

Etude du ressuage des bétons de parois moulées à l'aide d'un essai œdométrique : validation sur une colonne

Abdul Rahman EL ZEIN^{1,2}

¹ Univ. Artois, ULR 4515 - LGCgE, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, F-62400 Béthune, France

² Botte Fondations, ZAC du Petit le Roy, 5 rue Ernest Flammarion, Chevilly-Larue, 94659 Rungis Cedex, France

RESUME

Les parois moulées sont des ouvrages de fondations profondes en béton armé. Elles sont utilisées pour la réalisation de nombreux ouvrages situés dans des sites et des conditions géotechniques très variées (station souterraine, barrage, parking ...). Malgré le respect des règles normatives pour la confection du béton, des pathologies liées au ressuage sont observées. La capacité de rétention d'eau d'un béton de fondation est déterminée à partir des essais spécifiques comme le ressuage statique selon la norme ASTM C232 ou selon l'essai 'Bauer' de filtration sous pression. Ces essais permettent de quantifier le taux de ressuage mais n'apportent pas suffisamment d'éléments de compréhension vis-à-vis des mécanismes liés à la formation des cheminées de remontée d'eau. Une nouvelle approche est proposée, issue de la mécanique des sols, à partir de la théorie de la consolidation unidimensionnelle primaire de Terzaghi. Un nouvel essai basé sur l'essai œdométrique utilisé en mécanique des sols est adapté au cas des bétons. Afin d'étudier l'influence de la vitesse du coulage d'une paroi moulée sur le ressuage des bétons, deux formulations de bétons N1 et N2 avec différents rapports E/C sont étudiées. Les résultats ont permis de montrer que l'essai œdométrique permet de reproduire le phénomène de ressuage dans une paroi moulée.

Mots-clefs

Parois moulées, Ressuage, Postulat de Terzaghi, Essai œdométrique, Coefficient de consolidation.

I. INTRODUCTION

La réalisation des ouvrages de génie civil nécessite des fondations profondes qui doivent s'adapter aux différentes formes et dimensions. L'une de ces fondations profondes correspond aux parois moulées. Celles-ci sont réalisées sous forme d'éléments unitaires appelés panneaux. Les panneaux sont excavés dans le sol à l'aide d'une benne sous boue bentonite. La boue a un rôle important de maintien du sol afin d'éviter tout éboulement lors du forage ou du bétonnage. Une pellicule fine de

bentonite plastique et très peu perméable appelée 'cake' se forme entre le sol et la paroi. Les parois moulées ont des hauteurs élevées qui peuvent atteindre 80 m (cas du chantier du grand Paris). Le béton utilisé doit présenter une fluidité suffisante pour être coulé sans vibration dans les parois. Cependant, l'augmentation de la fluidité des bétons de fondations profondes s'accompagne d'une augmentation du risque de ressuage et/ou d'une ségrégation des constituants du béton, ce qui se traduit par des cheminées de remontée d'eau qui sont l'une des pathologies les plus observées sur les parois moulées. Ces cheminées se traduisent par une migration de l'eau dans le béton et à l'interface béton/sol. La pression du béton qui est soumis à son poids propre dans une paroi de grande hauteur, favorise la création des canaux longitudinaux le long de la paroi moulée. A l'état frais du béton, ces canaux se forment à l'interface paroi/sol lorsque le terrain est imperméable, contribuant ainsi aux cheminées de remontées d'eau (Djelal et al., 2020).

Afin de limiter le phénomène du ressuage lié aux cheminées de remontée d'eau, les parois moulées doivent satisfaire aux exigences de la norme européenne NF EN 206/CN et de la norme française NF EN 1538. Ces normes exigent l'utilisation d'un CEM II ou CEM III avec une surface Blaine $\geq 3800 \text{ cm}^2/\text{g}$ et un teneur $\geq 325 \text{ kg}/\text{m}^3$. La teneur en fines ($D \leq 125 \mu\text{m}$) doit être $\geq 400 \text{ kg}/\text{m}^3$ et l'étalement du béton à la table à chocs doit être compris entre 650 et 550 mm lors de sa mise en œuvre dans les parois moulées. Malgré ces exigences, des pathologies liées essentiellement au ressuage du béton sont observées sur les parois moulées.

Afin de contrôler le phénomène de ressuage, les deux essais utilisés couramment sur chantier sont l'essai de ressuage statique selon la norme ASTM C 232 et l'essai de ressuage forcé (filtre presse Bauer) pour simuler les pressions rencontrées dans les parois moulées. Des recommandations apportées par l'EFFC exigent une vitesse de ressuage inférieure à 0,1 ml/min pendant les deux premières heures après le début du ressuage (EFFC/DFI, 2018). Pour le filtre presse Bauer, il est recommandé de limiter la quantité d'eau ressuée à 5 minutes sous une pression de 5 bars à 22 ml. Cependant, des études précédentes (Azzi, 2017; Massoussi, 2017) ont démontré que malgré ces recommandations, des pathologies liées essentiellement au ressuage du béton sont observées sur chantier. Ces études ont souligné le fait que l'essai de filtration Bauer ne permet pas de reproduire le phénomène de ressuage dans une paroi moulée. Le gradient de pression de l'essai Bauer est très loin de celui de la réalité. L'évolution de la microstructure dans le temps est également difficile à appréhender avec cet appareil. Pour l'essai de ressuage statique, la remontée d'eau s'opère sous l'effet du poids propre du béton dans une cuve de 25 cm de hauteur. Le ressuage peut être mesuré au cours du temps mais ne reflète pas celui auquel le béton sous pression dans une paroi moulée peut être soumis. Afin de mieux comprendre les mécanismes s'opérant dans le béton lors de sa mise en œuvre dans les parois moulées, un nouvel essai basé sur l'essai œdométrique utilisé en mécanique des sols a été mis au point (El Zein et al., 2021). L'essai permet d'étudier la consolidation des bétons soumis à un chargement donné et d'étudier l'écoulement de l'eau dans le béton en fonction du temps/chargement. Les résultats ont permis de valider la théorie de Terzaghi (Terzaghi K and Fröhlich O.K., 1939) pour les bétons. Une simulation numérique pour prédire l'écoulement de l'eau a également été validée (El Zein et al., 2021). Selon ces travaux, l'écoulement de l'eau dans le béton, qui est à l'origine des cheminées de remontée d'eau, dépend de la vitesse du coulage des parois moulées. L'objectif de cette étude est d'étudier l'effet du temps de coulage d'une paroi sur le ressuage à partir d'un essai œdométrique. Deux formulations de bétons avec des rapports E/C de

0,44 et 0,49 sont étudiées. Les essais œdométriques ont été comparés avec un essai statique sur une colonne de 150 cm de hauteur (hauteur plus élevée que celle de l'essai de ressuage statique) équivalente à une contrainte de 35 kPa. L'étude comparative est réalisée à partir du coefficient de consolidation c_v proposé par la théorie de Terzaghi.

II. MATERIAUX ET PROCEDURE DE MALAXAGE

Les deux bétons utilisés dans cette étude ont été étudiés par une entreprise de génie civil (Holder T. et al., 2019) dans le cadre d'une étude menée par le Comité Sol de la FNTP. Le béton N1 est considéré comme béton de référence répondant aux spécifications habituellement admises pour une mise en œuvre en paroi moulée avec un maintien d'ouvrabilité de plus de 5 heures. Le béton N2 représente la composition du béton N1 dégradé par l'ajout d'un équivalent de 20 L/m³ d'eau efficace afin d'imposer au béton un ressuage. Le tableau 1 présente les deux formulations étudiées.

TABLEAU 1. Formulations des bétons

Constituants	Béton N1	Béton N2
Sablon 0/1 (kg/m ³)	190	195
Sable 0/4 (kg/m ³)	690	680
Gravillon 4/20 (kg/m ³)	930	915
Ciment CEM III/A 52,5 (kg/m ³)	385	385
Superplastifiant (%/masse de ciment)	1,10	0,40
Retardateur de prise (%/masse de ciment)	0,20	0,40
Eau efficace (kg/m ³)	168	188
Rapport E_{eff}/C	0,44	0,49
G/S	1,06	1,05
Teneur en fines inférieures à 125 μm (kg/m ³)	530	528

Le ciment CEM III/A 52,5 utilisé est adapté aux fondations profondes selon la norme européenne EN 206:2013 + A2:2021. La surface Blaine du ciment est égale à 4150 cm²/g > 3800 cm²/g selon la norme NF EN 1538. Un sable concassé de classe granulaire 0/4 ayant une densité de 2,62 et un coefficient d'absorption de 0,3% est utilisé. Afin de respecter les recommandations au niveau de la quantité minimale de fines (≥ 400 kg/m³), un sablon roulé de classe granulaire 0/1 est incorporé dans les bétons. Le sablon a une densité de 2,65 et un coefficient d'absorption de 0,2%. Des gravillons concassés de la classe granulaire 4/20 et ayant une densité de 2,57 sont utilisés. Un adjuvant est ajouté dans les deux formulations étudiées. Il s'agit d'un superplastifiant réducteur d'eau à base de polymères modifiés, avec une densité de 1,12 et un extrait sec de 38,5%. Grâce à sa structure moléculaire spécifique, ce superplastifiant permet d'obtenir des bétons cohésifs, faciles à mettre en place et avec un long maintien d'ouvrabilité sans effet préjudiciable sur les performances mécaniques à jeune âge. Afin de s'assurer que le temps de prise du béton est suffisant pour couler la paroi moulée, un retardateur de prise de densité 1,06 et d'extrait sec de 15% est utilisé. La proportion des adjuvants est ajustée pour les deux formulations afin d'obtenir un étalement à la table à choc BS EN 12350-12 :2010 de 600 ± 50 mm à 30 minutes d'âge (au moment de la réalisation des principaux essais). Le dosage du retardateur de prise est augmenté pour le béton N2 afin de maintenir le temps d'ouvrabilité à 5 heures.

III. L'ŒDOMÈTRE A BETON

L'essai œdométrique est utilisé en mécanique des sols afin de définir les paramètres de consolidation et de compressibilité des échantillons. Il permet de simuler le tassement et le drainage unidimensionnel d'un sol en fonction du chargement. L'essai consiste à imposer au sol des chargements successifs où seulement les déplacements verticaux sont permis, afin d'évaluer la déformation verticale et caractériser ensuite le comportement du matériau en compression unidirectionnelle. Afin de transposer cet essai aux bétons, la hauteur de la cellule œdométrique doit être grande vis-à-vis de la dimension des grains pour une répartition homogène des charges. De même, le diamètre de la cellule doit être grand vis-à-vis de sa hauteur pour négliger l'effet du frottement des parois latérales (Costet J., 1983). La cellule du perméamètre à charge variable (Fig 1. (a)) répondant à la norme ISO 17892-11 ($h=10\text{ cm}$, $D=15\text{ cm}$) a été retenue pour l'étude sur les bétons en raison de ses dimensions répondant aux conditions énoncées. Le drainage s'effectue en partie supérieure de la cellule par une plaque métallique perforée qui permet également de transmettre la charge au béton (Fig 1. (b)). La surpression interstitielle due à la charge est mesurée en fonction du temps à l'aide d'un capteur de pression interstitielle situé sous la plaque métallique perforée de la partie inférieure de la cellule. Deux papiers filtres sont disposés sur les plaques drainantes afin d'éviter le départ de particules fines durant l'essai. La cellule est formée d'une paroi verticale rigide afin d'éviter les déplacements horizontaux (cas unidimensionnel). Pour appliquer les chargements désirés, la cellule est disposée sur une presse de compression (Fig 2). Les capteurs de force et de déplacement de la presse sont reliés à un logiciel afin d'obtenir les déplacements verticaux (tassement de l'échantillon) en fonction du temps.

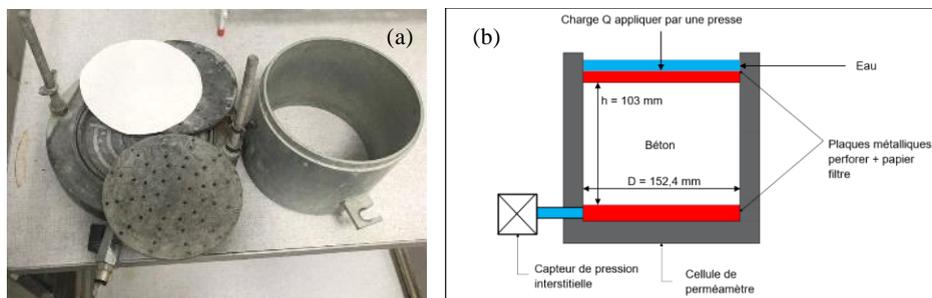


FIGURE 1. Cellule œdométrique adaptée au béton : (a) Cellule issue de l'essai au perméamètre à charge variable ; (b) Représentation schématique du dispositif

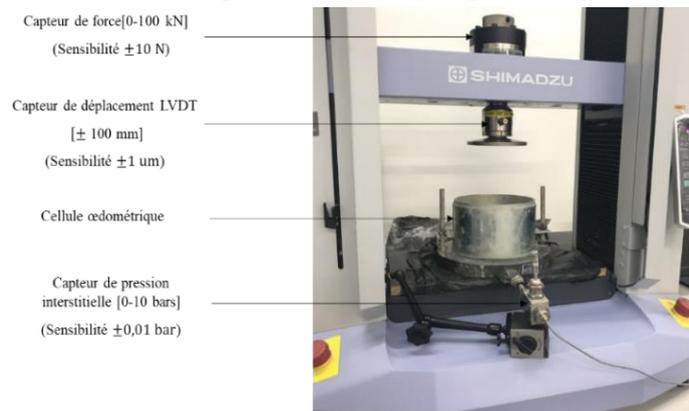


FIGURE 2. Œdomètre à béton

La mise en place du béton dans la cellule s'effectue sans piquage et sans vibration. Les chargements ont été appliqués selon deux types :

Les chargements directs : l'application de la charge doit se faire le plus rapidement possible de manière à obtenir σ_z (la contrainte appliquée) = U (la pression interstitielle de l'eau) au début du chargement selon la théorie de Terzaghi.

Les chargements par paliers : la vitesse du chargement est égale à celle de la mise en œuvre du béton dans les colonnes.

Selon la théorie de Terzaghi, la consolidation d'un matériau est étudiée à partir d'un coefficient de consolidation c_v . Ce coefficient est déterminé à partir de la méthode graphique de Casagrande (Casagrande and Fadum, 1940), (El Zein et al., 2021) en utilisant l'équation (1) :

$$C_v = \frac{T_v d^2}{t_{50}} \quad (1)$$

Avec, T_v un facteur de temps égal à 0,197, d (m) la distance de drainage pour chaque colonne et t_{50} le temps pour atteindre 50% de la consolidation.

IV. LES COLONNES DE BETONS

L'objectif de cet essai est d'étudier la consolidation des bétons pour une hauteur plus élevée que celle de l'essai statique proposé par la norme ASTM C232. L'essai a été réalisé sur une colonne (Fig 3. (a)) de 16 cm de diamètre et de 150 cm de hauteur équivalente à une contrainte de 35 kPa.

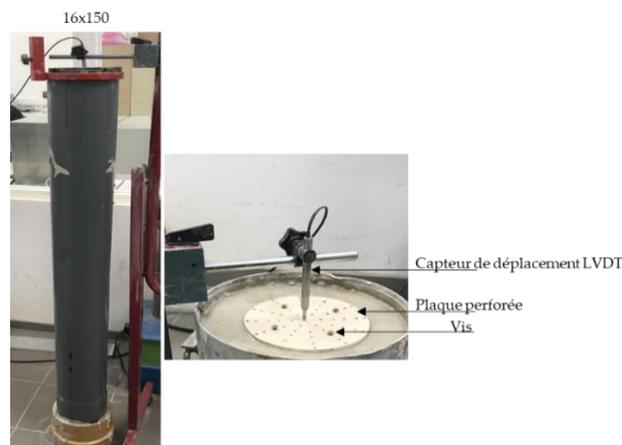


FIGURE 3. (a) La colonne de béton étudiée ; (b) Mesure du tassement du béton

La mise en œuvre du béton s'effectue sans piquage et sans vibration afin d'éviter un état de pré-consolidation et de se rapprocher des conditions de chantier. Le béton est coulé en trois couches successives de 10L chacune. La durée totale du coulage est de 5 minutes. Un capteur de déplacement LVDT est utilisé afin de suivre l'évolution du tassement du béton en fonction du temps. Le capteur de déplacement est placé sur une plaque en polystyrène non absorbant ($D = 10$ cm) afin de pouvoir mesurer le déplacement du béton. La plaque est perforée pour laisser passer l'eau. Elle a une masse négligeable afin d'éviter tout chargement supplémentaire sur le béton. Quatre vis de 3 cm de profondeur ont été utilisées pour solidariser la plaque au béton et avoir un tassement vertical de l'ensemble béton/plaque. (Fig 3. (b)).

V. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. L'œdomètre à béton

La Fig. 4 montre l'évolution de la déformation ($\frac{\Delta h}{h}$) en fonction du temps sous une contrainte de 35 kPa à l'aide de l'essai œdométrique. Δh représente le tassement du béton sous la contrainte appliquée (m) et h étant la hauteur initiale du béton (m). La contrainte est appliquée selon un chargement direct (Fig 4. (a)) et un chargement par paliers reproduisant le coulage du béton dans la colonne de 150 cm (3 paliers de chargement équivalents à 3 couches de béton pendant 5 minutes) (Fig 4. (b)).

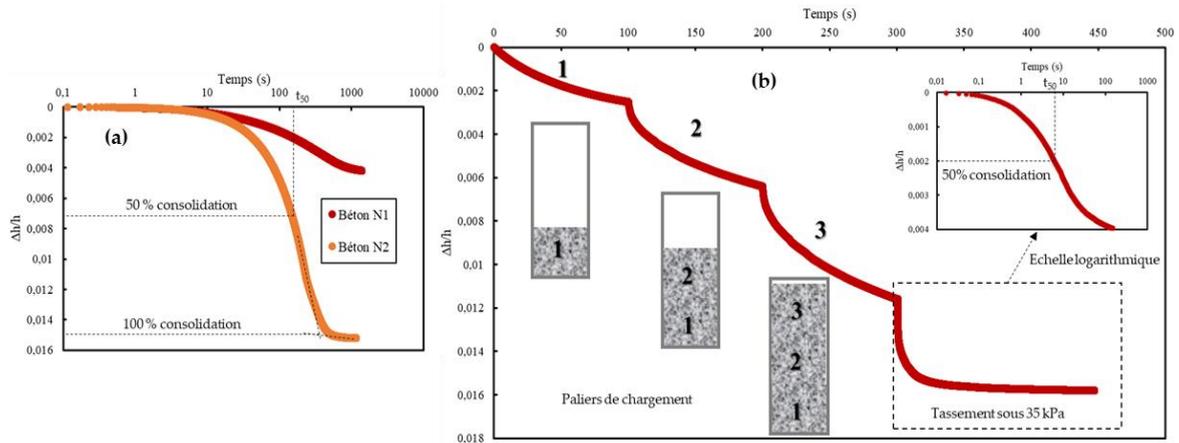


FIGURE 4. Evolution de la déformation en fonction du temps sous une contrainte de 35 kPa (a) chargement direct (b) chargement par paliers (cas du béton N1)

Le coefficient de consolidation est calculé en utilisant l'équation (1). t_{50} (le temps pour atteindre 50% de la consolidation) est déterminé par la méthode graphique de Casagrande. Dans le cas d'un chargement par paliers, le coefficient de consolidation est calculé une fois que la contrainte de 35 kPa est atteinte (Fig 4. (b)). Le tableau 2 illustre les résultats obtenus avec les deux types de chargements appliqués.

TABLEAU 2. Cinétique et amplitude de déformation obtenues par l'essai œdométrique

Formulation	Chargement direct		Chargement par paliers	
	c_v (m ² /min)	$\frac{\Delta h}{h}$	c_v (m ² /min)	$\frac{\Delta h}{h}$
Béton N1	$6,66.10^{-4}$	0,004	$19,8.10^{-4}$	0,004
Béton N2	$7,50.10^{-4}$	0,015	$26,2.10^{-4}$	0,015

Le béton N2 se distingue par une cinétique et une amplitude de déformation très différente de celles du béton N1. Ce qui est expliqué par l'augmentation du rapport E/C. En effet, le dosage en eau est le facteur principal de l'évolution de la vitesse et l'amplitude de ressuage d'un béton. Plus précisément, l'excès d'eau dans la formulation venant de l'augmentation du rapport eau/ciment, peut contribuer à accélérer et augmenter le degré de ressuage (Yim et al., 2013). Dans un écoulement unidirectionnel et une déformation unidimensionnelle, la hauteur d'eau ressuée est égale à l'amplitude de déformation des bétons.

D'autre part, les résultats trouvés montrent clairement que les coefficients de consolidation obtenus par les deux types de chargement appliqués sont très différents. Ce qui signifie que ce coefficient c_v , qui contrôle la cinétique du tassement, dépend de l'histoire du chargement sur le matériau.

B. La colonne de béton

La Fig. 5 représente l'évolution de la déformation en fonction du temps pour les deux bétons étudiés pour une colonne de 150 cm de hauteur. Le coefficient de consolidation c_v est calculé en utilisant l'équation (1). t_{50} est déterminé par la méthode graphique de Casagrande.

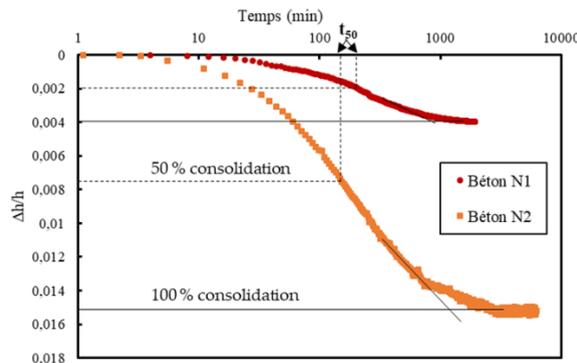


FIGURE 5. Evolution de la déformation en fonction du temps

Les mêmes amplitudes de déformation sont obtenues par les deux essais (colonnes, et œdométrique). Le béton N2 se distingue par un degré de ressuage plus élevé que celui du béton N1 à cause de l'augmentation du rapport E/C. Le tableau 3 résume les différents coefficients de consolidation obtenus par les deux essais (œdométrique et colonne).

TABLEAU 3. Comparaison entre les résultats œdométriques et statiques

Formulation	Le coefficient de consolidation c_v (m^2/min)		
	Chargement direct	Chargement par paliers	Colonne de béton
Béton N1	$6,66.10^{-4}$	$19,8.10^{-4}$	21.10^{-4}
Béton N2	$7,50.10^{-4}$	$26,2.10^{-4}$	28.10^{-4}

Les résultats montrent que le coefficient de consolidation obtenu par l'essai statique (colonne de 150 cm) est similaire à celui de l'essai œdométrique (chargement par paliers). L'essai œdométrique permet de simuler le comportement du béton dans les parois moulées, même pour des hauteurs élevées, à condition de reproduire la même histoire du chargement du béton. En effet, le coefficient de consolidation dépend fortement de l'histoire de chargement appliqué sur le matériau. Le béton subit un tassement durant sa mise en œuvre dans les colonnes induisant une variation dans la cinétique du tassement une fois le coulage terminé. La vitesse du coulage d'une paroi moulée (ou vitesse du chargement) est alors un paramètre affectant la cinétique du ressuage des bétons.

VI. CONCLUSION

Cette étude vise à étudier l'influence du temps de coulage sur le ressuage des bétons à partir de l'essai œdométrique proposé par nos études antérieures. Dans ce but, une procédure d'essai

permettant de reproduire la mise en œuvre du béton dans une paroi est proposée. A partir de l'étude comparative entre l'essai œdométrique et l'essai à la colonne, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. L'essai œdométrique a permis, contrairement à l'essai Bauer utilisé sur chantier, de reproduire le phénomène de ressuage du béton coulé dans une colonne de 1,5 m de hauteur à condition d'appliquer la même histoire du chargement sur le matériau (c.-à-d. de respecter les conditions de la mise en œuvre du béton dans les parois).
2. Le coefficient de consolidation c_v , déterminé à partir de la méthode graphique de Casagrande, semble être le paramètre le plus pertinent pour établir une valeur de stabilité vis-à-vis du ressuage des bétons.
3. Le coefficient de consolidation c_v permet de prendre en compte l'effet du temps de coulage sur le phénomène observé. En effet, les résultats montrent une différence entre la cinétique du ressuage pour un chargement direct (vitesse instantanée) et celle pour un chargement par paliers similaire à la mise en œuvre du béton dans les parois moulées. Des recommandations peuvent être apportées ensuite sur la vitesse du coulage du béton dans les parois moulées pour limiter le phénomène du ressuage observé.

REFERENCES

- Azzi, M.A., 2017. Etude du ressuage des bétons de parois moulées - influence des paramètres de formulation (Thèse de doctorat). Artois.
- Casagrande, A., Fadum, R.E., 1940. Notes on soil testing for engineering purposes.
- Costet J., 1983. La mécanique des sols, tome 1, Dunod.
- Djelal, C., Vanhove, Y., Azzi, A., Madec, O., 2020. Recommendation for concrete mix design to prevent bleed channels on diaphragm walls. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 0, 1–13. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1713900>
- EFFC/DFI, 2018. Guide To Tremie Concrete For Deep Foundations | Deep Foundation |.
- El Zein, A.R., Vanhove, Y., Djelal, C., Madec, O., Gotteland, P., 2021. Evaluation of internal bleeding in concrete foundation from the Terzaghi's effective stress postulate. *Mater Struct* 54, 1–14. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01828-1>
- Holder T., Justino C., Gotteland P., 2019. Lien entre essais de filtration modifiés et ressuage, Soletanche Bachy.
- Massoussi, N., 2017. Ressuage des matériaux cimentaires : origine physique et changement d'échelle (These de doctorat). Paris Est.
- Terzaghi K, Fröhlich O.K., 1939. K. Terzaghi, O.K. Fröhlich, Theorie du tassement des couches argileuses : introduction à la mécanique analytique des argiles, Dunod, 1939.
- Yim, H.J., Kim, J.H., Kwak, H.-G., Kim, J.K., 2013. Evaluation of internal bleeding in concrete using a self-weight bleeding test. *Cement and Concrete Research* 53, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.05.015>