

Bilan et évolution de la mise en œuvre de géosynthétiques bentonitiques (GSB) dans les ouvrages souterrains

En France, les premières applications de procédés d'étanchéité à base de bentonite dans les ouvrages souterrains remontent à trente ans. L'évolution des procédés et l'arrivée de nouvelles normes ont conduit à établir de nouvelles spécifications de caractérisation et de prescription de mise en œuvre des géosynthétiques bentonitiques : cet article nous en présente les principales.

Historique de la mise en œuvre des GSB pour assurer l'étanchéité des ouvrages souterrains en France

À titre expérimental, la mise en œuvre de procédés d'étanchéité hydrogonflants a commencé dans le courant des années 1982/1983 sur le chantier du prolongement de la ligne B du métro de Lyon en France. Des applications sur de plus grandes surfaces ont suivi dès 1985 pour assurer l'étanchéité de radiers et de piédroits de tranchées couvertes, par exemple sur Orlyval dans la région parisienne, sur la première ligne du métro de Toulouse, etc.

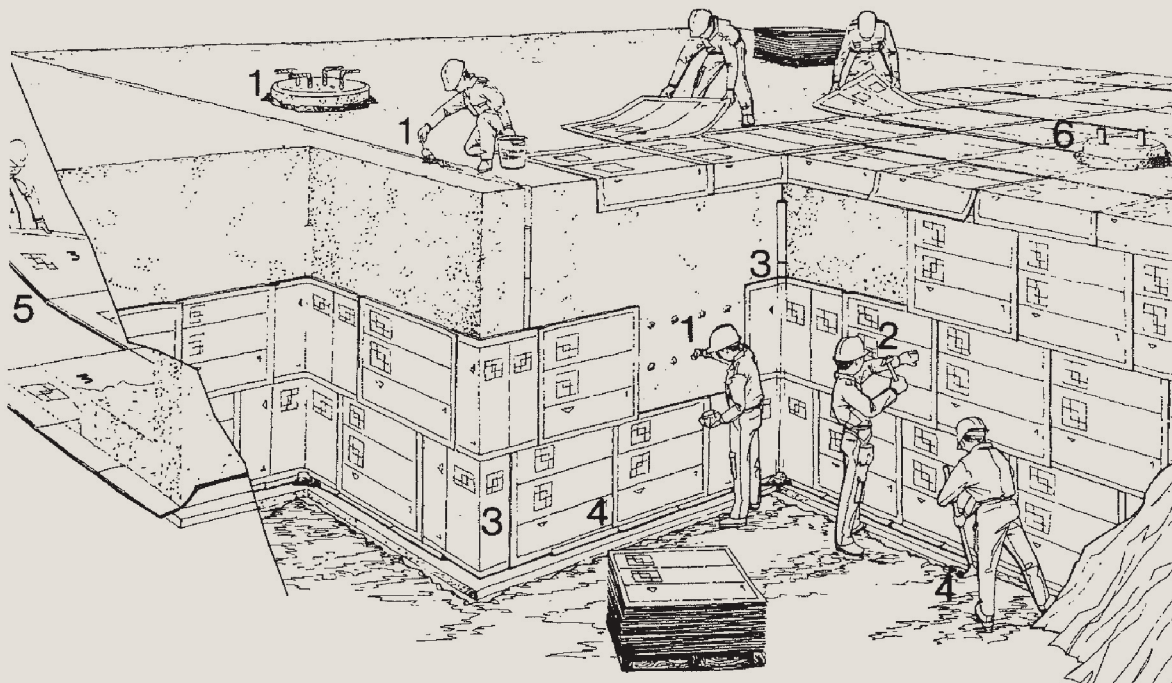
Ce procédé d'étanchéité par hydrogonflement se présentait à l'époque sous forme de panneaux carrés de 1,22 m de côté et de 4,75 mm d'épaisseur, composés de deux feuilles de carton biodégradable dans l'eau et qui avaient la fonction de conteneur. Le contenu du procédé était composé par de la bentonite de sodium naturelle fabriquée à l'époque par American Colloid Company à Belle Fourche dans le sud du Dakota aux États-Unis. Ce procédé d'étanchéité à base de bentonite était utilisé en Amérique du Nord (États-Unis et Canada) depuis 1939 pour assurer l'étanchéité, notamment des ouvrages souterrains et des parties enterrées de bâtiments.

La mise en œuvre de ces panneaux se faisait, comme indiqué dans la figure 1, par simple recouvrement en surface horizontale et par clouage et simple recouvrement en surface verticale. Les points singuliers recevaient un traitement complémentaire sous forme de pâte de bentonite hydratée.

Les premières expériences de mise en œuvre, durant le printemps très pluvieux de 1982 sur le métro de Lyon, ont connu des échecs liés à une dégradation trop rapide du conteneur en carton, et par conséquent au gonflement prématuré de la bentonite, ceci avant son confinement par le béton de l'ouvrage. Cette trop grande sensibilité du procédé à la présence d'eau de pluie ou d'infiltration a assurément constitué un frein à son développement dans le secteur de l'étanchéité des ouvrages souterrains. L'arrivée sur le marché, en 1986, de panneaux prétraités en usine par l'application sur chaque face d'un polymère en phase aqueuse destiné à retarder la biodégradabilité du carton au contact de l'eau, n'a pas inversé la tendance. La première édition du Fascicule 67 – Titre III du CCTG (cahier des clauses techniques générales) « Étanchéité des ouvrages souterrains » s'est limitée à cantonner ce procédé par hydrogonflement aux commentaires de son article 2, en indiquant que ce procédé existait et pouvait, dans certaines conditions très draconiennes, être utilisé pour assurer l'étanchéité, notamment des radiers de structures intégrées (radier ancré, par exemple, dans une paroi moulée).

Pendant cinq à huit ans, ce procédé d'étanchéité par hydrogonflement a été peu utilisé en France pour assurer l'étanchéité des ouvrages souterrains. Par contre, il a parfois été mis en œuvre comme un complément d'étanchéité au raccordement d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) synthétique neuf avec un dispositif en place existant. Depuis, il est souvent utilisé également pour conforter l'étanchéité d'un arrêt de DEG, par exemple sur un soutènement constitué

1 Pose de panneaux.



- | | |
|---|------------------------------|
| 1. Préparation support. | 4. Panneaux verticaux. |
| 2. Fixation panneaux. | 5. Confinement des panneaux. |
| 3. Renforcement dans les angles avec bentonite en vrac. | 6. Panneaux horizontaux. |

de parois moulées ou préfabriquées (tunnel nord de Toulon, prolongement ligne A du métro de Toulouse, etc.).

Ce procédé va connaître un regain d'intérêt, à la fin des années 1990, avec l'arrivée sur le marché des premiers géosynthétiques bentonitiques. Ceux-ci se présentaient sous la forme de bentonite de sodium naturelle, conditionnée entre deux couches de géotextiles en polypropylène aiguilleté ou cousu. Cette différence de conteneur, associée, par exemple, à l'aiguilletage réalisé par de nombreux points de piquage des deux géotextiles, a rendu ce procédé d'étanchéité moins sensible à une préhydratation accidentelle avant confinement. L'aiguilletage intervient comme un véritable « frettage » de la bentonite, limitant l'effet de cette préhydratation uniquement au niveau des faces externes du GSB. Cette conception différente a eu pour conséquence de replacer les GSB dans la famille des procédés d'étanchéité susceptibles d'être mis en œuvre pour assurer l'étanchéité des tranchées couvertes (ligne B du métro de Toulouse, tranchées couvertes du TGV Méditerranée, prolongement de la ligne 13 du métro de Paris, etc. – photos 1 et 2).

Début 2000, le premier avis d'experts de l'AFTES (Association française des tunnels et de l'espace souterrain) a été décerné à un géotextile bentonitique pour l'étanchéité des tranchées couvertes. Dans le même temps, un avis technique du CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment) était également accordé à un géotextile bentonitique pour l'étanchéité des parties enterrées de bâtiment.

Au niveau européen, la publication en 2006 de la norme NF EN 13491 « Étanchéité des ouvrages souterrains » va

intégrer définitivement les GSB dans la liste officielle des procédés applicables à l'étanchéité des ouvrages souterrains français. Cette intégration va être confirmée en 2009 lors de la réactualisation en cours du Fascicule 67 – titre III, les GSB faisant désormais partie des huit familles de procédés d'étanchéité traités par ce référentiel technique.

Approche expérimentale sur le comportement des GSB en cas de préhydratation avant confinement

Lors de cette actualisation, le sous-groupe n° 6 de la Commission d'actualisation du Fascicule 67 titre III, chargé de la rédactionnel spécifique aux GSB, a voulu se prémunir définitivement contre le risque d'altération de la perméabilité de ceux-ci en cas de préhydratation accidentelle avant confinement par le bétonnage ou le remblaiement de l'ouvrage souterrain. Rappelons que c'est cette sensibilité, plus ou moins importante des GSB à l'eau de pluie ou d'infiltration qui les avait pratiquement éloignés dans les années 1980/1990 des chantiers d'étanchéité des ouvrages souterrains. À l'initiative du Centre d'étude des tunnels (CETU de Lyon Bron), des essais en laboratoire ont été réalisés avec la collaboration des laboratoires d'Irstea et de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon.

La démarche expérimentale retenue par le sous-groupe n° 6 consistait à simuler cette préhydratation en laboratoire sur des échantillons, selon trois modes opératoires différents, correspondant aux trois types de localisations rencontrés dans un ouvrage souterrain :

- en radier (GSB soumis à immersion) ;



1 Étanchéité du radier lors du chantier de prolongement de la ligne 13 du métro parisien.

© CETCO



2 Étanchéité des piédroits lors du chantier de prolongement de la ligne 13 du métro parisien.

© CETCO

- ▶ en piédroit (GSB soumis à aspersion en position verticale) ;
- en dalle supérieure (GSB soumis à aspersion en position horizontale).

Quatre types de GSB ont été testés. Ils correspondent aux produits les plus couramment commercialisés sur le marché français.

Le programme expérimental comportait les trois étapes suivantes :

- une identification de chaque GSB et une détermination de leurs performances hydrauliques sous une contrainte de 20 kPa suivant la norme (NF P 84-705 Géosynthétiques bentonitiques – Détermination à

l'oedoperméamètre des caractéristiques de gonflement, flux et perméabilité des géosynthétiques bentonitiques (GSB) – Essai de caractérisation et essai de performance) ;

- une préhydratation sur chaque GSB non confiné selon l'un des trois modes opératoires précités ;
- une détermination des performances hydrauliques sous 20 kPa des GSB préhydratés précédemment, sans confinement (photo 3 : gonflement avec contrainte, photo 4 : gonflement sans contrainte).

En fonction de la localisation du GSB dans l'ouvrage, les modes de préhydratation diffèrent :

- une immersion de cinq jours en position de radier ;
- une aspersion de cinq jours en position verticale pour une localisation en piédroit ;
- une aspersion de cinq jours en position horizontale pour une localisation en dalle supérieure.

Les résultats obtenus à l'issue de ce programme expérimental indiquent un bon maintien des performances hydrauliques pour les GSB aiguilletés, non recouverts lors d'un épisode pluvieux prolongé, avec une permittivité qui reste dans un rapport de un à trois. Cependant, ce constat n'est pas généralisable à tous les GSB. En effet, dans le cas du GSB cousu avec un lien épais (environ 0,7 mm d'épaisseur), les résultats obtenus mettent en évidence une réduction très nette des performances hydrauliques, avec une permittivité multipliée par mille dans le cas d'une préhydratation sans confinement en dalle supérieure, par rapport à un usage conforme, c'est-à-dire une hydratation sous contrainte. Le matériau ne constitue plus dans ce cas une étanchéité.

Ces résultats ont fait l'objet d'une publication au septième colloque des rencontres Géosynthétiques 2009 de Nantes (France), à la première conférence africaine sur les géosynthétiques de Cape Town (Afrique du Sud) et au troisième symposium international sur les GSB de Würzburg (Allemagne).

Nouvelles spécifications et prescriptions concernant la mise en œuvre des GSB pour assurer l'étanchéité des ouvrages souterrains

Caractéristiques minimales de la géométrie du support

La présence de creux et de cavités dans le support étant de nature à contrarier le confinement nécessaire au bon fonctionnement d'un GSB, la commission de révision du Fascicule 67 – titre III a proposé d'exclure les tunnels creusés, mécaniquement ou à l'explosif, du champ d'application des GSB pour l'étanchéité des ouvrages souterrains. En revanche, elle a accepté, en plus des tranchées couvertes, la mise en œuvre des GSB pour l'étanchéité des tunnels forés à la machine (voussoirs ou revêtement projeté après percement du tunnel à l'aide d'un tunnelier). Cette acceptation s'accompagne cependant d'une préparation géométrique des supports de tunnels plus poussée que celle exigée pour un DEG synthétique ; les creux dans le support sont par exemple interdits.



3 Gonflement avec contrainte.



4 Gonflement sans contrainte.

1 Exigences générales.

Propriétés physiques			Méthodes d'essais	Commentaires
Type de GSB	Géotextile bentonitique	Géofilm bentonitique		
Masse surfacique	*	*	NF EN 14196	* avec une teneur en eau à 0 % ≥ 4,75 kg de bentonite
Masse de bentonite par unité de surface	**	**	NF EN 14196	** avec une teneur en eau à 0 % ≥ 4,50 kg de bentonite
Capacité d'auto-cicatrisation	Fermeture visuelle	Fermeture visuelle	XP P 84-708	Vérification avec un poiçon Ø 20 mm à une contrainte de 10 kPa
Propriétés hydrauliques				
Perméabilité à l'eau (m/s)				
(a) en partie courante	< 5,10 ⁻¹¹	< 5,10 ⁻¹¹	NF P 84-705***	*** sous une contrainte de 10 kPa. Essai réalisé sur la bentonite avec son conteneur
(b) aux recouvrements	< 2,10 ⁻⁹ m ³ /s/ml	< 2,10 ⁻⁹ m ³ /s/ml	Pr NF P 84-706	Pour une largeur de recouvrement de 0,20 m et une charge hydraulique de 1 m
Indice de gonflement libre de la bentonite	****	****	XP P 84-703	**** ≥ 10 ml/2 g
Propriétés mécaniques				
Résistance à la traction (kN/m)	SP, ST ≥ 8	SP, ST ≥ 8	NF EN ISO 10319	SP : sens production ST : sens transverse
Déformation à la rupture (kN/m)	SP ≥ 10 % ST ≥ 6 %	SP ≥ 10 % ST ≥ 6 %	NF EN ISO 10319	Teneur en eau comprise entre 5 et 25 %
Poinçonnement statique N	≥ 1 800	≥ 1 800	NF EN ISO 12236	Teneur en eau comprise entre 5 et 25 %
Résistance au déchirement N	SP ≥ 800 N ST ≥ 700 N	SP ≥ 800 N ST ≥ 700 N	NF EN 12310-1	Résistance à la déchirure au clou dans les deux sens.
Exigence relative à la mise en œuvre				
Largeur de recouvrement (cm)	*****	*****		***** largeur ≥ 20 cm pour une hauteur d'eau < à 10 m Largeur ≥ 30 cm pour une hauteur d'eau > à 10 m.

2 Exigences spécifiques.

Exigences liées à la durabilité			Méthodes d'essais	Commentaires
Type de GSB	Géotextile Bentonitique	Géofilm bentonitique		
Résistance aux micro-organismes			NF EN 12225 ⁽¹⁸⁾	À vérifier en fonction du projet
Résistance chimique			XP P 84-703	Vérification de l'indice de gonflement en présence de l'eau du site et des contraintes du site (poids de l'ouvrage ou du remblai) Si $I_g < 20$ ml/2 g, cet essai est à compléter par une mesure de gonflement, flux et perméabilité, réalisé avec l'eau du site.
Hydratation / Dessiccation			CEN TS 14417	Vérification perméabilité après dessiccation du GSB
Gonflement, flux et perméabilité K (m/s)	$K < 1,10^{-10}$	$K < 1,10^{-10}$	NF P 84-705	Essai exercé sur la bentonite et son conteneur. Sur l'ensemble, détermination de la perméabilité à l'œdoperméamètre en utilisant l'eau du site et les contraintes apportées par l'ouvrage et les remblais.
Exigences liées à la sécurité et l'hygiène				
Comportement au feu	B _n s1	B _n s1	NF EN ISO 11925-2	
Caractéristiques d'identification-Contrôles				
Masse surfacique			NF EN 14196	S < 5 000 m ² ou par lot
Masse de bentonite par unité de surface			NF EN 14196	S < 5 000 m ² ou par lot, sur bentonite sèche
Indice de gonflement libre de la bentonite			XP P84-703	S < 5 000 m ² ou par lot



5 Pose GSB en radier.

Nouvelles spécifications françaises pour les GSB
mis en œuvre dans les ouvrages souterrains

Le référentiel technique pour l'utilisation des GSB pour assurer l'étanchéité des ouvrages souterrains a été validé en juin 2009 par la Commission de réactualisation du Fascicule 67 – titre III et par celle de l'avis technique CETU. La mise en œuvre des GSB pour assurer l'étanchéité des ouvrages souterrains n'est admise que pour les domaines d'application suivants :

- tranchée couverte sans pression hydrostatique (application n° 3 de la norme NF EN 13491 : géomembranes, géosynthétiques bentonitiques, caractéristiques requises pour l'utilisation dans la construction des tunnels et ouvrages souterrains) ;
- tranchée couverte avec une pression hydrostatique limitée à 0,2 MPa (application n° 4 de la norme NF EN 13491) ;
- tunnels forés réalisés avec un tunnelier sans pression hydrostatique (application n° 1 de la norme NF EN 13491).

Le référentiel n'admet pour les ouvrages souterrains que les procédés suivants :

- géotextiles bentonitiques cousus ou aiguilletés ;
- géofilms bentonitiques cousus ou aiguilletés.

Les tableaux 1 et 2 présentent synthétiquement les caractéristiques physico-mécaniques répondant aux exigences générales de mise en œuvre, de durabilité, de sécurité et d'hygiène et d'identification, applicables dès 2010, au GSB pour les marchés publics de travaux d'étanchéité des ouvrages souterrains.

Nouvelles prescriptions de mise en œuvre des GSB

Géosynthétiques bentonitiques associés à des géotextiles

Pour les tranchées couvertes, le procédé d'étanchéité à base de géosynthétique bentonitique associé à des géotextiles comprend en radier :

- un géosynthétique bentonitique mis en œuvre directement sur le béton de propreté (photo 5) ;
- une protection supérieure qui, par rapport au géosynthétique bentonitique, aura une fonction de mise hors d'eau (cette mise hors d'eau permet de garantir la fonction étanchéité du géosynthétique bentonitique avant son confinement par le béton du radier) et/ou de protection mécanique avant ferrailage (la nature de ces protections de mise hors d'eau avant confinement du GSB par le radier devra être précisée dans la composition du procédé).

Le procédé comprend en piédroits :

- un géosynthétique bentonitique mis en œuvre en indépendance directement sur le béton du piédroit pour les ouvrages réalisés sans emprise (sans soutènement), ou sur le soutènement pour les ouvrages réalisés avec emprise (avec soutènement) – photo 6.
- une protection supérieure qui par rapport au géosynthétique bentonitique, aura une fonction de mise hors d'eau et/ou de protection mécanique avant ferrailage pour les ouvrages réalisés avec emprise.

Le maître d'œuvre peut demander à l'entrepreneur la réalisation d'essais de laboratoire confirmant le non-cheminement de l'eau entre le GSB et le support en béton coulé, notamment pour les ouvrages avec emprise.

Enfin, le procédé comprend en dalle supérieure ou en voûte :

- une couche de bentonite en vrac, éventuellement mise en œuvre directement sur la dalle supérieure (en fonction du cahier des charges technique du procédé) ;
- un géosynthétique bentonitique ;
- une protection supérieure en géotextile d'une masse surfacique minimale de 700 g/m² (voir revue *Tunnels et ouvrages souterrains*, n° 183, pour les caractéristiques physicomécaniques de ce géotextile).

Géosynthétiques bentonitiques associés à un géofilm

Pour les tranchées couvertes, le procédé d'étanchéité à base de géosynthétique bentonitique associé à un géofilm comprend en radier :

- un géosynthétique bentonitique mis en œuvre directement sur le béton de propreté. Celui-ci est mis en œuvre face géotextile côté béton de propreté ;
- une protection supérieure qui aura une fonction de protection mécanique avant ferrailage.

Le procédé comprend en piédroits :



6 Pose GSB en piédroit- ouvrage avec emprise.

- pour les ouvrages réalisés sans emprise : un géosynthétique bentonitique mis en œuvre directement sur le béton du piédroit. Celui-ci est mis en œuvre face géotextile côté béton du piédroit, la face géofilm se trouvant côté remblaiement ;

- pour les ouvrages réalisés avec emprise : un géosynthétique bentonitique mis en œuvre directement sur le soutènement. Celui-ci est mis en œuvre face géotextile côté soutènement, la face géofilm se trouvant côté du piédroit à couler.

Enfin, le procédé comprend en dalle supérieure :

- une couche de bentonite en vrac, éventuellement mise en œuvre directement sur la dalle supérieure ;
- un géosynthétique bentonitique. Celui-ci est mis en œuvre face géotextile côté béton de la dalle supérieure, la face géofilm se trouvant côté remblaiement ;
- une protection supérieure en géotextile d'une masse surfacique minimale de 700 g/m².

Pour les tunnels forés (creusement mécanique) le procédé d'étanchéité à base de géosynthétique bentonitique associé à un géofilm comprend en radier :

- un géosynthétique bentonitique mis en œuvre directement sur le béton de propreté. Celui-ci est mis en œuvre face géotextile côté béton de propreté, la face géofilm se trouvant coté radier à couler ;
- une protection supérieure qui aura une fonction de protection mécanique avant ferrailage.

Le procédé comprend en voûte et piédroits :

- un géosynthétique bentonitique mis en œuvre directement sur le soutènement de la voûte et des piédroits (béton projeté, voussoirs en béton, etc.). Celui-ci est mis

- ▶ en œuvre face géotextile côté béton de la voûte et des piédroits à couler, la face géofilm se trouvant côté soutènement, ou voussoir béton.

Pour ce type d'ouvrage, ce procédé d'étanchéité par hydrogonflement présente désormais un rapport coût/durabilité – développement durable, etc., relativement intéressant. ■

Conclusions

Ces nouvelles spécifications devraient favoriser le développement de la mise en œuvre, des géosynthétiques bentonitiques, plus particulièrement ceux associés à un géofilm, pour l'étanchéité des tranchées couvertes et plus spécialement des structures dites intégrées.

Les auteurs

Jean-Louis MAHUET

EGIS Rail, Immeuble Le Carat,
170 avenue Thiers, 69455 Lyon Cedex 06
✉ jean-louis.mahuet@egis.fr

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- 📄 **AFTES**, Association française des tunnels et de l'espace souterrain, Fascicule 67 – Titre III du 22 janvier 1992, *Étanchéité des ouvrages souterrain*, AFTES C/o SNCF, www.aftes.asso.fr
- 📄 **AFTES**, Groupe de travail n° 9, *Étanchéité et drainage des ouvrages souterrains*, Commission des avis d'experts « Procédés ou produits d'étanchéité innovants ».
- 📄 **CETU**, Centre d'études de tunnels, 2009, Influence de l'hydratation de géosynthétiques bentonitiques avant confinement sur leur performance hydraulique, Études expérimentales réalisées par INSAVALOR – LGCIE Coulomb et Irstea, UR HBAN.
- 📄 **MAHUET, J.-L., MAZZOLENI, G., TOUZE-FOLTZ, N.**, 2009, Influence d'une préhydratation sans confinement sur les performances hydrauliques d'un géosynthétique aiguilleté, in : *Rencontres géosynthétiques 2009 du CFG*, Nantes, France.
- 📄 **MAHUET, J.-L., MAZZOLENI, G., TOUZE-FOLTZ, N.**, 2009, Influence of prehydration without load on the hydraulic performance of geosynthetic clay liners, in : *Première conférence africaine sur les géosynthétiques*, Cape Town, Afrique du Sud.

▶ Consulter l'ensemble des références sur le site de la revue www.set-revue.fr