

# MESURE ET ÉTUDE DE LA PERMÉABILITE AUX LIXIVIATS ULTRABASIQUES D'UNE SÉRIE DE GÉOSYNTHÉTIQUES BENTONITIQUES

## MEASUREMENT AND STUDY OF THE PERMEABILITY OF A SERIES OF BENTONITIC GEOSYNTHETICS TO ULTRABASIC LEACHATES

Thibaut LANDO<sup>1</sup>, Christophe POINCLOU<sup>1</sup>, Marie FORESTIER COSTE<sup>2</sup>, Jean-Frédéric OUVRY<sup>3</sup>

1 Antea Group Laboratoire, Orléans, France

2 Antea Group, Montpellier, France

3 Ingénieur Conseil, La Ferté Saint Aubain, France

**RÉSUMÉ** – Cet article présente les résultats d'une campagne d'essai en laboratoire réalisés sur trois GSB selon la norme NF P 84 705. Ces mesures sont effectuées à l'eau minéralisée et au lixiviat issu de résidus industriels de bauxite. Deux des trois GSB testés contiennent de la bentonite sodique, l'un est constitué de granules millimétriques, l'autre sous forme poudreuse. Le troisième GSB contient de la bentonite polymère en poudre. Les perméabilités mesurées à l'eau sont de l'ordre de  $10^{-11}$  m/s, alors que les perméabilités mesurées au lixiviat varient de  $10^{-12}$  à  $10^{-6}$  m/s selon les GSB. Les mesures et observations de cette campagne sont mises en parallèle des recherches de Chen *et al.* (2020) et Tian *et al.* (2017) qui abordent la thématique de l'utilisation de GSB pour le stockage des lixiviats issus des résidus industriels de bauxite.

Mots-clés : Perméabilité, GSB, lixiviat, résidus de bauxite, aluminium.

**ABSTRACT** – This paper presents a laboratory testing campaign about three GCL. The results of hydraulic conductivity (NF P 84 705) measurements with water and bauxite industry leachate are showed. Two tested GSB contains sodic bentonite, one in millimeter size grains and the other one in powder. The thirst GSB contains powder polymeric bentonite. The measured hydraulic conductivities with water are about  $10^{-11}$  m/s, while hydraulic conductivity measured with bauxite industry leachate evolved between  $10^{-6}$  and  $10^{-12}$  m/s. The results of this campaign are compared with J. Chen *et al.* (2020) and K. Tian *et al.* (2017) publications about bauxite leachate storage with GSB.

Keywords: Hydraulic conductivity, GCL, bauxite waste, leachate, aluminium.

### 1. Introduction

Afin de répondre aux enjeux techniques et économiques, en adéquation avec les préoccupations environnementales, l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques (GSB) dans la gestion des liquides de process industriels offre des perspectives intéressantes, notamment par leur coût modéré. Le secteur industriel de l'aluminium est concerné par la nécessité de gérer d'importants volumes de boue et de liquide de process dans le but de le raffiner pour divers débouchés : production de l'aluminium, de batterie lithium, de matériaux de construction, de dissipateurs thermiques ou d'abrasifs industriels.

L'utilisation de GSB comme matériau d'étanchéité pour le stockage de lixiviat agressif (pH élevé) avec une chimie complexe est une thématique émergente. La chimie particulière des lixiviats industriels peut impacter les propriétés hydrauliques de la bentonite et modifier les performances du GSB.

Cette étude apporte des réponses expérimentales afin de mesurer et comparer les propriétés hydrauliques d'une série de trois GSB à l'eau minéralisée et au lixiviat de résidu industriel de bauxite (RIB). Après une présentation du contexte de l'étude et des GSB, le matériel et le protocole d'essai seront évoqués. Après la présentation des résultats, la discussion permettra de comparer notre étude à celles de la bibliographie avant de conclure concernant la thématique abordée. Cette étude se termine par la synthèse de la bibliographie identifiée pour la rédaction de cet article.

### 2. Contexte de l'étude et présentation des GSB

Dans le cadre d'un projet de développement de bassins de stockage de lixiviat de RIB, la possibilité d'utiliser un GSB comme solution technique d'étanchéité a été envisagée. Un programme d'essais en laboratoire a été établis pour vérifier la faisabilité d'une telle approche, en comparant les performances de trois GSB de marques différente soumis aux mêmes conditions d'essai.

## 2.1 Les GSB testés

Trois GSB, sont testés pour cette étude. Le GSB n°1 est constitué de bentonite sodique sous forme de granules millimétriques (GSB1 Na-G). Le GSB n°2 se compose de bentonite sodique en poudre (GSB2 Na-P). Le GSB n°3 se compose de bentonite sodique mélangée à un polymère, elle est sous forme granulaire (GSB3 NaPoly-G). Les bentonites contenues dans les échantillons de GSB sont présentées sur la Figure 1.

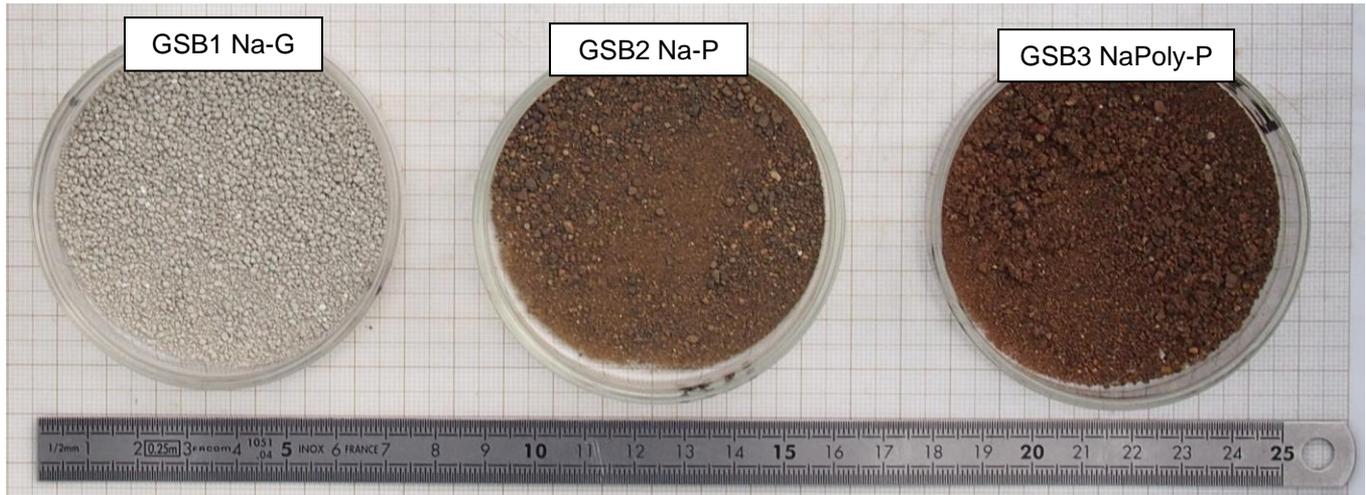


Figure 1. Photographie de la bentonite constituant les GSB

Tableau 1. Caractéristiques des GSB selon les fiches techniques produits des fournisseurs.

Échantillon de GSB	GSB1 Na-G	GSB2 Na-P	GSB3 NaPoly-G
Caractéristiques des GSB			
Masse surfacique (kg/m <sup>2</sup> )	6,00	6,30	5,00
Indice de gonflement de la bentonite (ml/2g)	>24	>24	25
Proportion de montmorillonite dans la bentonite (%)	(*)	90	80% (+/-) 10%
Perméabilité à l'eau (m/s)	< 5.10 <sup>-11</sup>	1,5.10 <sup>-11</sup>	1,0.10 <sup>-11</sup>

(\*) : Valeur non disponible.

## 2.2 Le lixiviat de RIB

Le lixiviat de RIB utilisé pour cette série d'essai a été prélevé dans un bassin de stockage de RIB d'un site d'étude. Ce lixiviat a été réceptionné dans quatre contenants, ayant chacun fait l'objet d'une analyse physico-chimique. La variation des concentrations en éléments chimiques et les paramètres physiques mesurés par les quatre analyses sont homogènes. Les résultats présentés sont la moyenne des mesures des quatre analyses. Le tableau 2 présente la synthèse des résultats de ces mesures.

Tableau 2. Moyenne des 4 analyses physico-chimiques du lixiviat de RIB prélevé sur le site de l'étude.

Caractérisation du lixiviat prélevé in-situ	
Masse volumique	1,00 g/cm <sup>3</sup>
pH	12,5 à 22 °C
Composés halogénés organiques adsorbables (AOX)	610 à 1900 µg/L
Demande chimique en oxygène (DCO)	410 à 450 mg/L
Carbone organique total (COT)	210 à 230 mg/L
Chlorures (Cl)	210 à 220 mg/L
Sulfates (SO <sub>4</sub> )	580 à 650 mg/L
Ammonium (NH <sub>4</sub> )	9,5 à 10 mg/L
Potassium (K)	33 à 35 mg/L
Chrome (Cr)	63 à 66 mg/L
Nickel (Ni)	130 à 140 mg/L
Arsenic (As)	1500 à 1600 mg/L

Ce lixiviat présente des caractéristiques basiques, avec un pH de 12,5 mesuré à 22°C. Il contient des anions (sulfates, chlorures, ammonium) et des métaux lourds en concentrations plus ou moins importantes (Arsenic, Nickel, Chrome, Potassium).

### 3. Matériel et protocole d'essai

Les GSB ont fait l'objet d'une série d'essais de mesure de perméabilité à l'œdo-perméamètre selon la norme NF P 84 705. Sur chacun des produits étudiés, trois essais de flux et perméabilité ont été réalisés : un essai a été mené à l'eau distillée minéralisée à 0,292 g/L de NaCl et deux essais ont été effectués avec le lixiviat de RIB évoqué ci-dessus. Les essais ont été menés simultanément avec trois œdo-perméamètres de Type 1 (NF P 84 705) en téflon. L'utilisation du téflon permet de limiter le risque d'interaction chimique entre le liquide de d'essai et le matériau constituant la cellule d'essai. Une cellule d'essai est présentée par la Figure 2.

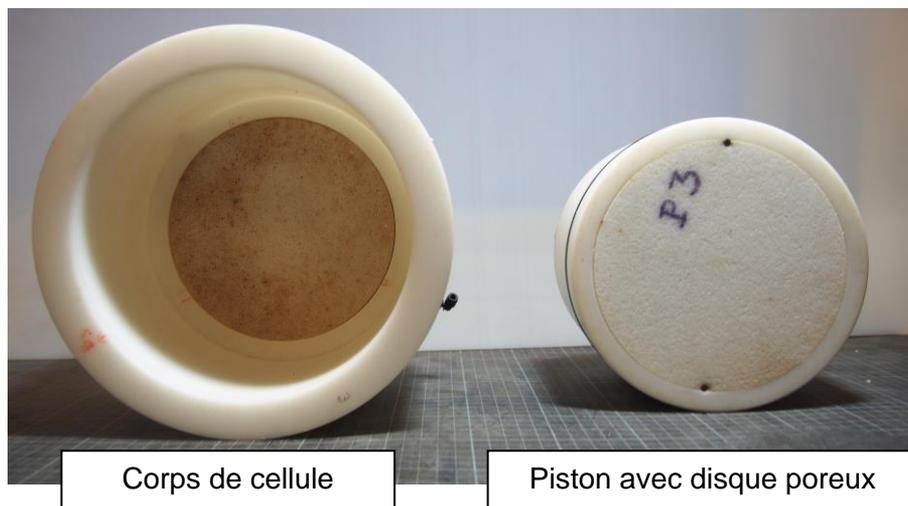


Figure 2. Photographie d'un œdo-perméamètre de Type 1 (diamètre 200 mm) en téflon utilisé pour le conditionnement des éprouvettes de GSB pour les essais de perméabilité (pièce de gauche : corps de cellule ; pièce de droite : piston)

Chaque essai commence par la mise en place de l'éprouvette de GSB dans la cellule avec l'application d'un joint de bentonite hydratée à une teneur en eau proche de 150% conformément à la norme NF P 84 705. Les éprouvettes ont été confectionnées par le fonçage d'une trousse coupante en acier dans le GSB. La contrainte normale de 10 kPa est appliquée sur les trois éprouvettes de GSB par un bâti de consolidation pneumatique. La consolidation des éprouvettes est mesurée jusqu'à la stabilisation de la déformation axiale, atteinte entre 24 et 48 heures selon les GSB.

Les éprouvettes sont ensuite mises en contact avec le liquide d'essai (eau minéralisée ou lixiviat de RIB). Durant cette étape, le gonflement et le volume de liquide absorbé par les éprouvettes sont enregistrés jusqu'à la stabilisation du gonflement. Cette étape d'hydratation et de gonflement dure entre 23 et 35 jours selon le GSB testé.

Après la phase d'hydratation et de gonflement des éprouvettes, une mesure de perméabilité à charge constante est initiée pour chaque éprouvette par l'application d'un gradient hydraulique. Une charge hydraulique de 0,8 m (sans contre pression) de liquide est appliquée pour chacune des éprouvettes. Pendant la phase de perméabilité les volumes de liquide entrant et sortant de l'œdo-perméamètre contenant l'éprouvette sont mesurés et enregistrés. Les mesures de perméabilité durent de 10 à 13 jours. Après la phase de perméabilité, les éprouvettes ont été démontées de la cellule d'essai pour observation, photographie, mesure de l'épaisseur finale et de la teneur en eau ou en liquide d'essai.

## 4. Résultats

### 4.1 Résultats de l'échantillon GSB1 Na-G

Les caractéristiques initiales mesurées et les paramètres de la phase d'hydratation et gonflement du GSB1 (Na-G) sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3. Caractéristiques initiales et paramètres mesurés pendant la phase d'hydratation et gonflement du GSB1 Na-G.

GSB1 Na-G			
	Eau minéralisée	Lixiviat de RIB	
Épaisseur de l'éprouvette avant essai (mesurée sous 20 kPa selon NF EN ISO 9863-1)	7,72 mm et 8,28 mm		
Gonflement	0,86 mm	0,91 mm	1,00 mm
	11,5 %	10,13 %	12,50 %
Volume de liquide d'essai absorbé	49,9 cm <sup>3</sup>	35,0 cm <sup>3</sup>	37,3 cm <sup>3</sup>

Les mesures de la perméabilité sur l'éprouvette de GSB1 Na-G sont menées pendant 9 jours. La perméabilité mesurée à l'eau minéralisée est stable dès le 1<sup>er</sup> jour et jusqu'au 9<sup>e</sup> jour. La perméabilité moyenne mesurée est de  $8,0 \cdot 10^{-12}$  m/s.

Les perméabilités mesurées avec le lixiviat de RIB présentent une évolution à partir du 7<sup>e</sup> jour de la phase de mesure. Les perméabilités mesurées du 1<sup>er</sup> au 5<sup>e</sup> jours sont de l'ordre de  $10^{-9}$  m/s à  $10^{-8}$  m/s selon l'éprouvette. À partir du 7<sup>e</sup> jour, des perméabilités de  $2,1 \cdot 10^{-11}$  m/s et de  $4,5 \cdot 10^{-11}$  m/s sont mesurées.

#### 4.2 Résultats de l'échantillon GSB2 Na-P

La synthèse des mesures concernant le GSB2 Na-P est présentée dans le tableau 4.

Tableau 4. Caractéristiques initiales et paramètres mesurés pendant la phase d'hydratation et gonflement du GSB1 Na-G.

GSB2 Na-P			
	Eau minéralisée	Lixiviat de RIB	
Épaisseur de l'éprouvette avant essai (mesurée sous 20 kPa selon NF EN ISO 9863-1)	6,08 à 6,76 mm		
Gonflement	1,27 mm	0,80 mm	1,29 mm
	21,88 %	12,50 %	20,00 %
Volume de liquide d'essai absorbé	68,0 cm <sup>3</sup>	35,0 cm <sup>3</sup>	37,3 cm <sup>3</sup>

La phase de mesure de perméabilité dure 18 jours pour cette série. La perméabilité mesurée pour le GSB2 Na-P avec l'eau minéralisée est de  $1,0 \cdot 10^{-11}$  m/s. La mesure de la perméabilité à l'eau minéralisée est stable du 1<sup>er</sup> jour jusqu'au 18<sup>e</sup> jour.

Au lixiviat de RIB, la perméabilité mesurée le 1<sup>er</sup> jour de la phase d'essai est de  $4,5 \cdot 10^{-11}$  à  $5,0 \cdot 10^{-10}$  m/s. Entre le 6<sup>e</sup> et 10<sup>e</sup> jour, les mesures de perméabilité évoluent entre  $3,6 \cdot 10^{-11}$  et  $4,0 \cdot 10^{-11}$  m/s. À partir du 11<sup>e</sup> jour, les perméabilités mesurées avec le lixiviat de RIB sont de l'ordre de  $2,2 \cdot 10^{-11}$  à  $3,1 \cdot 10^{-11}$  m/s.

#### 4.3 Résultats de l'échantillon GSB3 NaPoly-P

Le tableau 5 présente la synthèse des mesures concernant le GSB3 NaPoly-P.

Tableau 5. Caractéristiques initiales et paramètres mesurés pendant la phase d'hydratation et gonflement du GSB3 NaPoly-G.

GSB3 Na-P			
	Eau minéralisée	Lixiviat de RIB	
Épaisseur de l'éprouvette avant essai (mesurée sous 20 kPa selon NF EN ISO 9863-1)	6,51 à 7,71 mm		
Gonflement	1,84 mm	1,38 mm	1,24 mm
	26,23 %	20,00 %	17,97 %
Volume de liquide d'essai absorbé	57,2 cm <sup>3</sup>	45,0 cm <sup>3</sup>	62,1 cm <sup>3</sup>

Les mesures de la perméabilité ont été effectuées pendant 10 jours. Avec l'eau minéralisée, la perméabilité mesurée est de  $1,1 \cdot 10^{-11}$  m/s. Avec le lixiviat de RIB, la perméabilité de  $6,3 \cdot 10^{-12}$  m/s sur l'un des deux essais. Pour le second, la perméabilité mesurée est de  $5,0 \cdot 10^{-12}$  m/s lors des sept premiers jours puis une augmentation de la perméabilité s'observe (augmentation de la cinétique des volumes de lixiviat injecté). Les mesures effectuées du 7<sup>e</sup> au 10<sup>e</sup> jours permettent de mesurer une

perméabilité de  $7,3 \cdot 10^{-10}$  m/s. Lors de la phase de perméabilité, avec l'eau et le lixiviat de RIB, les liquides sortants présentent un aspect gélatineux illustré par la Figure 3.



Figure 3. Photographie d'une éprouvette de l'échantillon GSB3 NaPoly-P avec l'illustration du liquide gélatineux

#### 4.4 Observations et mesures après essais

Les éprouvettes après essai ont fait l'objet d'une mesure d'épaisseur et de teneur en eau (ou en liquide d'essai). Les résultats de ces mesures sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6. Mesures après essais de perméabilités sur les éprouvettes des trois GSB.

Echantillon	GSB1 Na-G			GSB2 Na-P			GSB3 NaPoly-P		
	Eau	Lixiviat RIB	Lixiviat RIB	Eau	Lixiviat RIB	Lixiviat RIB	Eau	Lixiviat RIB	Lixiviat RIB
Épaisseur après essai (mm)	11,65	10,50	10,65	13,34	10,80	9,72	12,64	10,0	9,05
Teneur en liquide d'essai (%)	116,2	101,2	105,8	125,7	99,1	81,1	193,2	143,5	118,5

##### 4.4.4. Synthèse des mesures et observations

Les différentes mesures de perméabilité au l'eau minéralisée et au lixiviat de RIB sont présentés dans le tableau 7.

Tableau 7. Synthèse des mesures de perméabilité

Échantillon	GSB1 Na-G			GSB2 Na-P			GSB3 NaPoly-P		
	Eau	Lixiviat RIB	Lixiviat RIB	Eau	Lixiviat RIB	Lixiviat RIB	Eau	Lixiviat RIB	Lixiviat RIB
Perméabilité (m/s)	$8,0 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$ (*) $2,1 \cdot 10^{-11}$	$3,3 \cdot 10^{-9}$ (*) $4,5 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$3,1 \cdot 10^{-11}$	$5,0 \cdot 10^{-10}$ (**) $2,2 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$ (***) $7,3 \cdot 10^{-10}$	$7,2 \cdot 10^{-12}$

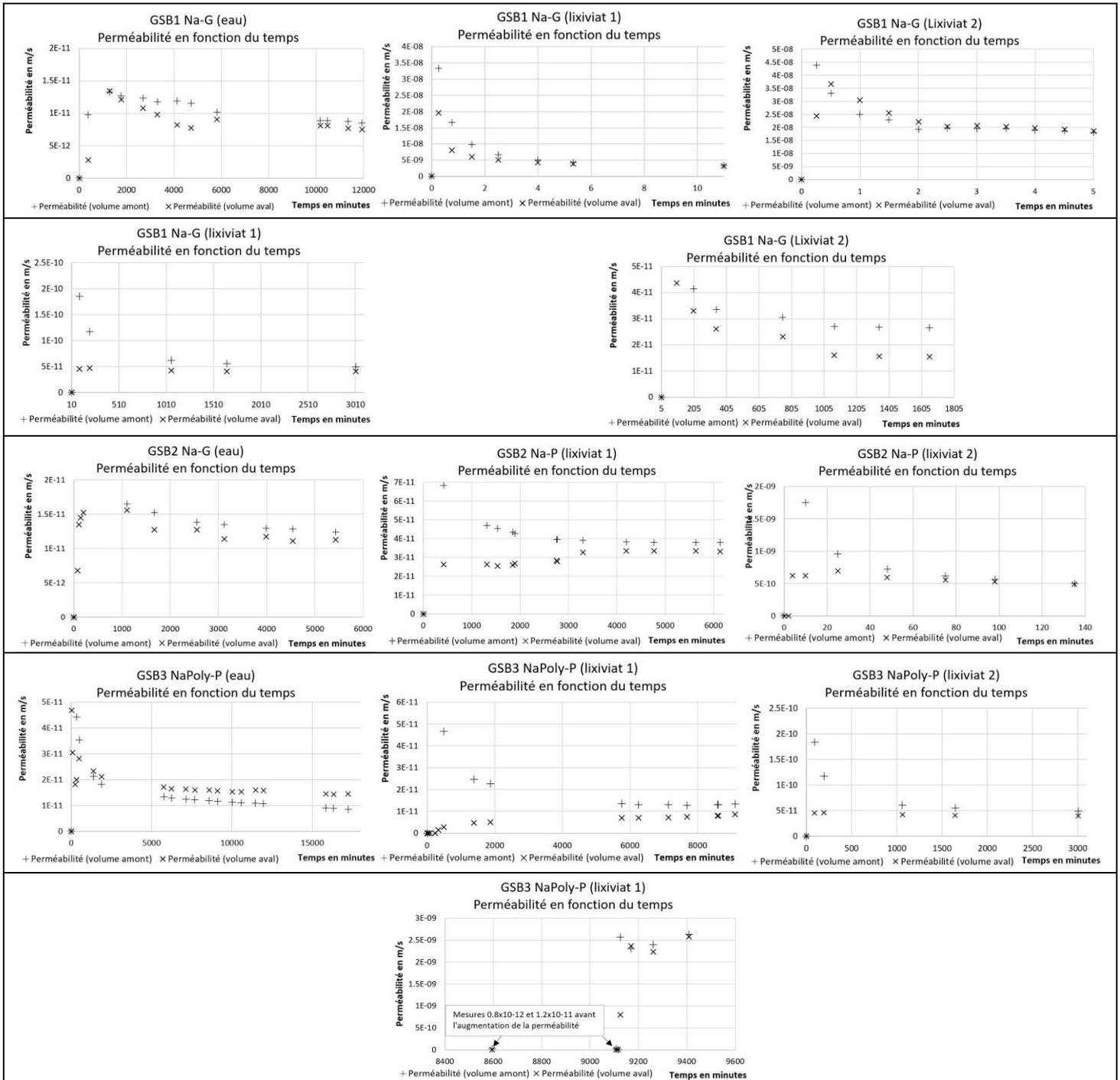
(\*) : Évolution des perméabilités après 5 jours de mesure.

(\*\*) : Évolution des perméabilités après 11 jours de mesure.

(\*\*\*) : Évolution des perméabilités après 7 jours de mesure.

Les courbes de suivi des mesures de perméabilité sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4. Tableau synthétique des courbes d'évolution de la perméabilité en fonction du temps pour chaque GSB et essai à l'eau et au lixiviat de RIB



#### 4. Discussion

Les mesures de perméabilité à l'eau minéralisée sont du même ordre de grandeur sur les trois échantillons de GSB testés. Elles évoluent entre  $8,0 \cdot 10^{-12}$  m/s et  $1,1 \cdot 10^{-11}$  m/s. Ces valeurs sont conformes aux fiches des produits. Toutefois, les gonflements mesurés durant la phase de saturation à l'eau minéralisée présentent une variabilité. En effet, ils évoluent entre 11,25% pour le GSB1 Na-G, 21,86% pour le GSB2 Na-P et jusqu'à 26,23% pour le GSB3 NaPoly-P. L'origine de la bentonite qui compose les GSB peut expliquer la variation des gonflements mesurés. Une caractérisation de la provenance par mesures isotopiques des bentonites composant les trois échantillons n'a pas été menée

dans notre étude. D'autre part, la présence de polymères ajoutés au sein de la bentonite impacte le gonflement. Aucune information sur le type de polymère présent au sein du GSB3 NaPoly-P n'est disponible.

Les perméabilités mesurées avec le lixiviat de RIB pour l'échantillon GSB1 Na-G (bentonite sodique sous forme granulaire) sont de  $10^{-9}$  à  $10^{-8}$  m/s. Ces perméabilités sont supérieures aux perméabilités mesurées à l'eau minéralisée les cinq premiers jours. Une perméabilité d'un ordre de grandeur similaire avec le même type de GSB et de lixiviat de RIB est présentée dans la publication de Tian *et al.* (2017). Un lien entre la perméabilité élevée mesurée et la taille des pores liée à la granulométrie de la bentonite est établi. La bentonite du GSB1 Na-G présente une forme de granules millimétriques similaires à la description du cas de l'étude de Tian *et al.*

D'autre part, Tian *et al.* interprètent l'absence du gonflement de la bentonite par le lixiviat de RIB comme le phénomène principal expliquant la perméabilité supérieure de la bentonite avec le lixiviat de RIB par rapport à l'eau minéralisée.

Dans le cas de notre étude, l'absence de gonflement de la bentonite avec le lixiviat de RIB n'est pas observée. Dans le cas du GSB1 Na-G (bentonite sodique sous forme granulaire) le gonflement au lixiviat de RIB s'est même révélé supérieur que celui à l'eau minéralisée. Dans un second temps pour ce même échantillon (GSB1 Na-G) les perméabilités mesurées diminuent ( $3 \cdot 10^{-11}$  m/s).

Dans le cas du GSB2 Na-P (bentonite sodique poudreuse), le gonflement mesuré au lixiviat de RIB est inférieur ou équivalent à celui mesuré à l'eau. Pour ce même échantillon (GSB2 Na-P), la perméabilité mesurée au lixiviat de RIB est variable entre les deux essais pendant les onze premiers jours d'essai puis les mesures deviennent homogènes ( $1,0$  à  $3,0 \cdot 10^{-11}$  m/s). Ces perméabilités sont du même ordre de grandeur que celles (au lixiviat) du GSB1 Na-G et que celles mesurées à l'eau minéralisée sur le GSB2 Na-P.

Les perméabilités mises en évidence avec le lixiviat de RIB sont inférieures à celles présentées dans d'autres études comme celle de Benson *et al.* (2008), de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s. Selon Tian *et al.*, (2017), le colmatage de la microporosité de la bentonite en poudre par la précipitation des complexes d'aluminium pourrait être le phénomène expliquant ces mesures peu communes. Toutefois, des mesures complémentaires seraient nécessaires avant de pouvoir affirmer cette hypothèse dans notre cas d'étude.

Avec le GSB3 NaPoly-P, contenant un mélange de bentonite sodique et de polymère, les gonflements mesurés au lixiviat des RIB sont inférieurs à celui mesuré avec l'eau. L'échantillon GSB3 NaPoly-P (bentonite polymère en poudre) présente une perméabilité au lixiviat de RIB inférieure ( $7 \cdot 10^{-12}$  m/s) ou du même ordre de grandeur ( $1 \cdot 10^{-11}$  m/s) que celle à l'eau. Néanmoins, l'un des deux essais menés au lixiviat de RIB présente une augmentation soudaine de la perméabilité. Ce phénomène est observable après sept jours d'essai. Cette singularité observée dans d'autres publications est expliquée par l'élution de la substance polymère à travers la porosité de la bentonite. Ce phénomène pourrait expliquer l'augmentation de la perméabilité (Chen *et al.*, 2020 ; Tian *et al.*, 2017). L'hypothèse de l'élution du polymère peut être étayée par l'observation de l'aspect gélatineux des liquides sortants de l'échantillon GSB3 NaPoly-P. En effet, cette observation prouve la présence de la phase polymère au sein des liquides ayant traversé le GSB.

## 6. Conclusions

Notre étude a permis de mettre en évidence l'hétérogénéité du comportement de trois GSB au contact avec le lixiviat de RIB du site d'étude. Au regard de nos résultats et de l'étude bibliographique, la mise en contact de bentonite sodique et du lixiviat de RIB ne semble pas inhiber le gonflement de la bentonite sodique quelle que soit sa granulométrie. Pour le mélange de bentonite sodique et de polymère, l'hydratation au lixiviat de RIB affecte le gonflement de la bentonite.

Les perméabilités mesurées au lixiviat de RIB sont également hétérogènes. Pour les GSB composés de bentonite sodique sans polymère, la texture de la bentonite impacte la perméabilité. La bentonite sous texture granulaire présente une phase préliminaire se caractérisant par une perméabilité élevée à moyenne ( $10^{-10}$  à  $10^{-8}$  m/s), avant d'atteindre dans un second temps des valeurs plus faibles ( $10^{-11}$  m/s). Les GSB composés de bentonite sodique sous texture pulvérulente semblent moins marqués par cette phase initiale caractérisée par une perméabilité élevée. La perméabilité mis en évidence pour ce type de GSB est du même ordre de grandeur ( $10^{-11}$  m/s).

Les GSB composés de mélange de bentonite sodique et de polymère présentent de faibles perméabilités ( $10^{-12}$  à  $10^{-11}$  m/s) avec lixiviat de RIB. Toutefois, l'élution du polymère par le liquide

traversant le GSB, phénomène identifié dans la bibliographie, est observé également lors de cette campagne d'essais. Ce mécanisme peut affecter la perméabilité, et l'augmenter considérablement, engendrant la dégradation des performances du GSB.

## 7. Références bibliographiques

- Athanassopoulos C., Benson C., Chen J., Donovan M. (2015). Hydraulic conductivity of a polymer-modified GCL permeated with high-pH solutions, *Geosynthetics 2015 Conference*, Portland.
- Benson C., Oren A.H., Gats W.P. (2010). Hydraulic conductivity of two geosynthetic clay liners permeated with a hyperalkaline solution. *J. Geotextiles and Geomembranes*, 28(2), 206-218.
- Benson C., Wang X., Gassner F.W., Foo D.C.F. (2008). Hydraulic conductivity of two geosynthetic clay liners permeated with an Aluminum residue leachate. *GeoAmericas 2008*, International Geosynthetics Society.
- Brown L., Shackelford C. (2007). Hydraulic conductivity of a geosynthetic clay liner to simulated animal waste solution. *Research Gate*, 266090923.
- Chen J., Benson C. (2020). Hydraulic conductivity of bentonite-polymer composite geosynthetic clay liners permeated with bauxite liquor from China. *GeoAmericas 2020*, International Geosynthetics Society.
- Norme NF P 84-705 Avril 2019, Géosynthétiques bentonitiques – Détermination à l'oedo-perméamètre des caractéristiques de gonflement, flux, perméabilité des géosynthétiques bentonitiques (GSB) – Essais de caractérisation et essai de performance, *AFNOR*, Version de 2019-04-P.
- Norme NF EN ISO 9863 21 Octobre 2016 – Géosynthétiques – Détermination de l'épaisseur à des pressions spécifiées – Partie 1 : Couches Individuelles, *AFNOR*, Version de 2016-10
- Tian K., Likos W., Benson C. (2019). Polymer elution and hydraulic conductivity of bentonite-polymer composite geosynthetic clay liners. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 145(10), 04019071.
- Tian K., Benson C. (2017). Chemical compatibility of geosynthetic clay liners to aggressive bauxite liquor. *Proceedings of 55th International ICSOBA Conference*, Hambourg.