compression	6 bars (7 jours)	3 bars (28 jours)

Les essais géomécaniques réalisés sur échantillon montrent une grande hétérogénéité (Tableau 7). Les caractéristiques de résistance en cisaillement rectiligne à la boîte montrent des cohésions et des angles de frottement moyens à très élevés. Les résistances à la compression restent conformes à ce qui était attendu lors de l'exécution.

Tableau 7. Résultats des essais des coulis suivant CCTP de 1972

Echantillon / Prof. (m)	Rc (MPa)	C _p (kPa)	φ _p (°)	C _f (kPa)	φ _f (°)
0,00 - 0,75		122	30	31	37
1,50 - 3	0,53 - 0,92	115 - 125	28,5 - 48,5		
4,7 - 6,15	0,14 - 0,48				
6,15 - 6,90		21	50	22	49
9,2 - 10,7	0,51 - 0,56				
13,65 - 14,40		284	33	263	18

5. Analyse

Globalement la paroi au coulis semble présenter une bonne stabilité chimique, hydraulique et mécanique sur une période de 45 ans. On note ainsi :

- Les valeurs de perméabilité restent faibles (globalement inférieures à 5 10⁻⁸ m/s) ;
- Les résistances élevées (Rc > 100 kPa) ;
- d'un point de vue chimique, les résultats montrent une grande variabilité mais avec une moyenne proche des exigences de l'époque.

Dans son ensemble, l'enceinte générale de la Part Dieu a été préservée et ne semble pas avoir été impactée par des désordres importants. En comparaison avec les résultats

de 1970 et 2007, l'efficacité du dispositif semble toutefois présenter une très légère dégradation. Les trois mesures réalisées tendent à montrer une évolution linéaire (Figure 6). Cette dégradation est néanmoins à relativiser au regard de la précision des mesures et du rajout de l'enceinte de la tour oxygène qui a pu perturber les mesures. L'origine exact de cette évolution reste mal définie. Comme le montrent les mesures de perméabilité sur échantillon qui fournissent des valeurs globalement faibles, une telle évolution ne semble pas être liée à une dégradation de l'efficacité du coulis. De la même façon, il semble peu probable que l'origine soit à rechercher dans une évolution des perméabilités de la molasse qui n'a pas été sollicitée au-delà du chantier des années 70 (excepté au droit de la tour Oxygène). La possibilité que des défauts dans la structure de l'ouvrage soient apparus au grès des constructions et travaux menés à son voisinage est sans doute une explication (fissuration, forage...).

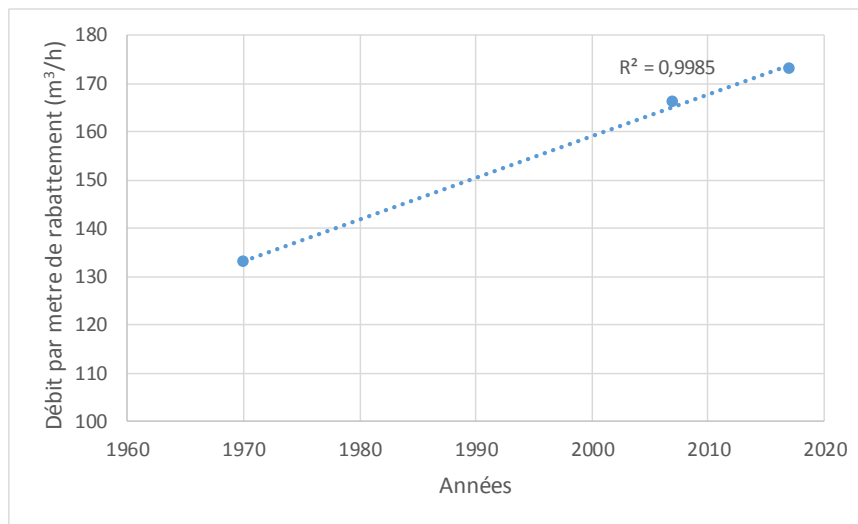


Figure 6. Courbe d'évolution des débits dans le temps

6. Conclusions et perspectives

Le chantier d'extension du Centre Commercial Part Dieu est un bon exemple de réutilisation avec succès d'un ouvrage provisoire de plus de 50 ans. La paroi au coulis fichée dans la molasse a parfaitement joué son rôle et a permis le rabattement de nappe avec des conditions de débit satisfaisant. Bien qu'une évolution de l'enceinte dans son ensemble ne soit pas à exclure, les perméabilités mesurées sur échantillon tendent à montrer que le coulis présente toujours des caractéristiques satisfaisantes.

Au travers du chantier du centre commercial Part Dieu, il a pu être montré que moyennant un diagnostic préalable de l'ouvrage, la réutilisation d'une enceinte constituée par une paroi au coulis était possible avec des niveaux de sécurité satisfaisant. Pour le maître d'ouvrage, la valorisation d'un tel ouvrage a ainsi présenté un intérêt en terme économique et environnementale non négligeable. Ce retour d'expérience ouvre ainsi des perspectives intéressantes sur l'opportunité de réutilisation d'anciennes parois au coulis.

7. Références bibliographiques

- KASTNER. (1974). Mise hors d'eau des fouilles à l'abri d'écrans étanches comparaison des débits théoriques et expérimentaux – Thèse
- Kérisel J., Ferrand J., Laréal P., Clément F. (1972). Mesures de poussée et butée faites avec 42 paires de butons asservis. Proceedings, European Conference of Soil Mechanics, vol. 1, pp. 265-273, Madrid 1972