

Réactualisation du guide sur l'équivalence en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets

Dominique Guyonnet ^a, Olivier Bour ^b, Alain Couradin ^c, Gérard Didier ^c, Laurent Eisenlohr ^d, Isabelle Hébé ^e, Véronique Norotte ^c et Nathalie Touze-Foltz ^f

La notion « d'équivalence » est actuellement invoquée dans le cadre de la réalisation de barrière passive pour la création de nouvelles installations de stockage ou pour des extensions d'installations existantes (JORF¹, 2003 ; JORF, 1997 ; JOCE², 1999). Il est rappelé que deux barrières d'étanchéité passive sont considérées comme « équivalentes » lorsqu'elles assurent un même niveau de protection en termes d'impact potentiel d'une installation de stockage sur une ressource en eau souterraine. Face à l'augmentation du nombre de dossiers faisant appel à cette notion, le ministère en charge de l'environnement a souhaité que plusieurs organismes publics (ADEME, BRGM, Cemagref, CETE-Lyon, INERIS, INSA-Lyon), susceptibles d'intervenir dans le cadre de tierce-expertises relatives à des dossiers de demande d'autorisation, élaborent un guide de recommandations afin de définir quelques règles de bonne pratique. La première version du « Guide Équivalence » est parue en juillet 2002. Depuis cette date, son utilisation

a mis en évidence certaines lacunes et points à compléter. En novembre 2007, une réunion dite de « retour d'expérience » a réuni des représentants des principaux exploitants d'installations de stockage de déchets (ISD), des fournisseurs de matériaux et des bureaux d'études. Cette réunion a permis de recueillir de nombreux avis sur le contenu du guide et de mieux orienter sa réactualisation.

Cet article évoque les principales modifications ou précisions apportées par rapport à la version antérieure dans laquelle, par exemple, la question des flancs des installations de stockage n'était que peu abordée. Par ailleurs, la nouvelle version apporte des précisions concernant l'utilisation de certains matériaux alternatifs, typiquement employés dans un contexte d'équivalence. Le guide expose les différentes solutions d'équivalence à disposition. En effet, chaque solution présente des avantages et des inconvénients suivant les conditions spécifiques de chaque configuration particulière.

1. Journal officiel de la République française.

2. Journal officiel des communautés européennes.

Les contacts

- a. BRGM, Bureau de recherche géologique et minière, avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2.
- b. INERIS, Institut national de l'environnement industriel et des risques, rue Jacques Taffanel, 60550 Verneuil en Halatte.
- c. INSA-Lyon, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 20 avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex.
- d. CETE-Lyon, Centre d'études techniques de l'équipement de Lyon, 25 avenue François Mitterrand, case n° 1, 69674 Bron Cedex.
- e. ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Centre d'Angers, 20 square du Grésille, 49000 Angers.
- f. Cemagref, UR HBAN, Hydrologie et bioprocédés, Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony Cedex.

Distinction barrière passive/ barrière active

Le stockage des déchets en France s'appuie sur le principe des barrières multiples (tableau 1). Une barrière dite « active » est installée à la base des déchets : il s'agit d'un système d'étanchéité-drainage, constitué typiquement d'un horizon drainant surmontant une géomembrane. Cette barrière surplombe la barrière dite « passive » qui est constituée par le milieu géologique naturellement en place, ou qui peut être « rapportée » (reconstituée artificiellement). Il est important de souligner la complémentarité de ces deux niveaux de sécurité. La barrière de sécurité active permet la collecte, en vue de leur traitement, des flux polluants liquides durant la période où ces flux sont les plus importants (les lixiviats sont les plus chargés). Cette barrière active n'est pas supposée fonctionner *ad vitam æternam*. D'une part, les niveaux drainants peuvent se colmater avec le temps, et d'autre part, les membranes vieillissent et peuvent développer des défauts liés notamment aux contraintes mécaniques. La barrière passive pourra donc être sollicitée, en tout cas dans le long terme, mais à un moment où la majorité de la charge polluante des lixiviats aura été traitée. Dans ce cas, on peut s'attendre à ce que le débit de fuite résiduel (à long terme) n'entraîne pas de nuisances pour le milieu environnant.

Une conséquence de cette complémentarité pour le calcul d'équivalence évoqué précédemment, est qu'un renforcement de l'une des barrières (active ou passive) ne peut, sur le principe, pallier une insuffisance de l'autre barrière. Bien qu'il ne fasse aucun doute qu'une barrière composite (géomembrane + couche minérale faiblement perméable) ait de bien meilleures performances hydrauliques que l'une ou l'autre de ces barrières prise indépendamment (Touze-Foltz *et al.*, 2005), le calcul d'équivalence effectué pour la barrière passive considère uniquement les éléments constitutifs de cette barrière et ne prend notamment pas en compte la présence d'une géomembrane.

3. Géosynthétique bentonitique.

4. Mélange sable-bentonite-polymère.

▼ Tableau 1 – Distinction entre barrière « active » et « passive ».

	Fonctions	Matériaux
Barrière dite « active »	Drainage	Granulaires, synthétiques
	Étanchéité active	Géomembrane
Barrière dite « passive »	Étanchéité passive	Argiles naturelles, GSB ³ , sols traités, SBP ⁴
	Atténuation	Milieu géologique naturel

L'évaluation de l'équivalence se situe dans un cadre « semi-générique ». Tandis qu'elle fait intervenir des différences entre les dispositifs de barrière passive, on ne « joue » pas sur le paramétrage des caractéristiques hydrodynamiques (plus ou moins « diluant ») de l'aquifère représentant la cible, pour pallier d'éventuelles insuffisances de la barrière naturelle ou rapportée (à moins qu'il n'y ait absence avérée de vulnérabilité de cette cible). L'objectif de l'évaluation de l'équivalence peut donc être formulé de la manière suivante : *Toutes choses étant égales par ailleurs, est-ce que la configuration proposée pour la barrière passive procure un niveau de protection équivalent à celui que procure la configuration de base prévue par la réglementation en vigueur ?*

Pour le législateur, l'équivalence a pour objectif de permettre à l'exploitant d'apporter des garanties suffisantes pour la protection de l'environnement dans des situations qui ne se prêtent pas naturellement aux prescriptions réglementaires. L'équivalence ne doit donc pas être considérée simplement comme un moyen d'améliorer la rentabilité économique du stockage (réduction des coûts des matériaux et/ou de leur mise en œuvre, augmentation de la capacité de stockage par l'utilisation d'une barrière moins épaisse, etc.), mais doit être motivée techniquement.

La principale cible concernée par les flux polluants traversant les barrières d'étanchéité passive en fond d'installation de stockage étant l'eau souterraine, *deux barrières d'étanchéité passive seront considérées comme « équivalentes » lorsqu'elles assurent un même niveau de protection en termes d'impact potentiel d'une installation de stockage sur une ressource en eau souterraine.*

Le contenu de la note d'équivalence

Le retour d'expérience que l'on peut avoir sur les dossiers d'équivalence suggère que, trop souvent, les dossiers s'appuient largement sur des calculs théoriques plutôt que sur des études géologiques et hydrogéologiques suffisamment complètes. Mais ces calculs théoriques sont fortement limités par les hypothèses simplificatrices des modèles utilisés (Guyonnet *et al.*, 2007). Aussi est-il essentiel d'appuyer le plus possible le dossier d'équivalence sur des éléments concrets de l'étude géologique et hydrogéologique pour être en mesure de répondre à certaines questions clés,

et notamment : quel est le degré de connaissance de la perméabilité des matériaux en place, quel est le degré de compréhension du système hydrogéologique, quelles sont les cibles vulnérables (sources, AEP⁵...), etc. ? Ces éléments doivent figurer dans le dossier de demande d'autorisation d'exploiter (DDAE) et il paraît important que la note justificative de l'équivalence fasse la synthèse des principaux points du dossier relatifs à ces questions.

La définition du contexte géologique et hydrogéologique local constitue le préalable au choix de l'implantation d'une installation de stockage. Les données géologiques recueillies lors de la phase documentaire permettent d'orienter le choix du dispositif de barrière passive, avec éventuellement la définition d'une barrière passive qui est équivalente, en termes d'impact, à la barrière prévue par la réglementation. Si des ressources locales sont disponibles, on s'orientera de préférence vers une barrière passive constituée de matériaux argileux naturels, qui permettent de se conformer au mieux aux prescriptions réglementaires. Si les conditions locales ne sont pas totalement favorables, des matériaux alternatifs pourront être considérés.

La définition du contexte hydrogéologique doit notamment permettre d'identifier les cibles et d'évaluer les caractéristiques du transfert de la source de polluant vers une nappe identifiée comme ressource en eau. Les éléments de connaissance du contexte hydrogéologique sont souvent les mêmes que ceux qui ont été nécessaires pour l'élaboration du dossier de demande d'autorisation d'exploiter. Aussi est-il recommandé de reprendre ces éléments en les synthétisant pour les adapter au contexte particulier du dossier d'équivalence.

La présence d'une nappe très peu profonde constitue souvent une des raisons de la recherche d'une solution d'équivalence. L'épaisseur non saturée du niveau semi-perméable ($K \leq 10^{-6}$ m/s) de la barrière passive est alors réduite et il est nécessaire de prévoir le renforcement du niveau peu perméable à $K \leq 10^{-9}$ m/s. Le niveau statique moyen et le battement moyen et maximal d'une éventuelle nappe libre peu profonde doivent également être évalués. Un battement de nappe relativement important nécessite de considérer un scénario sécuritaire de transfert en prenant en compte le niveau des plus hautes eaux connues.

Le « Guide Équivalence » présente les différents éléments devant figurer *a minima* dans la note justificative de l'équivalence. On pourra citer notamment :

- la synthèse de la caractérisation du milieu géologique et hydrogéologique ;
- l'inventaire des cibles potentielles (AEP, etc.). Il s'agit d'éléments du dossier de demande d'autorisation d'exploiter ;
- le schéma conceptuel. Ce schéma est une synthèse (graphique) de la situation géologique et hydrogéologique, qui permet notamment de mieux comprendre les directions d'écoulement et d'apprécier la vulnérabilité des éventuelles cibles identifiées ;
- le projet de dispositif de barrière passive, en s'appuyant sur des schémas faisant apparaître clairement les cotes des différents niveaux, les cotes piézométriques, la cote de la base des alvéoles et la position des flancs ;
- la démonstration de l'aptitude du matériau à être utilisé comme composante d'une barrière reconstituée (caractéristiques physiques, chimiques, géotechnique du matériau, perméabilité...);
- les prescriptions de mise en œuvre qui seront définies au travers d'un programme d'essai en laboratoire, validées ou adaptées lors d'une planche d'essai sur site ;
- la proposition d'un programme de contrôle de mise en œuvre interne, externe et extérieur ;
- une évaluation, au moins qualitative, des effets à long terme (stabilité mécanique, stabilité chimique, etc.) ;
- les différents éléments qui peuvent être favorables d'un point de vue de l'équivalence de l'impact potentiel : nature particulière des déchets enfouis, configuration particulière du site, ou toute particularité pouvant diverger du schéma classiquement prévu par la réglementation ;
- dans certains cas, une évaluation quantitative ou semi-quantitative de l'impact potentiel sur les eaux souterraines au droit du site, pour la configuration de barrière proposée, comparé à celui obtenu pour la barrière réglementaire.

On note donc que le calcul proprement dit n'est pas obligatoire dans tous les cas de figure. La démonstration de l'équivalence peut parfois découler naturellement des éléments précédents.

5. Alimentation en eau potable.

Encadré 1

Documents réglementaires utiles

JOCE, 1999, Directive 1999/31/CE du Conseil du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets, Journal officiel des communautés européennes, n° L 182 du 16/07/1999, Journal officiel des communautés européennes, n° L 332 du 28/12/2000.

JORF, 2003, Arrêté du 30 décembre 2002 relatif au stockage de déchets dangereux, Journal officiel de la République française du 16 avril 2003.

JORF, 1997, Arrêté du 9 septembre 1997 modifié relatif aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés non dangereux, Journal officiel de la République française des 2 octobre 1997, 2 mars 2002, 19 avril 2002 et 16 mars 2006.

AFNOR, 2009, Guide de bonnes pratiques pour les reconnaissances géologiques, hydrogéologiques et géotechniques de sites d'installation de centres de stockage de déchets, Norme X 30-438.

CFG, 1998, Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques, Comité français des géosynthétiques, Fascicule n° 12.

Recommandations spécifiques pour la mise en œuvre du principe d'équivalence

Les flancs

Les talus peuvent constituer un des points délicats de l'aménagement des installations de stockage, notamment pour respecter une perméabilité inférieure à 10^{-9} m/s sur au moins un mètre. La difficulté de compacter de l'argile sur les flancs peut motiver la recherche d'une solution équivalente. Par rapport à la sollicitation hydraulique des flancs, il convient de noter que si la réglementation en vigueur préconise une hauteur maximale de lixiviats de 0,3 m au-dessus du système drainant, en l'absence de collecte gravitaire (cas général des sites en comblement), il est très difficile de respecter (et surtout de contrôler) cette limite. Il est donc vraisemblable que les talus seront sollicités d'un point de vue hydraulique (*a fortiori* en cas de recirculation des lixiviats), quoique moins que le fond de forme. Pour la définition d'une équivalence limitée à la zone des talus, il est nécessaire de rechercher une solution garantissant une stabilité à court et long terme ainsi qu'une mise en œuvre facilitée. Dans tous les cas, la couche de fond de un mètre à 10^{-9} m/s sera complétée en sa périphérie par des merlons constitués du même matériau compacté, de manière à assurer un fond en forme de « bassin ». La hauteur de ces merlons ne devrait pas être inférieure à 2 m au-dessus du fond de forme

(cf. arrêté de 1997 modifié). Pour ce qui concerne les flancs situés au-dessus des deux mètres on pourra distinguer deux situations.

PENTES FAIBLES À MOYENNES ($\leq 1V/3H$)

Dans ce cas, le compactage d'argile ($\lambda < 10^{-9}$ m/s) sur pente devrait être possible sur au moins 0,3 m d'épaisseur, avec un renforcement par un matériau alternatif. On peut également utiliser un mélange sable-bentonite-polymère (SBP), dont des réalisations, notamment aux Pays-Bas, suggèrent que ce type de matériau se prête bien à un compactage sur pente faible à moyenne. Dans le cas où un GSB est utilisé seul sur les flancs, une attention toute particulière devra être apportée à l'état de surface (remarque qui est également vraie pour toute couche fine). En cas de présence d'éléments grossiers ou de défauts majeurs de planéité, il est indispensable de prévoir un dispositif de protection (matériau fin et/ou géosynthétique). Par ailleurs, le recouvrement des lés des GSB doit être plus important qu'en fond, avec un degré de recouvrement qui dépend de la longueur de rampant.

Comme il a été évoqué par le groupe de travail « Utilisation des GSB dans les installations de stockage de déchets », organisé par le Comité français des géosynthétiques (CFG), l'expérience montre que lorsqu'un GSB est placé sous une géomembrane exposée, comme c'est le cas pour les flancs durant des périodes parfois significatives, une séparation des lés de GSB peut être

observée (laissant des portions de flancs sans barrière passive), phénomène que certains auteurs attribuent à :

- un retrait de la bentonite dû à la dessiccation ;
- une largeur de recouvrement insuffisante ;
- la présence d'une géomembrane texturée en contact avec le GSB ;
- une tension dans le GSB sur pente conduisant à une réduction des dimensions dans le sens de la largeur.

Les préconisations du groupe de travail visant à limiter ces effets sont :

- d'augmenter la largeur de recouvrement des lés, avec un minimum de 0,3 m ;
- de protéger la géomembrane pendant la phase d'exposition afin de limiter l'augmentation de la température ;
- de ne pas laisser les géomembranes exposées lorsqu'elles recouvrent un GSB ;
- de ne pas utiliser des GSB comportant des géotextiles non tissés aiguilletés des deux côtés de la bentonite.

Les recommandations du groupe de travail concernant le recouvrement des lés sont actuellement les suivantes :

- ≤ 5 m de rampant : 0,3 m de recouvrement ;
- entre 5 et 20 m : 0,4 m ;
- > 20 m : 0,6 m.

PENTES MOYENNES À FORTES ($> 1V/3H$)

De manière générale, les pentes fortes ne sont pas conseillées, pour d'évidentes raisons de stabilité mécanique. Lorsque le contexte ne permet pas de les éviter, l'utilisation de matériau argileux naturel n'est pas envisageable. Pour des pentes supérieures à 1V/3H, on pourra, soit s'orienter vers l'utilisation de GSB avec un renforcement de la largeur de recouvrement, sous réserve de démonstration de la stabilité du complexe d'étanchéité proposé compte tenu de la pente, soit réaliser une étude de stabilité pour examiner la faisabilité d'une utilisation de mélange SBP.

Un point particulièrement important à prendre en compte en cas de forte pente est la résistance mécanique de l'ensemble des couches superposées. On cherchera à éviter la transmission

de sollicitation mécanique vers la composante d'étanchéité. Des systèmes d'ancrage des GSB sur pente sont proposés dans le fascicule n° 12 du CFG. On cherchera également à renforcer la fonction drainage, *a fortiori* dans le cas de recirculation de lixiviats dans les déchets. Par ailleurs, comme pour les flancs de pentes faibles à moyennes, une attention particulière devra être portée sur l'état de surface de la couche support, avec une compensation (à définir) dans le cas d'une surface altérée.

Un calcul de stabilité sera inclus dans la note justificative du dispositif. La stabilité mécanique de l'ensemble dépend de la nature des matériaux utilisés, des pentes, des longueurs de rampant, et des éventuels ancrages intermédiaires. La stabilité de chaque interface doit être considérée de manière individuelle afin de s'assurer qu'il n'existe pas d'interface potentiellement défaillante. Sur pente forte et sur de grandes longueurs de rampants, il peut être décidé d'utiliser des risbermes pour réduire la sollicitation mécanique des géomatériaux. Dans ce cas, la barrière passive pourra être reconstituée dans les zones de replat des risbermes, avec de l'argile compactée ($K < 10^{-9}$ m/s) si leurs dimensions permettent le passage d'un engin de compactage, ou avec des matériaux alternatifs. Il est alors recommandé une épaisseur minimale de 0,5 m et une remontée de l'argile sur les flancs sur une hauteur de 1 m.

Pour ce qui concerne le calcul d'équivalence sur les flancs, des calculs peuvent être réalisés à l'aide des outils évoqués en annexe du guide, mais l'utilité du calcul d'équivalence proprement dit est très sujette à caution. En effet, la problématique des flancs est autrement plus complexe que celle des fonds car la composante « stabilité mécanique » y est prépondérante. Dans ces conditions, il vaut mieux réserver le calcul à celui de la stabilité, en prenant en compte les angles de frottement de chaque interface. La solution équivalente sur les flancs peut être argumentée de manière qualitative, en invoquant notamment la stabilité mécanique ou l'amélioration du drainage sur les flancs permettant de réduire les risques de mise en charge par des nappes perchées. Il est par ailleurs indispensable que les moyens mis en œuvre pour le pompage des lixiviats permettent réellement d'éviter que le niveau de lixiviats ne se situe au-dessus de 2 m par rapport au fond de forme, c'est-à-dire le niveau de remontée de l'argile compactée de la barrière passive.

Les configurations particulières (présence de nappes perchées) peuvent amener à installer des systèmes drainants sous l'étanchéité passive afin d'éviter des pressions hydrauliques depuis l'extérieur du stockage vers l'intérieur, s'exerçant sur le système de barrière. Dans le cas d'utilisation de GSB, on utilisera un géocomposite de drainage associant une âme drainante à un géotextile filtre en contact avec le GSB. Concernant le cas particulier de sites où les déchets remontent sur une digue périphérique, il convient de noter que dès lors que du déchet repose sur un support minéral, celui-ci est considéré comme un fond ou un flanc, et à ce titre doit comporter une barrière active et une barrière passive.

Les matériaux alternatifs

LES GÉOSYNTHÉTIQUES BENTONITIQUES (GSB)

Des recommandations pour la mise en œuvre de ces matériaux sont proposées dans CFG (1998), actuellement en cours de révision. Les performances des GSB ont fait l'objet d'un programme de recherche sur la période 2001-2008 (Guyonnet *et al.*, 2009b, 2008, 2005 ; Touze-Foltz *et al.*, 2006 ; Norotte *et al.*, 2004) qui a bénéficié du soutien de l'ADEME, d'exploitants d'ISDND⁶ et de plusieurs fournisseurs de GSB. Ce programme a permis d'identifier certains critères devant permettre d'améliorer les garanties de bonnes performances des matériaux.

Une des principales causes d'augmentation de la perméabilité des GSB à base de bentonite sodique est l'échange d'ions entre la bentonite et les fluides avec lesquels la bentonite vient en contact. Si la bentonite échange son sodium pour

des cations divalents (calcium, magnésium...), la perméabilité du GSB peut augmenter. Pour éviter ou atténuer des effets négatifs, il faut notamment que :

- le GSB soit pré-hydraté par un fluide pauvre en cations divalents ;
- le GSB soit rapidement sous contrainte ;
- la bentonite du GSB ait une proportion faible en carbonate de calcium.

La première condition est normalement remplie lorsque le GSB est protégé par une géomembrane, comme c'est le cas en étanchéité de fond : le GSB va s'hydrater avec la vapeur d'eau du sol support. Dans le cas d'un sol support calcaire, il est recommandé de vérifier l'effet d'un transfert des ions calcium (ions Ca^{2+}) du sol vers la bentonite du GSB, sur les performances hydrauliques du GSB. La deuxième condition est remplie dès lors que le massif drainant est mis en place et que des déchets sont stockés dans le casier. La troisième condition peut être vérifiée à l'aide d'un essai en laboratoire, rapide et peu coûteux. Il convient de rappeler que la bentonite, terme industriel et non minéralogique, est en fait un mélange de minéraux dont la phase gonflante, la smectite, n'est qu'un représentant (bien que le plus abondant si la bentonite est de bonne qualité). Dans le cas d'une bentonite sodique, si la proportion de carbonate de calcium est importante, le carbonate peut se dissoudre lors du contact avec de l'eau et libérer des ions Ca^{2+} , ce qui peut entraîner une altération à terme des performances hydrauliques. Le tableau 2 (adapté de Guyonnet *et al.*, 2009b) propose des indicateurs, rapides à contrôler, qui permettent

6. Installations de stockage de déchets non dangereux.

► Tableau 2 – Indicateurs permettant de contrôler les GSB sodiques utilisés en étanchéité de fond de casier d'ISDND.

Indicateur	Valeur	Commentaires
Masse surfacique (kg/m^2) NF EN 14196	5	Masse sèche de bentonite (à 0 % de teneur en eau)
Indice de gonflement libre (IG) XP P 84-703	$\geq 24 \text{ cm}^3/2 \text{ g}$	Valeur qui apparaît généralement dans les fiches produits des GSB
Capacité d'échange cationique (CEC) NFX 31.130	$\geq 70 \text{ meq}/100 \text{ g}$	Corrélié à la proportion de smectite
Proportion de CaCO_3 NF P 94-048	$\leq 5 \%$ pondéral	Cette proportion de CaCO_3 aurait, après dissolution, la capacité de saturer une CEC de 75 meq/100 g avec des ions Ca^{2+}
Isotopes carbone et oxygène	--	Dans le cas où l'on souhaite connaître l'origine de la bentonite

Note : tous les pourcentages pondéraux sont exprimés par rapport à la masse sèche de la bentonite (0 % de teneur en eau).

de vérifier si un GSB sodique paraît adapté à une utilisation en étanchéité de fond d'ISDND.

On notera qu'une différence significative avec la version de 2002 du « Guide Équivalence » est qu'il n'est plus préconisé d'utiliser des GSB à base de bentonite sodique naturelle plutôt qu'activée. En effet, les données scientifiques disponibles suggèrent que ce n'est pas tant le processus d'activation mais plutôt la présence de carbonate de calcium qui peut être préjudiciable aux performances des GSB. S'il est clair que certaines bentonites naturellement sodiques sont très performantes, il n'est pas du tout exclu, au vu des données scientifiques récentes, qu'une bentonite sodique activée puisse présenter de bonnes performances hydrauliques, à condition qu'elle respecte au moins les critères du tableau 2 précité.

Concernant la valeur de perméabilité à utiliser, dans les calculs d'équivalence (le cas échéant) pour les GSB à base de bentonite sodique, on préconise une valeur de 5×10^{-11} m/s. En effet, les mesures présentées dans Guyonnet *et al.* (2009b), réalisées au laboratoire sur les principaux GSB à base de bentonite sodique utilisées en étanchéité de fond d'ISD en France, font état de valeurs situées entre 1 et 4×10^{-11} m/s, pour des contraintes de confinement de l'ordre de 100 kPa. Une valeur de 5×10^{-11} m/s pour la perméabilité en situation de service semble donc correspondre à une situation pouvant être jugée comme étant « normale ».

LES SOLS TRAITÉS

Les sols traités recouvrent notamment les traitements de sols *in situ* par « pulvimixeur », par amendement de matériaux locaux (par exemple sablo-limoneux), par de la bentonite sodique, de la bentonite calcique ou de la kaolinite, etc. En raison de leurs caractéristiques particulières (homogénéisation en centrale, couche de faible épaisseur et très faible perméabilité), les mélanges sable-bentonite-polymère (SBP) sont traités à part.

Il est courant de voir, dans les DDAE, que le soumissionnaire envisage le traitement d'un sol avec un adjuvant devant permettre d'atteindre la perméabilité de 10^{-9} m/s, sans qu'il y ait d'informations ni sur le type de sol, le type d'adjuvant, ou encore la formulation du traitement et donc sur la capacité de la solution proposée à atteindre l'objectif de perméabilité visé. Une difficulté

provient du fait qu'au stade du DDAE, il demeure de nombreuses inconnues sur la mise en œuvre précise des solutions envisagées. Par contre, certaines informations peuvent généralement être fournies permettant de démontrer un tant soit peu la faisabilité technique de la solution proposée. En particulier, quelques essais en laboratoire réalisés avec différentes proportions d'adjuvants (Couradin *et al.*, 2008) permettent d'éliminer en amont des solutions irréalistes et sélectionner les solutions viables. Par ailleurs, les grandes lignes d'un plan d'assurance qualité (PAQ), destiné à garantir la bonne mise en œuvre, peuvent également être proposées au stade du DDAE. On pourra se référer au guide AFNOR⁷ (2009) pour avoir des éléments concernant les PAQ pour la mise en œuvre de matériaux rapportés ou traités. On notera qu'un guide spécifique, dédié à la mise en œuvre et au contrôle des matériaux fins pour le confinement des déchets, est actuellement à l'étude.

LES MÉLANGES SABLE-BENTONITE-POLYMÈRE (SBP)

Les mélanges sable-bentonite-polymère en couche mince, particulièrement utilisés aux Pays-Bas mais également dans d'autres pays, commencent depuis quelques années à être utilisés en France. Les résultats d'expérimentations réalisées par des membres du groupe de travail du guide (Guyonnet *et al.*, 2009a) plaident en faveur d'une éligibilité, au même titre que d'autres matériaux, des mélanges SBP dans un contexte de solution équivalente.

Les mélanges sable-bentonite-polymère (SBP) mis en œuvre surtout aux Pays-Bas pour des applications d'étanchéité d'ISDND sont constitués, sur site, par malaxage en centrale mobile d'un sable avec de la bentonite et du polymère en proportions environ 87,7 %, 12 %, 0,3 % respectivement (par rapport au poids sec). Le matériau est compacté sur une épaisseur d'au moins 0,07 m. Ainsi, la quantité de bentonite au mètre carré est d'au moins 13 kg. Mais la fabrication du mélange nécessite le choix d'un sable ayant des caractéristiques précises. La mise en œuvre avec pelle mécanique et compacteur doit être accompagnée d'un protocole de contrôle qualité très complet. Il est recommandé notamment que la perméabilité du matériau soit mesurée *in situ* sur planche d'essai, comme pour un sol amendé classique. La valeur de perméabilité mesurée *in situ* est typiquement inférieure à 5×10^{-11} m/s.

7. Association française de normalisation.

La pose doit être précédée d'une vérification de l'état et de la compaction du fond de forme avant la mise en œuvre et doit être accompagnée d'un contrôle régulier de l'épaisseur. Ces éléments font partie du plan d'assurance qualité de la mise en œuvre. Comme pour un GSB, le fond de forme doit être régulier et exempt de toute aspérité notable risquant d'endommager la couche de matériau posée. L'ensemble des constituants du SBP doit être stocké dans des lieux secs afin de pouvoir constituer et mettre en place le mélange dans de bonnes conditions. Comme pour la mise en œuvre de matériaux fins, le SBP doit être posé dans des conditions climatiques sèches.

On notera que l'utilisation de l'appellation générique « SBP », qui consiste à mélanger des matériaux naturels (sable et bentonite) avec un matériau synthétique (polymère), implique que le fournisseur puisse apporter un certain nombre de garanties quant aux caractéristiques et performances. On citera en particulier : la stabilité biologique du polymère (en conditions aérobie et anaérobie), son innocuité sur le plan sanitaire, la stabilité mécanique du mélange SBP (angles de frottement, cisaillement, etc.), sa stabilité chimique vis-à-vis de jus de décharge (ou d'autres fluides, le cas échéant), sa résistance aux intempéries (effet de la température ou de la dessiccation) ou encore la faible perméabilité du matériau, mesurée en laboratoire mais aussi (et surtout) sur le terrain.

Conclusions

Un problème important dans le contexte de l'équivalence est celui de la réduction d'épaisseur de la couche de 1 m de faible perméabilité. Dans le guide, il est suggéré que le facteur « épaisseur » de la couche de matériau argileux n'est

pas uniquement à considérer d'un point de vue strictement hydraulique (influence sur le gradient hydraulique), mais qu'il constituait également un gage de sécurité de par les garanties de stabilité (chimique, mécanique) qu'il apporte comparé à certains matériaux alternatifs, et parce qu'une épaisseur plus importante réduit la probabilité de connexion (chemins préférentiels) de part et d'autre de la barrière. C'est pourquoi les exemples de calcul présentés dans le guide proposent l'utilisation de matériaux alternatifs en renforcement d'une couche de 1 m de faible perméabilité (pour pallier une insuffisance de la couche de 5 m à 10^{-6} m/s) plutôt qu'en substitution de cette couche. Toutefois, lorsque la connaissance du contexte hydrogéologique montre l'absence de ressource en eau souterraine vulnérable et l'absence de lien avec une telle ressource, l'épaisseur de la couche minérale peu perméable reconstituée pourra être réduite, avec un renforcement par un matériau alternatif, de manière à ce que l'épaisseur totale de matériaux peu perméables soit d'au moins 0,5 m ; valeur préconisée par la directive européenne. Mais cette possibilité entraîne le corollaire suivant : si l'on est en présence d'une ressource particulièrement vulnérable, l'épaisseur de la barrière minérale peu perméable devrait logiquement être augmentée. Ainsi, les recommandations proposées dans le guide doivent-elles être considérées en fonction du contexte environnemental de chaque site et notamment la vulnérabilité de la nappe et la sensibilité de l'aquifère.

Il est rappelé, en conclusion, que les possibilités d'équivalence ne doivent pas faire oublier l'objectif général devant présider à l'implantation de sites de stockage, pour lesquels le contexte géologique et hydrogéologique doit être favorable (article 10 de l'arrêté de 1997 modifié). □

Remerciements

La rédaction du « Guide Équivalence » a bénéficié d'une aide du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, dans le cadre des actions de service public du BRGM.

Résumé

Le « Guide Équivalence » a pour objectif de définir des règles de bonne pratique en matière de recherche de solutions « équivalentes » en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets. Les principaux sites concernés par ce guide sont les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND). Ce guide, dont la première version date de 2002, a été réactualisé par un groupe de travail constitué des principaux organismes intervenant sur la thématique des barrières minérales d'ISD en France. Cette réactualisation a également bénéficié d'un retour d'expérience recueilli auprès de la profession (bureaux d'étude, exploitants, fournisseurs de géosynthétiques...). Cet article fait une synthèse des principales modifications par rapport à la version antérieure.

Abstract

The objective of the “Equivalence Guide” is to define rules of good practice with respect to “equivalent” solutions for landfill mineral barriers. The guide refers primarily to non-hazardous waste landfills. The guide, which was first drafted in 2002, was updated in 2008, by a working group composed of the main organisations working on landfill mineral barriers in France. The update also benefited from feedback from professional partners (consultants, landfill operators, geosynthetic suppliers...). This paper summarizes the main changes with respect to the previous version.

Bibliographie

COURADIN, A., RAZAKAMANTSOA, A.-R., DIDIER, G., DJERAN-MAIGRE, I., 2008, Étude comparative des performances hydrauliques d'adjuvants argileux en traitement de sols, *in* : *Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'Ingénieur*, JNGG'08, Nantes, 18-20 juin 2008.

GUYONNET, D., CAZAUX, D., VIGIER-GAILHANOU, H., CHEVRIER, B., 2009a, Effect of cation exchange on the hydraulic conductivity in a sand-bentonite-polymer mixture, *in* : *SARDINIA-2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium*, Cossu, R., Diaz ; L., Stegmann, R. (Eds.), 5-9 octobre 2009, S. Margherita di Pula, Cagliari (Italy).

GUYONNET, D., TOUZE-FOLTZ, N., NOROTTE, V., POTHIER, C., DIDIER, G., GAILHANOU, H., BLANC, P., 2009b, Indicateurs de performance pour le contrôle des GSB en étanchéité d'installation de stockage de déchets, *in* : *Rencontres Géosynthétiques 2009*, 1-3 avril 2009, Nantes, France.

GUYONNET, D., TOUZE-FOLTZ, N., NOROTTE, V., POTHIER, C., DIDIER, G., GAILHANOU, H., BLANC, PH., PANTET, A., 2008, *Projet LIXAR2 – Indicateurs de performance pour les géosynthétiques bentonitiques. Rapport Final*, Rapport public BRGM no 56356-FR.

GUYONNET, D., CAZAUX, D., TOUZE-FOLTZ, N., DIDIER, G., NOROTTE, V., COURADIN, A., BOUR, O., 2007, French approach to equivalence in landfill geological barriers, *in* : *SARDINIA-2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium*, Christensen, T.-H., Cossu, R., Stegmann, R. (Eds.), S. Margherita di Pula, Cagliari (Italy).

GUYONNET, D., GAUCHER, E., GABORIAU, H., PONS, C.-H., CLINARD, C., NOROTTE, V., DIDIER, G., 2005, Geosynthetic clay liner interaction with leachate : correlation between permeability, microstructure, and surface chemistry, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 131(6), p. 740-749.

MEEDDAT, 2009, *Guide de recommandations pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets. Version 2*, ministère chargé de l'environnement.

NOROTTE, V., DIDIER, G., GUYONNET, D., GAUCHER, E., 2004, Evolution of GCL hydraulic performance during contact with landfill leachate, *in* : *Advances in Geosynthetic Clay Liner Technology : 2nd Symposium*, ASTM STP 1456, Mackey, von Maubeuge (Eds.), ASTM International, West Conshohocken, p. 41-52.

TOUZE-FOLTZ, N., DUQUENNOI, C., GAGET, E., 2006, Hydraulic and mechanical behavior of GCLs in contact with leachate as part of a composite liner, *Geotextiles and Geomembranes*, n° 24, p. 188-197.