

Influence de la granulométrie du sol sur la formation du cake de filtration des boues de forage

Richard INDOMBE AMBA¹, Nasre-Dine AHFIR¹, Saber IMANZADEH^{1,2}, Abdellah ALEM¹, Tariq OUAHBI¹, Christophe JUSTINO³, Olivier MADEC⁴, Philippe GOTTELAND⁵, Massinissa BENABDELLOUAHED⁵

¹Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, UMR 6294 CNRS, Université Le havre Normandie

²INSA Rouen Normandie, Normandie Univ, LMN UR 3828, F-76000, Rouen, France³Soletanche Bachy, Chemin des Processions, 77130 Montereau Fault Yonne, France

⁴Botte Fondations, ZAC du Petit le Roy, 5 rue Ernest Flammarion, 94659 Chevilly-Larue, Rungis Cedex, France

⁵Fédération Nationale des Travaux Publics, 3 rue de Berri, 75008 Paris, France

RESUME

Les boues de forage jouent un rôle essentiel, notamment dans la construction des ouvrages souterrains tels que les fondations profondes, les écrans de soutènement et les tunnels. Ces fluides complexes sont formulés pour répondre à des exigences techniques précises. Elles sont indispensables pour garantir la stabilité des excavations, évacuer les cuttings, réduire les venues d'eau et refroidir les outils. La formation d'un cake interne et/ou externe, véritable membrane, contribue à la stabilité des parois de tranchées. L'objectif de cette étude est l'évaluation des mécanismes de formation du cake par filtration en fonction de la granulométrie du sol avoisinant. Un dispositif expérimental constitué d'une cellule en acier inoxydable de diamètre 29 cm, hauteur 30 cm, pouvant être pressurisée jusqu'à 300 kPa, a été utilisé pour simuler une filtration frontale de la boue bentonitique dans un milieu granulaire, représentatif d'un sol sableux. Deux sables humides, de granulométrie comprise entre (160 – 1000 µm) et entre (160 – 2000 µm) ont été testés. Une boue bentonitique CM10t de concentration 45 g/L a été injectée sous une pression de 50 kPa. Les résultats obtenus ont montré que la granulométrie du sol est un facteur important dans la formation des deux cakes : interne et externe. Les fluides de forages étant de véritables outils temporaires assurant la stabilité des parois en cours de creusement, avant le bétonnage définitif.

Mots-clefs : Boues de forage, Cake de filtration, Sols, Filtration frontale, Ouvrages BTP.

I. INTRODUCTION

Dans le domaine de la construction des parois moulées, le contrôle de la qualité des boues de forage est un enjeu crucial pour assurer leur stabilité et leur durabilité. Les boues de forage, composées d'un mélange complexe de particules solides et de fluides, jouent un rôle essentiel en évitant l'effondrement des parois des tranchées.

Pendant les opérations d'excavation, comme le précise la norme NF EN 1538+A1 (2015) ainsi que le fascicule 68, il est recommandé de contrôler ce fluide complexe afin d'avoir un cake optimal, fin et étanche. En effet, une accumulation excessive de particules argileuses, formant un cake épais, peut compromettre l'enrobage souhaité. Il est distingué dans les travaux, le cake externe (membrane) et le cake interne caractérisé par une diffusion graduée des particules de bentonite dans la matrice granulaire (Lee et al., 2016).

Les conditions géotechniques du site : granulométrie, porosité, gradient hydraulique, stratigraphie conditionnent la formation du cake. Il est connu qu'un espace poral excessif des sols et la connectivité des pores (Bear, 1972) peut être à l'origine d'importantes pertes de fluides. Les performances structurelles et la qualité finale des parois moulées sont dépendantes de la qualité du cake ainsi formé.

En particulier, les sols à granulométrie fine et uniforme tendent à former des cakes denses et peu perméables, tandis que les sols plus grossiers produisent des cakes plus poreux mais souvent moins stables. Les études antérieures ont montré que la granulométrie influence directement le processus de filtration. Dans les sols très perméables composés de particules grossières, la boue de forage pénètre facilement dans la matrice poreuse, ce qui retarde la formation d'un cake efficace et entraîne des pertes de fluides accrues avant le colmatage (Amanullah et al., 2005).

Cette étude expérimentale financée par le FNTP, cherche à mieux comprendre l'effet de la granulométrie des sols humides ($12\% \leq S_r \leq 14\%$) sur la formation du cake de filtration en utilisant deux techniques : filtration frontale, et par la suite, filtration tangentielle. L'objectif principal de cet article est d'analyser la phase de filtration frontale. Les paramètres suivis sont le volume de filtrat en fonction du temps, l'épaisseur du cake externe et les variations de la teneur en eau dans les sols en fin d'essai. La teneur en bentonite est mesurée en fonction de la profondeur de pénétration du fluide, afin d'estimer la diffusion graduée en fonction de la granulométrie.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Pour étudier l'influence de la granulométrie du sol sur la formation du cake de filtration, des expérimentations en laboratoire ont été menées en utilisant une cellule de filtration en acier inoxydable (Fig. 1) de 29 cm de diamètre, 30 cm de hauteur et 5 mm d'épaisseur.

Deux granulométries de sables ont été utilisées : sable 1 (160 – 1000 μm) et sable 2 (160 – 2000 μm). Les caractéristiques détaillées de ces sables sont présentées dans la Figure 2 et le Tableau 1. Les sables ont été compactés à une teneur en eau de 4 % pour garantir une densité sèche de 1,45 sur toute son épaisseur. La teneur en eau de saturation des sables est de (30 ± 1) %. Les valeurs de conductivité hydraulique (Tableau 1) ont été mesurées expérimentalement à l'aide de l'essai à charge constante.

La bentonite de type CM10t, commercialisée par la société Clariant, préparée à une concentration de 45 g/L, a été utilisée. La contrainte seuil est de 7,2 Pa et la viscosité dynamique de 0,013 Pa.s. Le pH de la boue a été ajusté à $(10 \pm 0,5)$. La préparation a été effectuée à une température constante de (17 ± 1) °C pour une viscosité Marsh de (46 ± 2) secondes. Une eau moyennement dure à dure d'une dureté moyenne de 26°F pour un pH de 7 (Le Havre Seine Métropole, 2023).

Les essais de filtration ont été réalisés sous une pression constante de 50 kPa appliquée à travers la cellule de filtration. Les mesures effectuées incluaient : l'épaisseur du cake de filtration formé, le profil du filtrat en fonction du temps, le profil de la teneur en eau en fonction de la profondeur de filtration, ainsi que le profil de la rétention (masse de boue déposée par unité de masse du filtre, Equation (1)) en fonction de la profondeur de filtration.

$$retention = \frac{Masse\ des\ fines}{Masse\ du\ sable} * 100\ (\%) \quad Equation\ (1)$$

L'épaisseur du cake externe de filtration a été mesurée à l'aide de la X-ray microtomography (μ CT), en utilisant le logiciel ImageJ pour l'analyse des images obtenues. À la fin de chaque essai, un carottage a été réalisé avec des tubes de 1,8 cm de diamètre et 15 cm de long, qui ont ensuite été passés au Tomographe RX pour obtenir des images précises de la structure du cake. La perméabilité du cake externe ainsi que la densité ont été déduites à l'aide des équations (2) et (3). Les mesures de la teneur en eau et de la rétention de la boue ont été effectuées de manière expérimentale, en prélevant des échantillons à différentes profondeurs au sein de la couche de sable.

$$Q = \frac{k * A * \Delta P}{\mu * L} \quad Loi\ de\ Darcy\ (2)$$

Q : débit d'écoulement (m^3/s) ; A : surface de filtration (m^2) ; ΔP : différence de pression appliquée (Pa) ; μ : viscosité dynamique de la boue (Pa.s) ; L : épaisseur du cake (m) ;

k : perméabilité du cake (m^2).

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} \quad (3)$$

ρ_c : densité apparente du cake (Kg/m^3) ; m_c : masse du cake (Kg) ; V_c : Volume du cake (m^3).

Les résultats obtenus ont permis d'établir un lien entre les propriétés granulométriques des sols, les mécanismes de filtration ainsi que la formation du cake de filtration. Cette analyse a apporté des informations sur l'impact de la granulométrie sur le processus de filtration. Elle offre également des perspectives pour optimiser la gestion des boues de forage en ajustant leur formulation et leurs paramètres, afin de limiter les pertes de fluides, renforcer la stabilité des parois des tranchées et réduire l'impact environnemental.

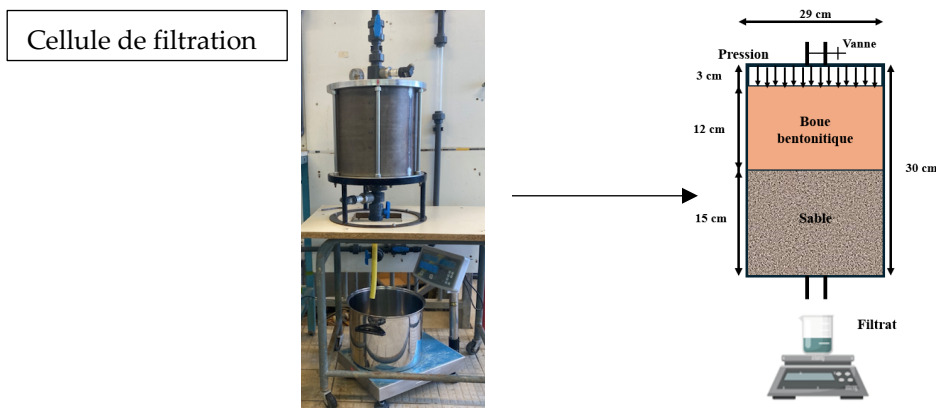


FIGURE 1. Schéma de principe du dispositif expérimental.

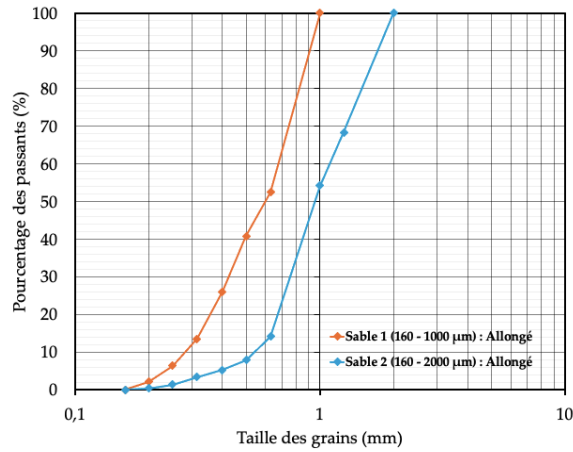


FIGURE 2. Courbe granulométrique des sables utilisés

TABLEAU 1. Caractéristiques des sables utilisés

| | Densité sèche | Poids volumique des grains solides $\gamma_s (kN/m^3)$ | Conductivité hydraulique $K(m/s)$ | Porosité (%) |
|-------------------------------|---------------|--|-----------------------------------|--------------|
| Sable 1 (160 – 1000 μm) | 1,45 | 25,30 | $(3,5 \pm 0,3) \times 10^{-4}$ | 40,4 |
| Sable 2 (160 – 2000 μm) | 1,45 | 25,15 | $(8,5 \pm 0,1) \times 10^{-4}$ | 40 |

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Volume du Filtrat en fonction du temps

Les essais ont montré des variations notables dans les volumes de filtrat en fonction des types de sable utilisés (Fig. 3). Pour le sable 1 (160 - 1000 μm), un filtrat de 1 L a été obtenu après 5 heures de mise sous pression, tandis que le sable 2 (160 - 2000 μm) a généré un volume de 16 L dans les mêmes conditions. De plus, le temps nécessaire pour atteindre le palier de filtration diffère également : il est de 3 minutes pour le sable 1, contre 15 minutes pour le sable 2. Ces résultats illustrent l'influence de la granulométrie du sable sur la performance et la dynamique du processus de filtration.

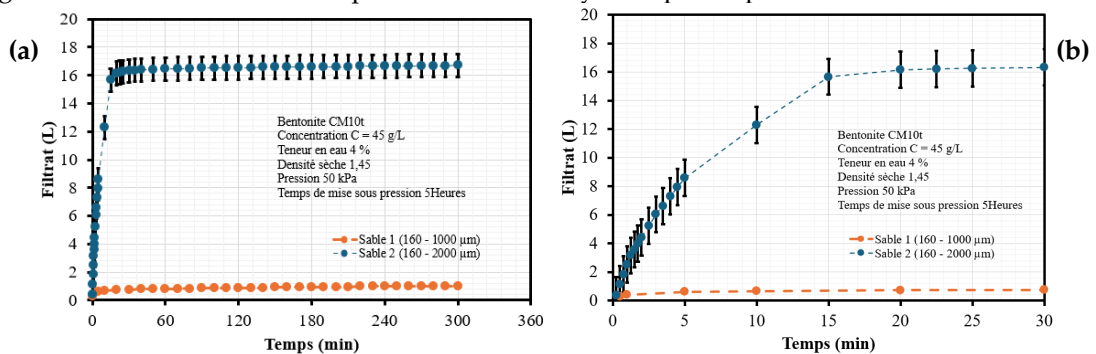


FIGURE 3. Profil du filtrat en fonction de temps de mise sous pression : (a) T = 5 heures ; (b) zoom sur les 30 premières minutes

Les différences observées peuvent être attribuées principalement à la connectivité des pores et à la taille de ces derniers, influençant la circulation de la boue bentonitique à travers le sol. Le sable 2, ayant des pores plus grands et mieux connectés, offre une conductivité hydraulique supérieure (Tab. 1), permettant un passage plus rapide de la boue et retardant la formation du cake de filtration. En revanche, le sable 1, avec des pores plus petits et moins connectés, offre une plus grande résistance à l'écoulement, entraînant une stabilisation plus rapide du processus de filtration. Ces différences confirment que la taille et la connectivité des pores sont des facteurs importants pour la filtration et la formation du cake interne et/ou externe. (Haramkar et al. 2021).

B. Teneur en eau du sable et de la boue filtrée en fonction de la profondeur de filtration

Après 5 heures de filtration, les profils de teneur en eau des deux sables sont présentés dans la Figure 4. Une différence moyenne de 2 % est observée dans les 4 premiers centimètres (Fig. 4). Le sable 1 affiche une teneur en eau moyenne de 28%, contre 30 % pour le sable 2. Rappelons que la teneur en eau de saturation des 2 sables est de (30 ± 1) %. Sur l'ensemble de l'épaisseur du sable 1, la teneur en eau moyenne est de 25%. Elle est de 29% pour le sable 2. Soit une augmentation de teneur en eau entre les 2 sables, à la fin des essais, de 16% en moyenne. Ces données mettent en évidence une rétention d'eau légèrement supérieure dans le sable 2, que l'on lie à la granulométrie et à la rétention de la boue. En effet, la teneur en eau mesurée à la fin de l'essai est celle du mélange sable + boue retenue. Dans ce qui suit, la profondeur de filtration correspond à la distance parcourue par la boue bentonitique à travers le sable.

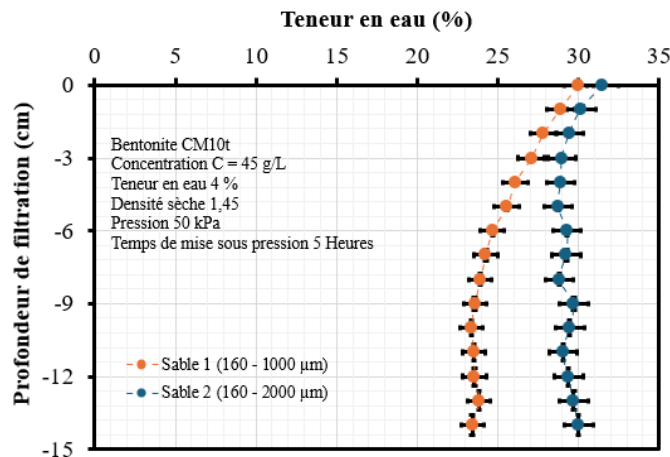


FIGURE 4. Profil de la teneur en eau en fonction de la profondeur de filtration

Comme mentionné ci-dessus, la taille et la connectivité des pores peuvent expliquer cette différence. Les pores plus grands et mieux connectés du sable 2 favorisent une meilleure infiltration et une répartition plus homogène de la boue. En revanche, les pores plus petits du sable 1 favorisent la résistance à l'écoulement, entraînant une répartition moins uniforme de l'humidité (Li et al., 2020 ; Yang et al., 2024). Ainsi, le sable 2, avec une granulométrie plus large, présente une meilleure capacité à retenir et répartir la boue de manière uniforme sur l'ensemble de la profondeur étudiée.

Ces profils résultent également des quantités de filtrats obtenues pour les deux sables. Comme illustré dans la figure 3, les volumes de boues traversant le sol diffèrent, influençant ainsi directement les rétentions globales et les profils de rétention.

La figure 5 montre l'évolution de la rétention de la boue bentonitique en fonction de la profondeur de filtration. Après 5 heures de mise sous pression, des différences notables apparaissent entre les deux sables. En moyenne, sur l'épaisseur étudiée, le sable 1 affiche une rétention de 1,0 %, contre 1,4 % pour le sable 2, soit une augmentation de 40 %. Ces résultats suggèrent une capacité de rétention légèrement supérieure pour le sable 2, probablement due à sa granulométrie plus large, qui favorise la formation de pores plus grands, comme discuté précédemment (Zhao et al., 2021).

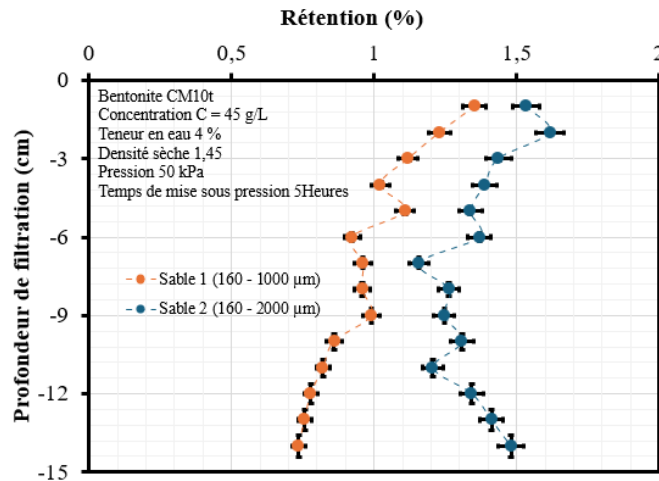


FIGURE 5. Profil de rétention en fonction de la profondeur de filtration

D. Cake de filtration

La figure 7 montre l'estimation de l'épaisseur du cake de filtration par X-ray microtomography. Les résultats du Tableau 2 montrent une épaisseur moyenne du cake de 2,2 mm pour le sable 1 (160 - 1000 µm), supérieure à celle mesurée pour le sable 2 (160 - 2000 µm), qui est de 1,4 mm, soit une diminution de 36%.

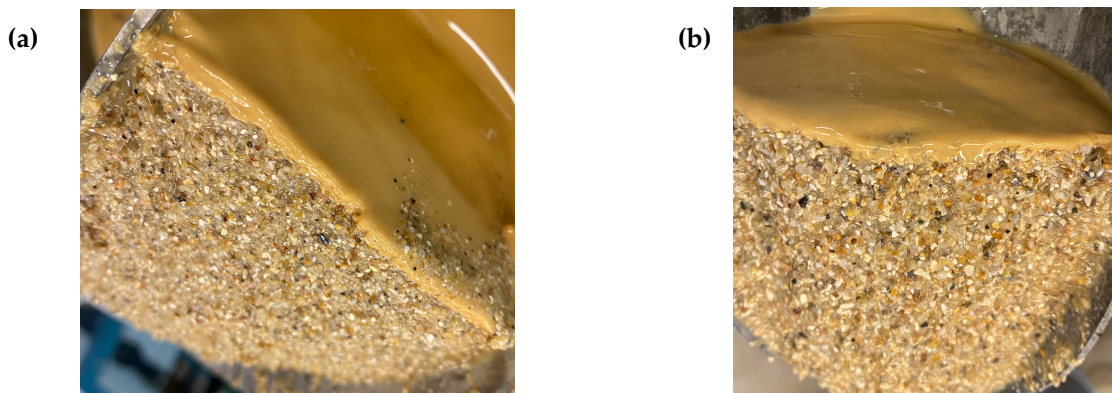


FIGURE 6. Photos montrant le cake de filtration à la fin des essais de filtration :
 (a) sable 1 : 160 – 1000 µm ; (b) sable 2 : 160 – 2000 µm

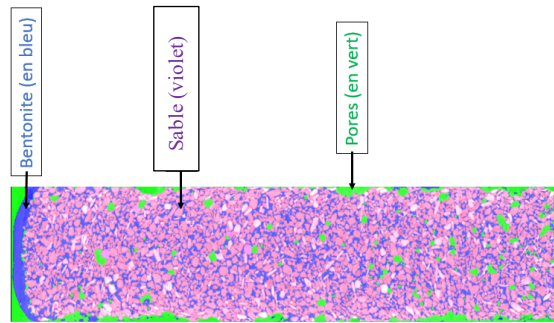


FIGURE 7. Estimation de l'épaisseur du cake de filtration par X-ray microtomography (μ CT)

TABLEAU 2: Cake externe

| | Epaisseur L (mm) | Perméabilité k (m^2) (* 10^{-16}) | Densité apparente ρ_c (g/cm^3) |
|----------------------------------|------------------|---|--|
| Sable 1 (160 – 1000 μm) | 2,2 | 2 | 1,72 |
| Sable 2 (160 – 2000 μm) | 1,4 | 4,7 | 1,62 |

Cette différence, bien que modérée, peut être attribuée à la taille et à la connectivité des pores des deux sables, comme mentionné plus haut. Le sable 1, avec des particules plus fines, crée des pores plus petits et moins connectés, favorisant la formation d'un cake de filtration plus dense (Tab. 2). Cette densité réduit la perméabilité et limite la circulation de la boue, entraînant une accumulation verticale plus marquée du cake de filtration (interne et/ou externe). À l'inverse, le sable 2, avec une granulométrie plus large, forme des pores plus grands et mieux connectés, permettant une accumulation moins dense de particules. Cela conduit à un cake plus poreux, favorisant une meilleure circulation de la boue, mais limitant l'accumulation verticale (Muller, 2000).

IV. CONCLUSION

Cette étude met en évidence l'influence majeure de la granulométrie du sol sur la formation du cake de filtration. Les résultats montrent que les sols à granulométrie large (sable 2) permettent une filtration plus fluide et une répartition plus homogène de la boue, tandis que les sols à granulométrie fine (sable 1) produisent un cake plus dense et moins perméable (Tab. 2). Ces différences sont dues à la perméabilité intrinsèque des sables et à leurs propriétés physiques : taille et connectivité des pores.

Les recherches se poursuivent pour approfondir l'étude des effets de la pression de mise en circulation, du degré de saturation du sol et de la composition de la boue en modes frontal et tangentiel. L'objectif est de mieux comprendre les mécanismes de filtration et la formation du cake (interne et/ou externe) afin d'optimiser la sécurité et l'efficacité des opérations tout en réduisant leur impact environnemental.

REMERCIEMENTS

Les travaux de recherche ont été financés par la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP) et la région Normandie. Nous remercions également notre experte senior, Anne Pantet, pour sa contribution à ces travaux et à la rédaction de cet article.

REFERENCES

AFNOR (2012). Fascicule 68 : Boues de forage - Terminologie et spécifications techniques. Association Française de Normalisation ». <https://www.afnor.org/fr/norme/fascicule-68-boues-de-forage-terminologie-et-specifications-techniques/>

Amanullah, I., Qamar, M. S., & Iqbal, M. (2005). Laboratory assessment of drilling fluid formation damage in sandstone cores and mitigation with lignite additives for high temperature fields. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 48(1-2), 131-144. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.03.001>

Bear, J. (1972). "Dynamics of Fluids in Porous Media". *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 61, Issue 1, 23 October 1973, pp. 206 – 208 DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112073210662>

Dongseop Lee, Kiseok Kim, Hyobum Lee, Jeehee Lim, In-Mo Lee, Hangseok Choi (2016). "Measurement of hydraulic properties of bentonite cake formation deposited on base soil medium". <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.037>

Jin-Wen Yang, Yu-Jun Cui, Nadia Mokni, Emmanuel Ormea (2024). "Investigation into the mercury intrusion porosimetry (MIP) and micro-computed tomography (μ CT) methods for determining the pore size distribution of MX80 bentonite pellet". <https://doi.org/10.1007/s11440-023-01863-y>

Le Havre Seine Métropole (LHSM). Qualité de l'eau. (Site internet de la Communauté Urbaine LHSM consulté en mai 2023) <https://www.lehavreseinemetropole.fr/amonservice/qualite-de-leau>

Miller (2000). "Pore structure and network analysis of filter cake". https://www.researchgate.net/publication/222935052_Pore_structure_and_network_analysis_of_filter_cake

NF EN 1538+A1 (2015). Execution of special geotechnical works - Test loading of piles. <https://www.afnor.org/fr/norme/nf-en-1538-a1-2015/>

Shilpa S. Haramkar, Govind N. Thombre, Sachin V. Jadhav and Bhaskar N. Thorat (2021). "The influence of particle(s) size, shape and distribution on cake filtration mechanics—a short review" Volume 24, issue 2 (2021), p. 255-265. <https://doi.org/10.5802/crchim.84>

Yang Zhao, Peipei Zhang, Hongyuan, Fang, Chengchao, Guo, Beibei, Zhang, Fuming, Wang (2021). "Bentonite-assisted microbial-induced carbonate precipitation for coarse soil improvement".

[https://www.researchgate.net/publication/351854974 Bentonite-assisted microbial-induced carbonate precipitation for coarse soil improvement](https://www.researchgate.net/publication/351854974_Bentonite-assisted_microbial-induced_carbonate_precipitation_for_coarse_soil_improvement)

Zhenze Li, Grant Su, Quinn Zheng, Thanh Son Nguyen (2020). "A dual-porosity model for the study of chemical effects on the swelling behaviour of MX-80 bentonite". <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00762-5>