



DOCUMENT PUBLIC

*Guide de recommandations
pour l'évaluation de « l'équivalence »
en étanchéité passive d'installation de
stockage de déchets*

Version 2

Février 2009



DOCUMENT PUBLIC

***Guide de recommandations
pour l'évaluation de « l'équivalence »
en étanchéité passive d'installation de
stockage de déchets***

Version 2

Février 2009

Synthèse

Ce guide 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), destinées à recevoir les déchets ménagers et assimilés. Les installations de stockage de déchets dangereux (ISDD), qui reçoivent les déchets industriels spéciaux, font l'objet de spécificités particulières. Cette version du guide est une réactualisation d'une version antérieure datant de juillet 2002 et a bénéficié d'un retour d'expérience recueilli auprès de la profession.

La notion d'équivalence en barrière passive de casier de stockage de déchet est définie sur la base d'un niveau de protection équivalent vis-à-vis d'une ressource en eau souterraine. Les principaux éléments nécessaires à la rédaction de la note justificative de l'équivalence sont décrits dans leurs grandes lignes. Ceux-ci comprennent notamment les contextes géologiques et hydrogéologiques, ainsi que la vulnérabilité des cibles potentielles. Les conditions de mise en œuvre de matériaux rapportés, d'utilisation de matériaux alternatifs (géosynthétiques bentonitiques, sols traités, etc.), doivent être décrits et argumentés. Ces éléments doivent permettre d'apprécier le niveau de protection offert par le dispositif équivalent. A noter qu'une évaluation quantitative (un calcul proprement dit) de l'impact potentiel sur une ressource en eau souterraine n'est pas obligatoire dans tous les cas de figure, notamment s'il y a absence avérée de ressource en eau souterraine vulnérable. Pour le cas où le calcul est jugé utile, pour illustrer l'équivalence, plusieurs exemples sont présentés en détail en annexe de ce guide.

On notera que si ce guide propose des recommandations par rapport aux conditions d'utilisation de certains matériaux alternatifs, il n'est pas exprimé de préférence vis-à-vis de l'un ou l'autre de ces matériaux, qui présentent des avantages et des inconvénients suivant les conditions spécifiques de chaque configuration particulière.

Il est rappelé enfin que les possibilités d'équivalence évoquées dans ce guide ne doivent pas faire oublier l'objectif général qui doit présider à l'implantation de sites de stockage, à savoir que le contexte géologique et hydrogéologique soit favorable (article 10 de l'arrêté du 9 septembre 1997 modifié en 2006).

Sommaire

1. Introduction.....	5
1.1. Contexte.....	5
1.2. Objectifs de ce guide.....	5
1.3. Cadre réglementaire.....	6
1.3.1. Les textes	6
1.3.2. Commentaires.....	7
1.4. Rappel sur les rôles respectifs des barrières active et passive.....	8
1.5. Définition de l'équivalence.....	10
2. Eléments de justification de l'équivalence en étanchéité passive	11
2.1. Introduction	11
2.2. Contexte géologique.....	11
2.3. Contexte hydrogéologique	12
2.4. Caractérisation des éléments constitutifs de la barrière équivalente	13
2.4.1. Caractérisation des niveaux en place.....	13
2.4.2. Caractérisation des matériaux rapportés, remaniés ou traités.....	13
2.4.3. La question de l'épaisseur de la barrière équivalente.....	14
2.5. Evaluation de l'impact potentiel	15
3. La note justificative.....	17
3.1. Les éléments du rendu.....	17
3.2. Exemples d'équivalences.....	18
3.2.1. Introduction	18
3.2.2. Exemple 1	18
3.2.3. Exemple 2	22
3.2.4. Exemple 3	24
3.3. Le cas des flancs.....	24
3.3.1. Introduction	24
3.3.2. Cas de pentes faibles à moyennes ($\leq 1V / 3H$).....	25
3.3.3. Cas de pentes moyennes à fortes ($> 1V / 3H$)	26
3.3.4. Remarques finales sur les flancs.....	27
3.4. Autres cas particuliers	28
3.5. Recommandations concernant certains matériaux alternatifs.....	28
3.5.1. Préambule	28
3.5.2. Les géosynthétiques bentonitiques	28
3.5.3. Recommandations concernant les sols traités	30
3.5.4. Recommandations particulières concernant les mélanges sable-bentonite-polymère	31

4. Précautions d'utilisation du guide 33

Annexe

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

La première version du « Guide Equivalence » est parue en Juillet 2002. Depuis cette date, son utilisation a mis en évidence certaines lacunes et points à compléter. En Novembre 2007 a eu lieu une réunion de « retour d'expérience » à laquelle ont participé des représentants des principaux exploitants d'installation 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 de ce guide et de mieux orienter sa réactualisation. Cette nouvelle version reprend celle de 2002, en la complétant et en précisant certains aspects.

1.2. OBJECTIFS DE CE GUIDE

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. 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, 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.

Les organismes qui ont participé au Groupe de Travail Equivalence et/ou à la rédaction de ce guide sont :

- L'ADEME ;
- le BRGM ;
- le Cemagref ;
- le CETE-Lyon ;
- l'INERIS ;
- l'INSA-Lyon.

Les barrières d'étanchéité considérées dans ce guide sont les barrières en fond et flancs de casiers de stockage. Le cas des barrières en couverture des casiers n'est pas traité. Pour ce dernier cas, le lecteur pourra se référer notamment au guide ADEME (2001) dont la référence figure en bibliographie.

1.3. CADRE REGLEMENTAIRE

1.3.1. Les textes

La notion d'équivalence apparaît dans les différents textes réglementaires, actuellement en vigueur, relatifs au stockage des déchets.

L'arrêté du 9 septembre 1997 (modifié le 19.01.2006) relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux, précise (Art. 11) :

La barrière de sécurité passive est constituée du terrain naturel en l'état. Le fond de forme du site présente, de haut en bas, une perméabilité inférieure à 1.10^{-9} m/s sur au moins 1 mètre et inférieure à 1.10^{-6} m/s sur au moins 5 mètres. Les flancs sont constitués d'une couche minérale d'une perméabilité inférieure à 1.10^{-9} m/s sur au moins 1 mètre.

Une illustration schématique des prescriptions réglementaires (où l'on a inclus également la barrière active) est présentée en Figure 1.

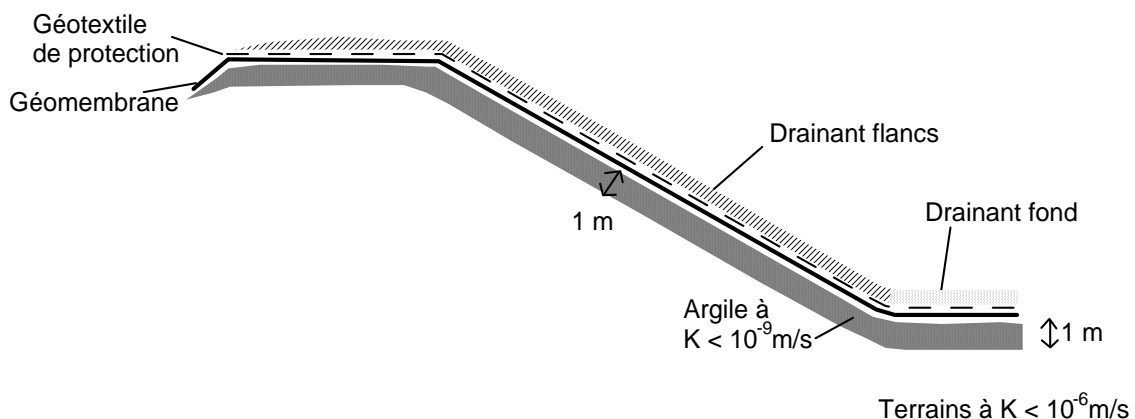


Figure 1 – Illustration des prescriptions de l'article 11 de l'arrêté de 1997 modifié

La configuration de la Figure 1 est théorique : dans la pratique, pour que de l'argile à $K < 10^{-9}$ m/s soit présente *naturellement* sur les flancs, il faudrait que le casier soit creusé dans une formation argileuse (cas notamment d'une ancienne carrière d'argile). Cette situation étant assez peu fréquente, la législation permet la reconstitution de la barrière passive :

*Lorsque la barrière géologique ne répond pas naturellement aux conditions précitées, elle peut être complétée artificiellement et renforcée par d'autres moyens présentant **une protection équivalente**. L'épaisseur de la barrière ainsi reconstituée ne doit pas être inférieure à 1 mètre pour le fond de forme et à 0.5 mètre pour les flancs jusqu'à une hauteur de deux mètres par rapport au fond. En tout état de cause, l'étude montrant que le niveau de protection sur la totalité du fond et des flancs de la barrière*

reconstituée est équivalent aux exigences fixées au premier alinéa figure dans le dossier de demande d'autorisation.

L'arrêté du 30 décembre 2002 relatif au stockage de déchets dangereux, précise (Art. 13) :

Le niveau de sécurité passive est constitué soit du terrain naturel en l'état, soit du terrain naturel remanié d'épaisseur minimum 5 mètres. La perméabilité de cette formation géologique est inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s.

(...) L'épaisseur de 5 mètres doit être effective sur la totalité de l'encaissement après la prise en compte de tous les travaux d'aménagement.

*Le cas échéant, cette barrière passive peut être reconstituée artificiellement avec des matériaux naturels remaniés. La barrière passive des flancs à partir d'une hauteur de cinq mètres par rapport au fond de l'installation peut être reconstituée avec des matériaux fabriqués. Une étude doit alors montrer que la barrière reconstituée répondra à des exigences de perméabilité et d'épaisseur dont l'effet combiné, en termes de protection du sol, des eaux souterraines et des eaux de surface, est au moins **équivalent** à celui résultant des exigences fixées au 1er alinéa. En tout état de cause, l'épaisseur de la barrière reconstituée sera au minimum de cinquante centimètres.*

On rappellera également les dispositions de la Directive du Conseil no. 1999/31/CE du 26 avril 1999 (la Directive dite « Décharge »), qui précise (section 3.2 de l'Annexe) :

*La base et les côtés de la décharge doivent être constitués d'une couche minérale répondant à des exigences de perméabilité et d'épaisseur dont l'effet combiné, en termes de protection du sol, est au moins **équivalente** à celui résultant des exigences suivantes :*

- *décharges pour déchets dangereux : $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s ; épaisseur ≥ 5 m,*
- *décharges pour déchets non dangereux : $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s ; épaisseur ≥ 1 m,*
- *décharges pour déchets inertes : $K \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/s ; épaisseur ≥ 1 m.*

1.3.2. Commentaires

Les dernières versions des textes réglementaires français ont suscité des interrogations au sein de la profession, interrogations qui ont donné lieu à des clarifications lors d'une réunion entre les professionnels du déchet et le Ministère, le 12 septembre 2006.

Arrêté « déchets non dangereux »

Parmi les ambiguïtés du texte on note qu'en cas de barrière équivalente :

- le texte précise que l'épaisseur de la barrière reconstituée doit être d'au moins un mètre, mais ne précise pas quelle doit être sa perméabilité maximale et ne mentionne pas s'il s'agit d'un dispositif monocouche ou multicouche.
- le texte ne précise pas d'épaisseur minimale de la barrière pour ce qui concerne les flancs au-dessus d'une hauteur de 2 mètres par rapport au fond.

Ces deux points sont clarifiés dans ce guide.

Arrêté « déchets dangereux »

Parmi les ambiguïtés du texte on pourra souligner :

- la référence à une « barrière reconstituée artificiellement avec des matériels naturels remaniés » ainsi qu'à une « barrière reconstituée avec des matériaux fabriqués » (barrière des flancs à partir d'une hauteur de 5 mètres par rapport au fond),
- une limite d'épaisseur de 50 cm minimum pour la « barrière reconstituée », sans qu'il soit précisé si cette épaisseur se réfère à la barrière en fond ou en flancs.

Le Ministère a envoyé une lettre à la DRIRE Rhône-Alpes, datée du 29 mai 2008, de laquelle il ressort clairement que cette limite d'épaisseur se réfère à la barrière en flancs, au-delà d'une hauteur de 5 mètres par rapport au fond. Cela semble effectivement cohérent puisque si elle se référait à la barrière en fond, on aurait alors moins d'exigences en termes de sécurité de la barrière passive pour un stockage de déchets dangereux (ISDD) que pour un stockage de déchets non-dangereux (ISDND) qui, contrairement à l'ISDD, inclut une barrière de 5 mètres à $K < 10^{-6}$ m/s.

A noter que le présent guide concerne avant tout les ISDND pour lesquels la problématique de l'équivalence est particulièrement importante en raison du nombre d'installations et des besoins en capacité de stockage. Pour les ISDD, la diversité des contextes géologiques français doit permettre de respecter, dans la majorité des cas, les prescriptions réglementaires. A noter cependant le cas des stockages de type « mono-déchets » pour lesquels il peut y avoir des assouplissements sur les caractéristiques des barrières, dans le cas où l'étude géologique et hydrogéologique ainsi qu'une évaluation des risques spécifiques démontrent l'absence de risques pour l'environnement et la santé (Art. 46 de l'arrêté du 30 décembre 2002 et Art. 2 de l'arrêté du 9 septembre 1997 modifié).

1.4. RAPPEL SUR LES ROLES RESPECTIFS DES BARRIERES ACTIVE ET PASSIVE

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 que ces deux niveaux de sécurité sont **complémentaires**. 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). Mais on ne suppose pas que cette barrière active fonctionne *ad vitam aeternam* car l'expérience montre que, d'une part, les niveaux drainants peuvent se colmater avec le temps et que, d'autre part, les membranes vieillissent et peuvent

développer des défauts liées 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.

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

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

Note : GSB = géosynthétique bentonitique, SBP = mélange sable-bentonite-polymère

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 que l'une ou l'autre de ces barrières prise indépendamment (Géo. Int., 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.

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 ?

1.5. DEFINITION DE L'EQUIVALENCE

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 du vide de fouille pour une cote maximale donnée, etc.), mais doit être motivée techniquement (voir les chapitres suivants).

La principale cible concernée par les flux polluants traversant les barrières d'étanchéité passive en fond d'installation de stockage étant l'eau souterraine, dans ce guide :

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.

A noter que cette définition suppose l'existence, au droit du site, d'une ressource en eau souterraine.

2. Eléments de justification de l'équivalence en étanchéité passive

2.1. INTRODUCTION

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. Pourtant, comme il est montré dans l'Annexe, ces calculs théoriques sont limités par les hypothèses simplificatrices des modèles utilisés. 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, AEP, ...) ?
- 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.

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La définition du contexte géologique et hydrogéologique local constitue le préalable au choix de l'implantation d'une installation de stockage. La délimitation précise de l'implantation nécessite généralement de préciser l'extension horizontale et verticale des formations géologiques présentes au droit et à la périphérie du site envisagé, dans le but d'utiliser au mieux les formations géologiques en place pour constituer la barrière passive de type réglementaire. Le choix d'un niveau projeté de fond de fouille nécessite la réalisation d'une campagne de caractérisation de la perméabilité des horizons sous-jacents (cf. BRGM, 2005) et la localisation du niveau des plus hautes eaux de la nappe.

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 (voir le chapitre 3).

A noter que les critères de perméabilité et d'épaisseur s'appliquent difficilement à un milieu géologique dont la perméabilité est essentiellement liée à la présence de

fractures. En milieu calcaire notamment, il sera nécessaire de s'assurer de l'absence de karst, même profond, en liaison avec les formations superficielles. De manière générale, les performances en termes de rétention et de perméabilité d'un socle rocheux affleurant sont faibles et aléatoires à caractériser. La recherche d'une solution d'équivalence selon des critères de perméabilité, d'épaisseur, et de rétention, est alors motivée. La notion de rétention est à relier aux performances de la barrière de 5 m à 10^{-6} m/s en terme « d'atténuation naturelle ». Si cette valeur de perméabilité a peu d'incidences sur les volumes infiltrés dans le sol (elle n'est pas « limitante » par rapport à une pluie efficace), elle permet de garantir un minimum d'argilosité du sol, et renvoie au « pouvoir épurateur » évoqué par certains textes réglementaires antérieurs à l'arrêté de 1997. Elle permet aussi d'éviter l'implantation de sites sur des milieux particulièrement vulnérables tels que des gravières, des karsts ou des socles rocheux fracturés.

On trouvera dans le guide AFNOR (2009 ; voir liste de références), des recommandations pour la reconnaissance de formations géologiques hétérogènes et du contexte hydrogéologique.

2.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

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 (DDAE). 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 ($K \leq 10^{-6} \text{ m/s}$) de la barrière passive est alors réduite et il est nécessaire de prévoir le renforcement du niveau peu perméable à $K \leq 10^{-9} \text{ m/s}$.

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.

Un cas particulier est celui de formations géologiques faiblement perméables (e.g. K entre 10^{-9} et 10^{-8} m/s) avec présence d'un niveau hydrostatique situé de manière pérenne au-dessus du fond de forme. Bien qu'il diffère de la situation classiquement prévue par la réglementation, ce cas peut néanmoins être favorable, car les transferts depuis l'intérieur du stockage vers l'extérieur ne peuvent se faire que par diffusion, mécanisme très lent et générant de faibles flux massiques. Dans certains cas, ce type de configuration peut donner lieu à des suintements lors du décaissement du casier de stockage, suintements nécessitant un drainage de ces eaux pour permettre la reconstitution de la couche de faible perméabilité de la barrière passive.

2.4. CARACTERISATION DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DE LA BARRIERE EQUIVALENTE

2.4.1. Caractérisation des niveaux en place

La caractérisation de la nature et de la perméabilité de la barrière passive équivalente doit permettre de sélectionner les voies de migration les plus probables. Outre l'infiltration verticale *per descensum*, l'éventuelle migration latérale est à considérer en fonction du contexte géologique et hydrogéologique local. La possibilité d'une migration latérale des lixiviats, fonction de la pente topographique et du pendage des couches géologiques présentes, ainsi que les éventuelles discontinuités (présence de strates, lentilles ou niveaux plus ou moins perméables au sein d'un même horizon), doivent être particulièrement recherchés à ce stade.

Les reconnaissances géologiques doivent permettre d'apprécier les caractéristiques de lithologie, d'homogénéité, d'épaisseur et de perméabilité (cf. BRGM, 2005) des terrains en place sous le site, mais également la variabilité de ces caractéristiques au droit du site. L'incertitude concernant les caractéristiques des couches géologiques devra être d'autant plus faible que l'épaisseur de la barrière passive envisagée est réduite.

Les guides existants (voir références en annexe) permettent d'établir le programme de reconnaissance adapté à l'homogénéité attendue de la formation en place. En présence d'une fracturation, une reconnaissance particulière doit être réalisée en vue de définir le rôle possible de cette fracturation vis-à-vis des écoulements locaux. Le recours à des méthodes indirectes de type géophysique est fortement conseillé dans ces cas. Ces méthodes, éventuellement associées à de la photo-interprétation de couples stéréoscopiques, permettent dans les cas favorables de renseigner les caractéristiques des zones d'écoulement préférentiel. La difficulté de la description exhaustive de ces paramètres fera généralement préférer une approche sécuritaire, considérant la perméabilité maximale mesurée au droit de la zone fracturée et de ce fait nécessitera une approche par équivalence.

2.4.2. Caractérisation des matériaux rapportés, remaniés ou traités

Les éléments relatifs à la barrière naturelle en place sur l'installation de stockage sont à compléter dans le cas de matériaux naturels rapportés. Dans ce cas il est nécessaire de caractériser le gisement d'argile prévu et/ou le matériau candidat à un traitement. La variabilité naturelle de perméabilité des gisements argileux peut parfois atteindre un à deux ordres de grandeur pour un même horizon géologique, du fait de variations latérales de faciès. Dans le cas d'argile à composante sableuse ou silteuse présentant de fortes variations de perméabilité, il est recommandé d'effectuer un contrôle strict de la qualité des matériaux sur le site d'excavation. Un contrôle visuel rigoureux sera également effectué sur le site d'accueil, associé à des mesures de valeur au bleu et de teneur en eau. Une mise en œuvre adaptée devra permettre d'homogénéiser le matériau.

Les conditions de mise en œuvre doivent être définies de manière précise (conditions de compactage, couples teneur en eau-densité, perméabilité, etc.). Ces conditions de mise en œuvre doivent être validées sur site à l'aide de planches d'essai de perméabilité dans le cadre d'un plan d'assurance qualité (voir références en annexe) et en appliquant les normes d'essais en vigueur (BRGM, 2005). La géophysique (notamment les méthodes électriques ou électro-magnétiques) peut être appliquée utilement pour optimiser l'implantation des points de contrôle de la perméabilité.

Dans le cas du traitement de matériaux naturels par des fractions fines argileuses (notamment par de la bentonite), une caractérisation complémentaire est nécessaire avec en particulier **une note justificative de la formulation de traitement**. La démonstration de l'adéquation de la formulation proposée doit être effectuée à l'aide de **planches d'essai** (BRGM, 1997a, AFNOR, 2009).

2.4.3. La question de l'épaisseur de la barrière équivalente

La question de l'épaisseur de la barrière est au centre du débat sur l'équivalence en étanchéité passive. En effet, dans certaines régions, la mise en œuvre de matériaux naturels rapportés sur un mètre d'épaisseur génère pour l'exploitant d'importantes contraintes d'ordre logistique et économique. Si le chapitre suivant et l'annexe illustrent des cas de figure où l'épaisseur de la barrière peut être réduite par rapport aux prescriptions réglementaires, dans le cas général on cherchera à éviter cette réduction d'épaisseur et cela pour plusieurs raisons.

La première raison que l'on pourra citer concerne l'hétérogénéité des matériaux argileux, qu'elle soit naturelle ou liée au mode de mise en œuvre. La mise en œuvre des matériaux par compactage (par couches successives), peut favoriser (pour certains sols) le développement d'interfaces qui constituent des chemins d'écoulement préférentiel. On cherchera à éviter ce développement, par exemple en scarifiant, à l'aide d'un compacteur à pied-de-mouton, la dernière couche compactée (couche n) avant de mettre en œuvre la couche suivante (couche n+1). La fissuration verticale (p.ex. des fentes de dessiccation qui se forment si une couche est exposée sans protection pendant une durée trop longue) peut connecter ces interfaces (Figure 2) et fournir des chemins d'écoulement qui constituent une connexion au travers de la barrière (EPA, 1991).

L'épaisseur de la barrière passive apparaît comme un gage de sécurité, dans la mesure où elle réduit les risques liés à des défauts des matériaux et donc la probabilité d'écoulement préférentiel au travers de la barrière.

L'épaisseur est également gage de sécurité vis-à-vis de composés organiques pour lesquels la barrière minérale joue un rôle d'atténuation. En effet, les données d'Edil (2003) montrent que si les géomembranes PEHD sont des barrières efficaces vis-à-vis des éléments inorganiques (sels, métaux, etc.), certains composés organiques volatils (de type benzène, toluène, etc.) peuvent migrer par diffusion.

Des matériaux alternatifs (GSB, sols traités, mélanges sable-bentonite-polymère...) peuvent utilement renforcer les couches de matériaux argileux naturels, voire être utilisés en substitution sur une certaine épaisseur s'il n'existe pas de bons matériaux

argileux à disposition et/ou s'il y a absence de ressource d'eau souterraine vulnérable. Cette dernière condition est considérée comme indispensable afin d'éviter de voir apparaître, de manière systématique, le recours à des couches minérales d'épaisseur réduite, simplement pour des raisons de meilleure rentabilité économique.

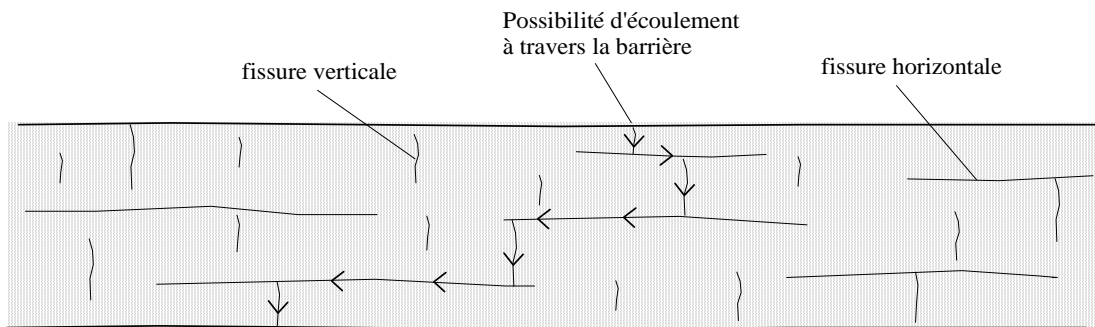


Figure 2 - Schéma de possibles chemins d'écoulement préférentiel au sein d'une couche de matériau argileux.

2.5. EVALUATION DE L'IMPACT POTENTIEL

Dans ce qui précède il a été souligné que ce n'est pas tant le temps de transfert des polluants qui sert à justifier l'équivalence, mais plutôt l'ampleur de l'impact potentiel d'une installation de stockage sur son milieu. On s'intéresse donc avant tout à des flux massiques.

Il est rappelé qu'un flux massique est une masse émise par unité de temps. Pour ce qui concernant le transfert de polluants dissouts au sein de matériaux naturels granulaires, il existe deux types de flux :

- un flux dit advectif, qui est lié au transport de substances par de l'eau mobile :

$$F_A = q \cdot c$$

où F_A est le flux advectif (exprimé en masse par unité de section perpendiculaire à la direction d'écoulement de l'eau et par unité de temps), q est la vitesse de Darcy (le produit de la perméabilité et du gradient hydraulique, exprimé en volume d'eau par unité de section perpendiculaire à la direction d'écoulement et par unité de temps) et c est la concentration du polluant dans l'eau mobile (en masse par unité de volume).

- un flux dit diffusif-dispersif, qui est lié au transfert de substances sous l'effet d'un gradient de concentration :

$$F_D = -nD \frac{\partial c}{\partial z}$$

où F_D est le flux diffusif-dispersif (mêmes unités que précédemment), n est la porosité du milieu poreux, D est le coefficient de diffusion-dispersion (en unité de longueur au

carré par unité de temps) et z est la profondeur atteinte dans la barrière (en unité de longueur).

Par contre, comme il est montré dans SARDINIA (2007a ; voir liste de références) et en annexe, pour une source supposée constante, un traceur parfait et des valeurs typiques de paramètres hydrauliques, le flux diffusif influencera les temps de restitution des solutés mais aura peu voire pas d'influence sur le plateau de concentration calculé dans l'aquifère. Par conséquent un moyen simple de comparer différents types de barrières peut consister à comparer les flux advectifs pour chaque configuration.

Si on s'intéresse également aux temps de restitution des solutés, alors on peut appliquer des méthodes telle que celle utilisée en annexe et qui consistent à combiner les flux advectif et diffusif-dispersif dans l'équation de bilan de masse qui décrit le transfert des substances dissoutes dans l'eau et à calculer leur effet sur une ressource en eau souterraine située à l'aplomb de la zone de stockage.

A noter qu'un véritable calcul n'est pas obligatoire dans tous les cas de figure et notamment si la barrière est reconstituée de manière à être précisément conforme aux prescriptions réglementaires (présence des 5 m à $K < 10^{-6}$ m/s et reconstitution des 1 m à $K < 10^{-9}$ m/s). Dans certains cas, une étude documentaire détaillée et argumentée portant sur les caractéristiques des matériaux utilisés pour constituer la barrière et sur la relative vulnérabilité du milieu cible, peut être suffisante pour justifier l'équivalence.

Dans le cas où une justification quantifiée de l'équivalence est nécessaire, il est recommandé d'utiliser strictement les mêmes caractéristiques du milieu aquifère lors de la comparaison entre différentes configurations de barrière. Ceci afin de ne pas risquer de favoriser les sites implantés à l'aplomb d'aquifères à plus forte perméabilité, donc plus diluants, mais pouvant présenter une vulnérabilité plus importante. Par ailleurs, il est préconisé de travailler en concentration relative (c/c_0) où c_0 est la concentration source, prise comme étant unitaire. On compare donc différentes successions de couches constitutives de la barrière, **toutes choses étant égales par ailleurs**. On se place par conséquent dans un cadre **semi-générique**, plutôt que dans un cadre de type « évaluation détaillée des risques ».

3. La note justificative

3.1. LES ELEMENTS DU RENDU

Les différents éléments devant figurer dans la note justificative sont au minimum :

- La synthèse de la caractérisation du milieu géologique et hydrogéologique. La synthèse hydrogéologique devra présenter clairement les informations disponibles concernant la piézométrie des nappes d'eau souterraine au droit et dans le voisinage du projet et les mettre en perspective par rapport aux caractéristiques et la position (notamment les cotes) du projet.

On notera que si la réglementation relative aux ISDND (déchets ménagers et assimilés) en vigueur en France, ne stipule pas une distance minimale entre la base de la couche de 1 m de matériau argileux et la surface de la nappe d'eau souterraine, en revanche il est clair que cet élément intervient dans l'évaluation des dossiers d'équivalence. Dans le cas où les 5 m à 10^{-6} m/s ne seraient pas respectés (perméabilité plus forte), un dossier qui proposerait un dispositif « équivalent » dans une situation où la nappe se situe à un niveau très proche de la base de la couche de 1 m ferait vraisemblablement l'objet d'une demande de renforcement des garanties de protection.

Dans le cas d'un matériau relativement perméable, il conviendrait que les plus hautes eaux connues se situent au moins à une distance de 2 m de la base de la couche de 1 m à 10^{-9} m/s. A noter qu'une telle recommandation ne s'applique pas au cas des matériaux argileux ($K < 10^{-8}$ m/s environ) d'épaisseur significative, pour lesquels la notion de « nappe » n'a pas de véritable sens et où les variations de niveau sont extrêmement lentes. La présence d'un niveau d'eau dans des piézomètres installés dans de l'argile ne doit pas être considérée comme un élément défavorable.

- 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 (voir également BRGM, 1997b).
- Le projet de dispositif de barrière passive basé sur une reconstitution complète de la barrière passive telle que décrite dans la réglementation et les différentes options équivalentes proposées. Ces barrières sont représentées par 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...)¹.
- Les prescriptions de mise en œuvre (qu'il s'agisse d'un matériau du site réemployé, d'un matériau naturel d'apport extérieur en l'état ou traité, d'un géosynthétique bentonitique, d'un mélange sable-bentonite-polymère, etc.) 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.

3.2. EXEMPLES D'EQUIVALENCES

3.2.1. Introduction

Les exemples ci-dessous sont fournis à titre d'illustration. D'autres exemples sont présentés dans l'annexe. On notera que dans le cadre d'un dossier d'équivalence, une éventuelle forte similitude entre le cas traité et un des exemples présentés dans ce guide, ne dispense pas d'une étude spécifique.

3.2.2. Exemple 1

Ce premier exemple s'inspire d'un cas réel d'implantation d'une nouvelle installation de stockage de déchets ménagers et assimilés. Il est décrit ici de manière succincte en mettant l'accent sur la démarche proposée et sur la justification de l'équivalence.

¹ Si l'origine du matériau (lieu d'approvisionnement) n'est pas déterminée au stade d'élaboration de la note justificative d'équivalence, il pourra être envisagé que le CCTP travaux fasse l'objet d'une tierce expertise sur ce point afin de vérifier que la caractérisation du gisement, les caractéristiques du matériau et ses conditions de mise en œuvre respectent les spécifications contenues dans la note.

Situation géologique et hydrogéologique

La géologie du site est représentée schématiquement dans la Figure 3. On trouve, du haut vers le bas :

- 6 mètres de limons sableux ayant une perméabilité de 5×10^{-6} m/s.
- Des calcaires d'une épaisseur supérieure à 10 m dont la perméabilité est de l'ordre de 10^{-5} m/s et ne présentant pas d'indices de karstification ou de fracturation importante.

Par rapport aux spécifications de l'arrêté du 9 septembre 1997 (modifié le 19.01.2006) relatif au stockage des déchets ménagers et assimilés, la géologie du site présente des non-conformités en raison de l'absence de la couche de 1 m à $K < 10^{-9}$ m/s et de la perméabilité des limons qui est légèrement supérieure à la valeur réglementaire de 10^{-6} m/s.

Le niveau des plus hautes eaux connues est situé à environ 1 mètre en dessous du toit des calcaires. Aucune utilisation de l'eau souterraine en aval hydraulique du site n'est identifiée. Le premier captage d'AEP est situé à plus de 20 km.

Compte tenu de la contrainte économique que représenterait la reconstitution d'une barrière passive en tout point conforme aux prescriptions réglementaires (Figure 4a ; compactage de matériaux sur une épaisseur de 5 m, perte de volume utile...), une proposition d'équivalence a été formulée.

Proposition d'un dispositif équivalent

Pour pallier les insuffisances identifiées précédemment, il a été proposé :

- a) De compacter un matériau argileux sur une épaisseur de 1 m pour arriver à une perméabilité inférieure ou égale à 10^{-9} m/s,
- b) De renforcer cette couche de matériau argileux par un GSB à base de bentonite sodique.

Cette proposition de dispositif équivalent est présentée en Figure 4b.

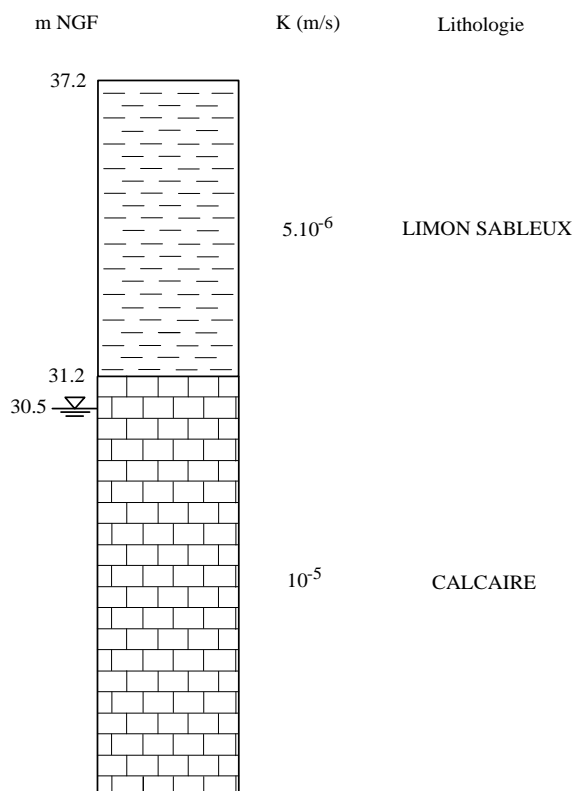


Figure 3 – Schéma de la situation existante

Justification de l'équivalence

La justification de l'équivalence est présentée ici dans ses grandes lignes afin d'en dégager les principes.

D'un point de vue qualitatif, on notera tout d'abord que la perméabilité des limons sableux (5×10^{-6} m/s) est relativement proche de celle prévue par la réglementation en vigueur (10^{-6} m/s). Or il est important de souligner que la perméabilité de cette couche a peu d'influence sur les performances de l'ensemble. En effet, l'écoulement vertical est contrôlé par la perméabilité de la couche supérieure la moins perméable (en l'occurrence la couche de 1 m de matériau argileux dans la Figure 4a et le GSB dans la Figure 4b). La couche à 10^{-6} m/s a été prévue par le législateur comme « zone tampon » et pour prévenir l'implantation de sites de stockage de déchets sur des milieux hydrogéologiques particulièrement vulnérables (massifs karstiques, gravières, etc.).

Il découle de ce qui précède qu'il est particulièrement important de démontrer :

- 1) L'absence d'implantation sur une zone vulnérable (en particulier l'absence de fracturation importante des calcaires).
- 2) La garantie de la pérennité d'un faible écoulement vertical à travers la barrière.

Dans le cas qui nous intéresse, le point 1) est satisfait compte tenu :

- de l'absence d'une utilisation des eaux souterraines en aval hydraulique du site,
- de la profondeur de la nappe (plus hautes eaux connues) par rapport à la base de la couche de 1 m à 10^{-9} m/s (environ 7 m).

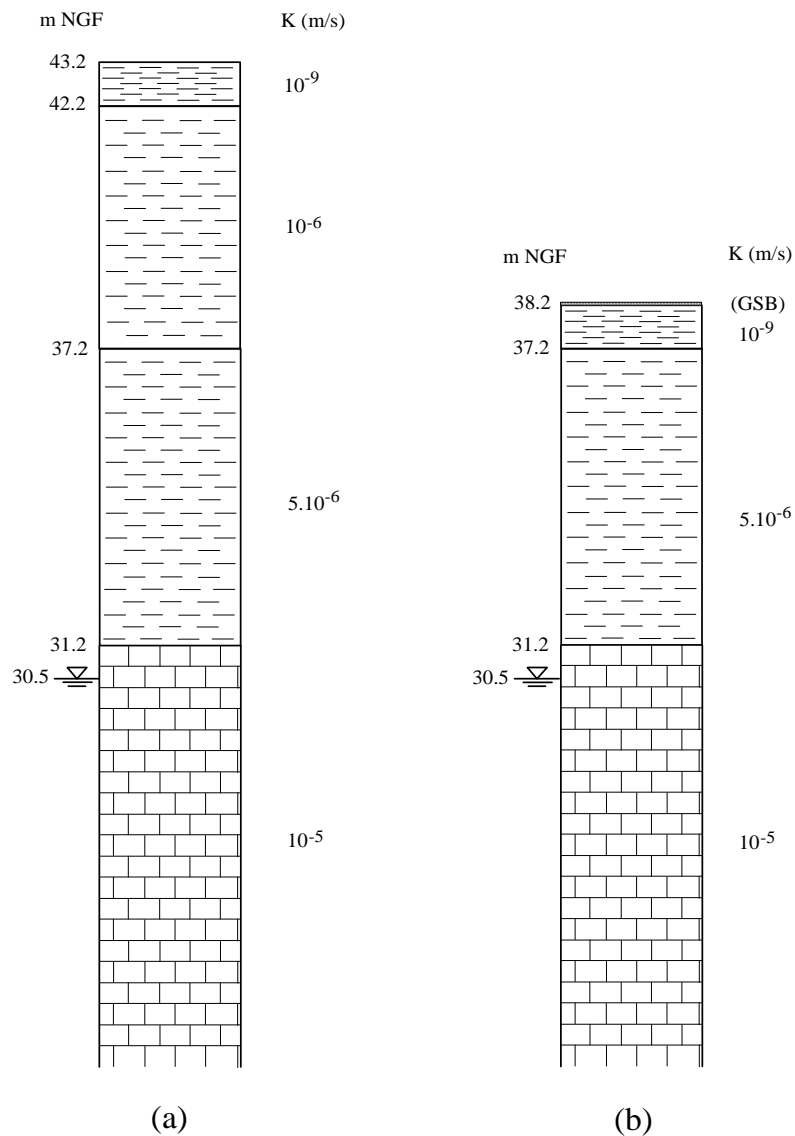


Figure 4 – (a) : reconstitution complète de la barrière passive au-dessus du terrain naturel. (b) : dispositif équivalent proposé.

Pour pallier la plus forte perméabilité des limons sableux par rapport aux prescriptions réglementaires, il a été proposé de renforcer la barrière passive par un GSB. Des recommandations concernant les caractéristiques des GSB pour des applications en étanchéité de fond d'ISDND sont proposées à la section 3.5.

L'association du GSB avec la couche d'argile d'épaisseur réduite doit garantir une vitesse d'infiltration plus faible que celle résultant de la présence de la couche d'argile seule. Ceci devrait se traduire par un flux massique plus faible, comme illustré par la Figure 5. Cette figure présente le résultat d'une simulation du transfert d'une substance

dissoute depuis une source située au sommet de la barrière minérale, vers l'aquifère. On trouvera les détails sur ce type de calcul dans l'annexe ainsi que d'autres exemples de calcul.

Les courbes de la Figure 5 représentent l'évolution de la concentration relative à la concentration source (supposée constante) dans l'aquifère en aval immédiat d'une installation de stockage. Le scénario 1 représente la situation illustrée en Figure 4a, tandis que le scénario 2 correspond à la Figure 4b.

On constate que d'après le calcul, le scénario 2 serait plus favorable que le scénario 1, puisqu'il se traduit par une concentration relative maximale dans l'aquifère plus faible. D'un point de vue hydro-dispersif, on en déduit que le scénario 2 (Figure 4b) est au moins équivalent au scénario 1.

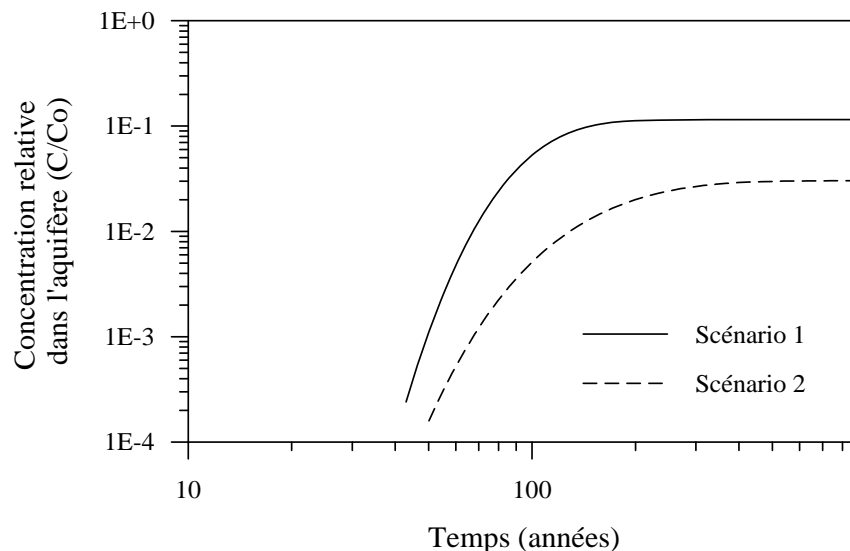


Figure 5 – Evolution de la concentration relative calculée dans l'aquifère en aval immédiat l'installation de stockage

On notera que dans l'exemple présenté ci-dessus, la courbe du scénario 2 est systématiquement en-dessous de celle du scénario 1. La situation peut se présenter où c'est le cas pour le plateau de concentration, mais que pour des temps faibles la courbe du scénario 2 passe au-dessus de celle du scénario 1. Cette situation ne devrait pas être considérée comme un élément défavorable : d'une part, si impact il y a, c'est la concentration maximale qui contrôlera cet impact et, d'autre part, la fiabilité de ce type de calcul, qui est de nature semi-quantitative, ne permet pas une analyse des courbes aussi précise.

3.2.3. Exemple 2

Introduction

Cet exemple se caractérise par les éléments suivants :

- Des matériaux plus ou moins argileux sont disponibles localement.

- Une nappe d'eau souterraine non exploitée existe au droit du site.
- Il s'agit d'écoulements de fissures dans un socle rocheux.

Dans le cas de socle rocheux affleurant où les écoulements sont guidés par une fracturation, on peut juger utile de rechercher un potentiel d'argilosité équivalent à la reconstitution de la barrière passive complète (les 5 m à 10^{-6} m/s surmontés par le niveau peu perméable à 10^{-9} m/s). Cette argilosité équivalente permet d'appréhender l'équivalence en termes de *potentiel d'atténuation naturelle* de la barrière passive. La prise en compte des phénomènes de rétention, qui participent à l'atténuation naturelle, nécessite une approche spécifique au site.

Définition

Une argilosité équivalente peut être définie pour les matériaux locaux susceptibles de vérifier les critères de perméabilité de 10^{-6} m/s et de 10^{-9} m/s et donc d'être utilisés pour reconstituer la barrière passive. Les masses d'équivalent de valeur au bleu (noté ici EQB), par volume de formation et relatif à la masse spécifique sèche mesurée (ρ) sont déduits de :

$$\text{EQB (kg/m}^3\text{)} = \rho \text{ (t/m}^3\text{)} * \text{VBS (exprimée en kg de bleu/tonne de sol sec)}$$

Le traitement à la bentonite permet d'augmenter la valeur au bleu. Ce paramètre, qui est mesuré de manière courante lors des essais de mise en œuvre, est lié à la capacité d'échange cationique et donc à l'aptitude du sol à fixer des polluants. Dans le cas d'un sable silteux possédant une fraction fine argileuse essentiellement représentée par de la kaolinite, un traitement de ce sable silteux par 2% de bentonite peut permettre de doubler la capacité d'échange cationique initiale du matériau et tripler la surface d'adsorption déduite de la valeur au bleu.

Application

L'exemple ci-dessous est inspiré d'un cas réel de dossier d'autorisation d'exploiter. Dans cet exemple, le socle rocheux fracturé présente une perméabilité légèrement supérieure au critère retenu (10^{-6} m/s) au-dessus d'une nappe non exploitée.

Une argile sableuse, pouvant être approvisionnée sur le site, présente une perméabilité de l'ordre de 10^{-8} - 10^{-9} m/s et une valeur d'équivalent au bleu égale à 4 kg/m^3 . Le traitement de ce matériau à une teneur de l'ordre de 2% en bentonite (calcique activée ou sodique naturelle) permettrait de respecter le critère de perméabilité de 10^{-9} m/s. Ce traitement fournit un équivalent au bleu supplémentaire de l'ordre de 8 kg/m^3 .

La reconstitution de la barrière passive complète nécessiterait d'approvisionner un volume de matériau correspondant à une épaisseur de 6 m de matériau et d'envisager de traiter à au moins 2% de bentonite le niveau supérieur. L'équivalent au bleu de cette barrière de type réglementaire représenterait une valeur de $5 * 4 \text{ kg/m}^3 + 1 * (4+8) \text{ kg/m}^3$ soit un équivalent au bleu moyen d'environ 32 kg/m^3 .

La solution équivalente proposée a consisté à réaliser une couche de 1,5 m de matériau traité à 4% de bentonite, ce qui représente un équivalent au bleu supplémentaire de 16 kg/m^3 , et permet d'atteindre un équivalent au bleu de $1,5 * (4 + 16) = 30 \text{ kg/m}^3$.

3.2.4. Exemple 3

Cet exemple n'est présenté que dans son principe. Il se caractérise par les éléments suivants :

- Une impossibilité technico-économique d'approvisionnement en matériaux argileux de qualité satisfaisante.
- L'absence d'une ressource en eau souterraine (socle rocheux peu perméable).
- Le soubassement respecte le critère de 5 mètres à $K < 10^{-6} \text{ m/s}$.

Dans le cas où il n'existe pas de ressource en eau souterraine identifiée et où d'éventuels écoulements de fissure ne peuvent en aucun cas mettre en relation la zone du stockage avec une nappe aquifère utilisable en tant que ressource en eau, la solution équivalente pourra s'orienter vers un amendement de sol à la bentonite (calcique activée ou sodique naturelle) ou à la kaolinite, avec un renforcement par un GSB ou par un mélange sable-bentonite-polymère (SBP) mis en œuvre sur au moins 7 cm d'épaisseur (voir section 3.5.4).

L'épaisseur de la couche de matériau amendé peut être réduite par rapport à la prescription réglementaire de 1 m mais, **conformément à la Directive Européenne, elle ne pourra pas être inférieure à 0,5 m.**

La formulation de l'amendement et le type d'adjuvant devront être justifiés par des éléments techniques (voir JNGG, 2008), en tout cas au stade du projet d'exécution. Il est en effet parfois difficile d'apporter des données précises au stade du DDAE (Dossier de Demande d'Autorisation d'Exploiter), par contre ce dernier devra inclure des éléments argumentant la faisabilité de la démarche proposée.

3.3. LE CAS DES FLANCS

3.3.1. Introduction

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 30 cm 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 « bassine »**. 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 :

3.3.2. Cas de pentes faibles à moyennes ($\leq 1V / 3H$)

Dans ce cas, le compactage d'argile (à $K < 10^{-9}$ m/s) sur pente devrait être possible sur au moins 30 cm d'épaisseur, avec un renforcement par un matériau alternatif. On peut également utiliser un mélange 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 GSB, 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 :

- Augmenter la largeur de recouvrement des lés, avec un minimum de 0.3 mètres.
- Protéger la géomembrane pendant la phase d'exposition afin de limiter l'augmentation de la température.
- Ne pas laisser les géomembranes exposées lorsqu'elles recouvrent un GSB.

- 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 les suivantes (à la date de rédaction du présent guide) :

- ≤ 5 m de rampant : 0.3 m de recouvrement.
- Entre 5 et 20 m : 0.4 m.
- > 20 m : 0.6 m.

3.3.3. Cas de 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 3H/1V, on pourra :

- 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,
- 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 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, comme indiqué dans la Figure 6, avec de l'argile compactée ($K < 10^{-9}$ m/s) si les dimensions des risbermes 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.

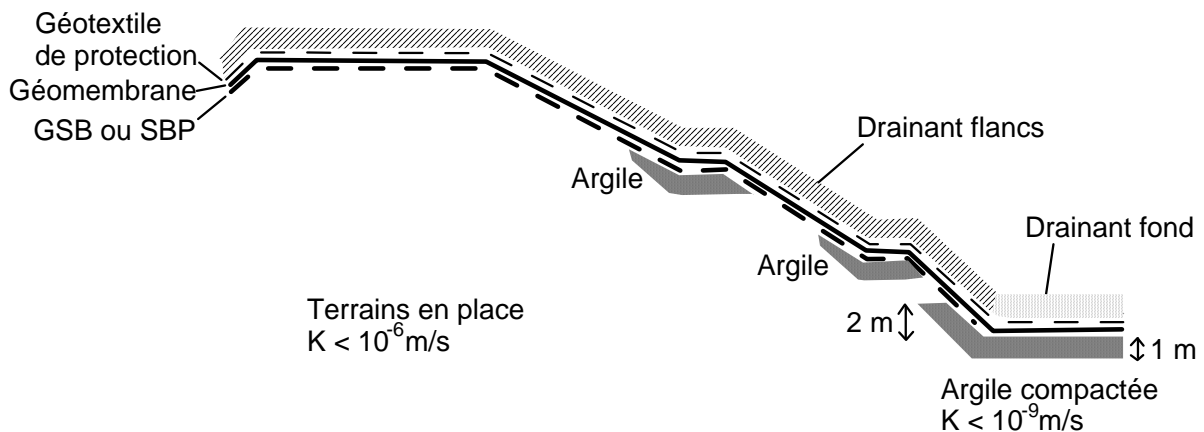


Figure 6 – Exemple de configuration en flancs avec des risbermes pour couper les pentes

3.3.4. Remarques finales sur les flancs

Pour ce qui concerne le calcul d'équivalence sur les flancs, des calculs peuvent être réalisés à l'aide des outils évoqués en annexe, 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 mètres par rapport au fond de forme, c'est-à-dire le niveau de remontée de l'argile compactée de la barrière passive (Figure 6).

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.

3.4. AUTRES CAS PARTICULIERS

Des situations peuvent se présenter où, compte tenu du contexte géologique, il est absolument impossible de satisfaire aux prescriptions réglementaires, même en invoquant des principes d'équivalence entre barrières minérales.

Un exemple significatif est le cas de la création d'une installation de stockage en contexte insulaire et où il n'existe aucun matériau s'apparentant à de l'argile. Comme il n'est souvent pas envisageable, pour des raisons de coûts de transport prohibitifs, d'importer un tel matériau, des solutions de remplacement qui s'éloignent des recommandations contenues dans ce guide doivent parfois être envisagées, dès lors qu'elles sont argumentées sur la base de critères techniques.

3.5. RECOMMANDATIONS CONCERNANT CERTAINS MATERIAUX ALTERNATIFS

3.5.1. Préambule

On aborde dans ce sous-chapitre certains matériaux peu perméables qui présentent un intérêt particulier dans un contexte de barrière passive de casier de stockage de déchets, l'objectif étant de fournir des recommandations pour optimiser l'utilisation pertinente de ces matériaux. Il est important de souligner qu'il n'est pas exprimé, dans ce guide, de préférence par rapport à tel ou tel matériau, les différents matériaux présentant des avantages et des inconvénients suivant les conditions spécifiques de chaque configuration particulière.

3.5.2. Les géosynthétiques bentonitiques

Il est rappelé qu'un GSB est typiquement constitué de poudre ou de granulés de bentonite pris en sandwich entre deux géotextiles solidaires. Les GSB aiguilletés sont préférables aux GSB simplement cousus (et sans couche réservoir). L'hydratation du GSB s'opère au cours du temps grâce à l'humidité du sol. Le GSB saturé a une épaisseur qui est de l'ordre du centimètre. Les GSB utilisés en étanchéité de fond et flancs de casier d'ISDND sont principalement des GSB à base de bentonite sodique (naturelle ou activée). Des GSB à base de bentonite calcique sont parfois utilisés mais dans ce cas, la masse surfacique de bentonite est nettement supérieure. 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 (LIXAR, 2005, LIXAR2, 2008), qui a bénéficié du soutien de l'ADEME, d'exploitants d'ISDND 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 va augmenter (voir Environnement & Technique, 2006). Pour éviter ou atténuer des effets négatifs il faut notamment :

- que le GSB soit pré-hydraté par un fluide pauvre en cations divalents,
- que le GSB soit rapidement sous contrainte,
- que 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 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). 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+} . Le Tableau 2 propose des indicateurs, rapides à contrôler, qui permettent de vérifier si un GSB sodique paraît adapté à une utilisation en étanchéité de fond d'ISDND.

Tableau 2 – Indicateurs permettant de contrôler les GSB sodiques utilisés en étanchéité de fond de casier d'ISDND (LIXAR2, 2008)

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	≥ 24 cm ³ /2g	Valeur qui apparaît généralement dans les fiches produits des GSB
Capacité d'Echange Cationique (CEC) NF X 31.130	≥ 70 meq/100 g	Corrélié à la proportion de smectite
Proportion de CaCO ₃ NF P 94-048	≤ 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 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).

On note qu'une différence significative avec la version de 2002 du Guide Equivalence 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.

Concernant la valeur de perméabilité à utiliser, dans les calculs d'équivalence, pour les GSB à base de bentonite sodique, les exemples en annexe utilisent une valeur de 5×10^{-11} m/s. On notera que les mesures présentées dans LIXAR2 (2008), 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 ».

3.5.3. Recommandations concernant 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) font l'objet d'un sous-chapitre spécifique (voir ci-dessous).

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 réalisées avec différentes proportions d'adjuvants (voir par ex. JNGG, 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, destiné à garantir la bonne mise en œuvre, peuvent également être proposées au stade du DDAE. On pourra se référer au guide AFNOR (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.

3.5.4. Recommandations particulières concernant les mélanges sable-bentonite-polymère

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 de ce guide 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 7 cm. Ainsi, la quantité de bentonite au mètre carré est d'au moins 13 kg.

La forte proportion de sable fait que, contrairement aux matériaux argileux couramment mis en œuvre dans les barrières étanches d'ISD, le mélange SBP présente des caractéristiques mécaniques plus favorables à la stabilité du matériau en talus. Par ailleurs, la relativement faible proportion de smectite sodique (environ 8%) comparé à un GSB (de l'ordre de 70%), entraîne une moindre sensibilité à l'agression cationique (voir BRGM, 2008).

Par contre, la fabrication du mélange nécessite le choix d'un sable ayant des caractéristiques très 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 (voir SARDINIA, 2007b), comme pour un sol amendé classique. La valeur de perméabilité mesurée in-situ est typiquement inférieure à 5×10^{-11} m/s.

Comme il est montré en annexe, un des principaux atouts du matériau est son épaisseur de mise en œuvre (en général 7 cm). 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 doivent être stockés 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. 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),
- la faible perméabilité du matériau, mesurée en laboratoire mais aussi (et surtout) sur le terrain.

4. Précautions d'utilisation du guide

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 ce document, il a été suggéré à plusieurs reprises que le facteur « épaisseur » de la couche de matériau argileux n'était 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 le premier exemple de calcul présenté dans le chapitre 3, ainsi que les scénarios 2 et 3 en annexe, 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, comme il a été proposé dans le troisième exemple et dans les scénarios 4 et 5 en annexe, 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 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 ce guide doivent 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 ces possibilités d'équivalence ne doivent pas faire oublier l'objectif général qui doit 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).

Références citées

- ADEME (2001) – Guide pour le dimensionnement et la mise en œuvre des couvertures de sites de stockage de déchets ménagers et assimilés. ADEME, Angers.
- 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 (à paraître en 2009).
- AFNOR (2004) – Géosynthétiques. Méthodes d’essai pour la détermination de la masse surfacique des géosynthétiques bentonitiques. AFNOR NF EN 14196.
- BRGM (2008) - TRISOLIX - Résistance du TRISOPLAST® à l’agression cationique. Rapport Final. BRGM/RP-56898-FR
- BRGM (2005) – Recommandations pour la caractérisation de la perméabilité des barrières d’étanchéité des installations de stockage de déchets. Rapport BRGM-RP-53721-FR.
- BRGM (1997a) – Mise en œuvre de matériaux rapportés destinés au confinement des centres de stockage. Guide Technique. Document BRGM 271. BRGM, Orléans.
- BRGM (1997b) – Conception d’un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines au droit d’un centre de stockage de déchets, ultimes ou non. Guide méthodologique. Documents du BRGM 273.
- Carsel, R., Parrish, R. (1988) – Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24(5), 755-769.
- CFG (1998) – Recommandations générales pour la réalisation d’étanchéité par géosynthétiques bentonitiques. Comité Français des Géosynthétiques, Fascicule no. 12.
- Edil, T. (2003) - A review of aqueous-phase VOC transport in modern landfill liners. *Waste Management* 23(7): 561-571.
- Environnement & Technique (2006) – Confinement des déchets : les apports de la géochimie pour la compréhension des barrières argileuses. *Environnement & Technique*, Mai 2006 No. 256, pp. 29-33.
- Environnement & Technique (2004) – Fond de sites de stockage de déchets. L’équivalence en étanchéité ? *Environnement & Technique*, Mai 2004 No. 236, pp. 31-34.
- EPA (1991) - Design and construction of RCRA/CERCLA final covers. EPA/625/4-91/025, Cincinnati, OH.
- Geo. Int. (2005) - Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to large circular defects in the geomembrane. *Geosynthetics International*, 12(4), 205-207.

- JCH (2001) - On the hydro-dispersive equivalence of multi-layered mineral barriers. *Journal of Contaminant Hydrology*, n° 51, pp.215-231.
- JNGG (2008) – Etude comparative des performances hydrauliques d’adjuvants argileux en traitement de sols. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l’Ingénieur JNGG’08, Nantes, 18-20 juin 2008.
- JOCE (1999) – Directive du Conseil de l’Union Européenne no. 1999/31/CE concernant la mise en décharge des déchets. *Journal Officiel du Conseil Européen* du 16 juillet 1999.
- LCPC-SETRA (1992) – Guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme ». Fascicule I : principes généraux, Fascicule II : Annexes techniques.
- Li, Y.-H., Gregory, S. (1974) – Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38, 703-714.
- LIXAR2 (2008) - Projet LIXAR2 – Indicateurs de performance pour les géosynthétiques bentonitiques. Rapport de synthèse. BRGM/RP-56357-FR
- LIXAR (2005) - Geosynthetic clay liner interaction with leachate : correlation between permeability, microstructure, and surface chemistry. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 131(6), 740-749.
- SARDINIA (2007a) – French approach to equivalence in landfill geological barriers. Dans : Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium (R. Cossu & R. Stegmann Eds.), S. Margherita di Pula, Cagliari (Italy).
- SARDINIA (2007b) – Rapid method for estimating the low permeability of a high bentonite content soil mixture. Dans : Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium (R. Cossu & R. Stegmann Eds.), S. Margherita di Pula, Cagliari (Italy).
- Talbot (1979) – The accurate numerical integration of Laplace Transforms. *J. Inst. Math. Its Appl.* 23, 97-120.
- Van Genuchten, T. (1980) - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.

Annexe : Outils de calcul d'équivalence et exemples de calcul

A.1. Introduction

Bien que ce guide mette l'accent sur l'importance d'une caractérisation géologique et hydrogéologique adéquate pour démontrer un niveau de protection équivalent, plutôt que sur le calcul théorique, cette annexe présente avec un certain détail le type de calcul qui peut être effectué, mais aussi les limites de ces calculs.

A.2. Outils disponibles dans le commerce

Il existe de nombreux modèles d'écoulement et de transport en milieu poreux qui pourraient être utilisés pour simuler le transfert de polluants au travers d'une barrière multicouche en fond ou en flanc de casier de stockage de déchets. Néanmoins, les deux outils évoqués ci-après sont tout particulièrement adaptés au contexte d'une installation de stockage de déchets. Il s'agit de POLLUTE (<http://www.gaea.ca/>) et CTRAN/W-SEEP/W (<http://www.geo-slope.com/>).

Le modèle POLLUTE est un modèle semi-analytique qui présente l'avantage de ne pas nécessiter la construction d'un maillage, tandis que le modèle CTRAN/W-SEEP/W est un modèle à éléments finis qui requiert donc un maillage. Un avantage important du modèle CTRAN/W-SEEP/W est qu'il tient compte de la non-saturation des couches situées sous la couche de faible perméabilité. Comme il est illustré ci-dessous, cette prise en compte peut aussi être réalisée de manière simplifiée en considérant un écoulement en régime « permanent » et en calculant les teneurs en eau (inférieures à la saturation) des couches non saturées, imposées par l'infiltration contrôlée par la couche faiblement perméable.

On citera également le modèle MISP (téléchargeable gratuitement sur : <http://www2.brgm.fr/misp/>), qui est un modèle analytique qui considère une source de pollution située au-dessus de la nappe d'eau souterraine. Le modèle associe, par convolution, une solution pour le transfert vertical (1D) vers la nappe, avec une solution 3D pour la migration dans l'aquifère. A noter toutefois que son application dans un contexte de calcul d'équivalence est limitée par le fait que MISP ne considère qu'une seule couche au dessus de la nappe. Son utilisation dans ce contexte nécessite par conséquent l'utilisation d'une « perméabilité équivalente » (voir plus loin) qui n'est strictement valable que si les couches sont saturées en eau. Mais dans le cas d'un traceur « parfait », cette hypothèse aura peu d'incidence.

A.3. Outils de calcul simplifiés

A.3.1. Calculs en régime permanent

Dans JCH (2001), on considère le modèle conceptuel de la Figure A1. Si on suppose que le lixiviat, en contact avec la couche minérale supérieure, a une concentration constante (C_0), on peut dériver une équation simple pour la concentration en régime permanent (le plateau de concentration) dans l'aquifère sous-jacent. Cette équation est :

$$c^* = \frac{C_o}{1 + \frac{q H}{Inf L} \left(1 - \exp \left[- Inf \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\theta_i D_i} \right] \right)} \quad (A.1)$$

où :

- c^* = concentration en régime permanent dans l'aquifère,
- C_o = concentration source,
- Inf = infiltration verticale à travers le multicouche,
- L = longueur du site dans le sens d'écoulement des eaux souterraines,
- q = vitesse de Darcy dans l'aquifère ($q = -K * \text{gradient}$),
- H = hauteur de la « couche de mélange » dans l'aquifère,
- n = nombre de couches composant le multicouche,
- e_i = épaisseur de la couche i ,
- θ_i = teneur en eau volumique de la couche i ,
- D_i = coefficient de dispersion de la couche i .

Le coefficient de dispersion dans la couche i est donné par :

$$D_i = \alpha_i \frac{Inf}{\theta_i} + D_o \tau_i \quad (A.2)$$

où : τ_i = tortuosité de la couche i , α_i = dispersivité de la couche i , D_o = coefficient de diffusion du polluant dans l'eau.

Des valeurs typiques des paramètres des couches peuvent être obtenues à partir de données de la littérature. Par exemple, pour un sable, la tortuosité est typiquement de l'ordre de 0.67, tandis que pour un matériau argileux elle est plutôt située entre 0.3 et 0.4. La dispersivité est, en première approximation, égale au dixième de l'épaisseur de la couche. Des valeurs du coefficient de diffusion dans l'eau peuvent être trouvées notamment dans Li et Gregory (1974). Par exemple pour l'ion chlorure, le coefficient de diffusion D_o est de $1.7 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ à 18°C .

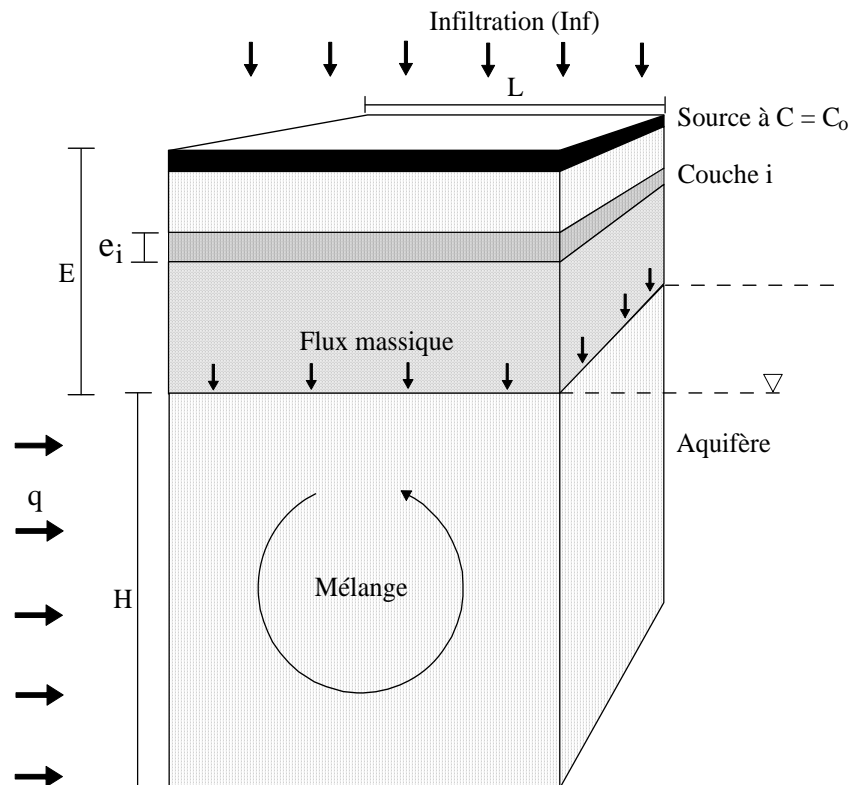


Figure A.1 – Modèle conceptuel pour un système multicouche

A.3.2. Calculs en régime transitoire

Le calcul en régime transitoire est indispensable dans le cas où on considère une source qui varie dans le temps (e.g. source de durée finie). Dans le cas d'une source de concentration constante, le calcul en régime transitoire sert uniquement à savoir à quel moment on devrait voir apparaître telle ou telle concentration dans l'aquifère. En revanche, à long terme, on devrait observer la même concentration que celle fournie par l'équation A.1.

Pour un système multicouche, la résolution complète des équations aux dérivées partielles régissant les transferts de solutés en régime transitoire requiert une approche soit numérique, soit semi-analytique (comme dans POLLUTE). Mais JCH (2001) propose une équation purement analytique, qui est approchée mais qui donne des résultats très comparables, en termes de temps, à ceux des solutions numériques. En termes de plateau de concentration, l'équation donne strictement les mêmes résultats que la solution « exacte » (Equation A.1). L'équation pour le régime transitoire est (JCH, 2001) :

$$\overline{c^*(p)} = \frac{C_o}{p} \cdot \frac{\exp\left[\frac{Inf \varphi}{2}\right] \chi}{\left(\theta_a H p \varphi + \frac{Hq}{L} \varphi\right) \left(\exp\left[\frac{\chi}{2}\right] - \exp\left[-\frac{\chi}{2}\right]\right) + \frac{1}{2} (Inf \varphi + \chi) \exp\left[\frac{\chi}{2}\right] - \frac{1}{2} (Inf \varphi - \chi) \exp\left[-\frac{\chi}{2}\right]}$$

$$\text{avec : } \varphi = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{g_i D_i} \quad \text{et} \quad \chi = \sqrt{Inf^2 \varphi^2 + 4E p \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{D_i}} \quad (\text{A.3})$$

où : $\overline{c^*(p)}$ = concentration dans l'aquifère exprimée dans le domaine de Laplace,
 p = variable de Laplace, θ_a = porosité de l'aquifère.

L'équation A.3 nécessite une inversion numérique de Laplace, avec par exemple la méthode de Talbot (1979).

A.4. Exemples de calcul

A.4.1. Introduction

Les calculs sont effectués pour cinq scénarios illustrés dans la Figure A.2. Un stockage « générique » de 50 mètres de longueur (dans le sens d'écoulement des eaux souterraines) surplombe un aquifère de perméabilité 10^{-4} m/s, de gradient 0.5%, d'épaisseur 10 m et de porosité 20%. La barrière géologique est constituée d'un multicouche, surplombant l'aquifère, dont les épaisseurs des couches sont indiquées dans le Tableau A.1. Les scénarios correspondent à :

- Scénario 1 : scénario « réglementaire »,
- Scénario 2 : renforcement de la couche de 1 m par un GSB pour pallier à des insuffisances du milieu géologique naturel (5 mètres),
- Scénario 3 : idem scénario 2 avec renforcement par une couche de sable-bentonite-polymère (SBP),
- Scénario 4 : réduction d'épaisseur de la couche de 1 mètre avec ajout de GSB, dans le cas où il est démontré une très faible vulnérabilité des eaux souterraines,
- Scénario 5 : idem scénario 4, avec présence de SBP.

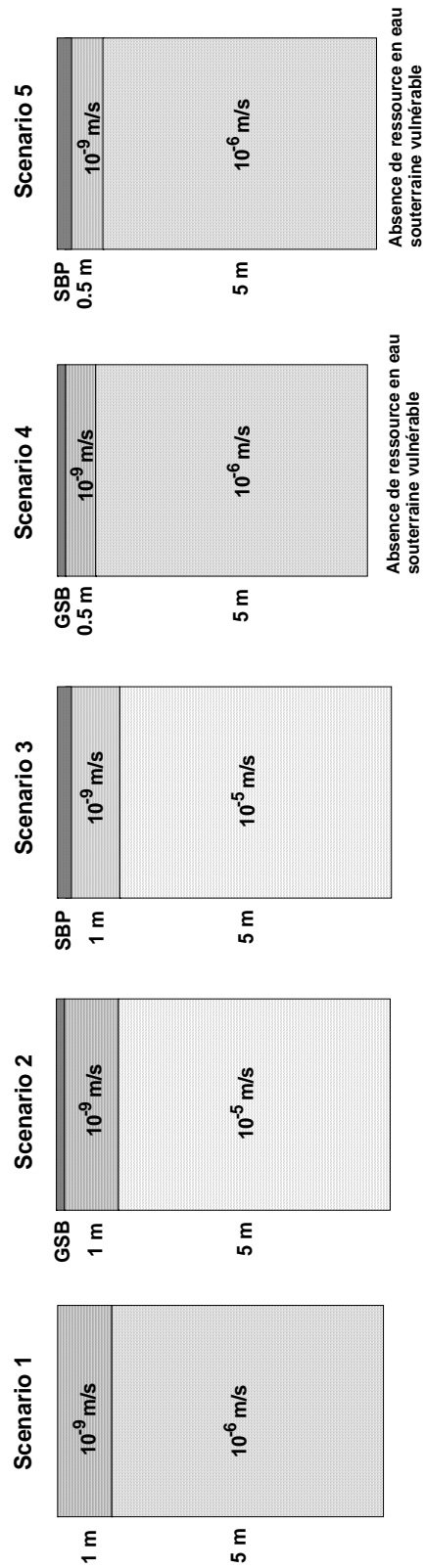


Figure A.2 – Scénarios simulés

Note : GSB = géosynthétique bentonitique ; SBP = mélange sable-bentonite-polymère

Tableau A1 – Scénarios et épaisseurs des matériaux

Scénario	1	2	3	4	5
GSB	--	1 cm	--	1 cm	--
SBP	--	--	7 cm	--	7 cm
Argile	1 m	1 m	1 m	0.5 m	0.5 m
Silt	5 m	--	--	5 m	5 m
Silt sableux	--	5 m	5 m	--	--

A.4.2. Aspects hydrauliques

Une première question a trait à l'infiltration au travers du multicouche et aux teneurs en eau qui en découlent. Comme il sera montré plus bas, ces teneurs en eau peuvent avoir une influence significative sur les résultats dans le cas où on considère un soluté qui subit des réactions de type dégradation et retard (interaction solide/liquide).

On considère que la charge hydraulique qui s'exerce sur le multicouche, est la valeur réglementaire de 30 cm. L'infiltration à travers le multicouche sera contrôlée par la couche la moins perméable (la couche supérieure). Les teneurs en eau des couches situées plus bas vont dépendre de leurs propriétés et notamment de la relation entre leur conductivité hydraulique et leur teneur en eau. L'équation de Van Genuchten (1980) est classiquement utilisée pour représenter cette relation :

$$K(\theta) = K_s \theta_D^{0.5} \left(1 - \left(1 - \theta_D^{\frac{n}{n-1}}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right)^2 \quad \text{avec : } \theta_D = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (\text{A.4})$$

où :

$K(\theta)$ est la conductivité hydraulique à la teneur en eau θ ,

K_s est la conductivité hydraulique à saturation,

θ_s est la teneur en eau saturée,

θ_r est la teneur en eau résiduelle,

n est un paramètre expérimental.

Des valeurs pour ces paramètres sont proposées pour une variété de sols dans, par exemple, Carsel et Parrish (1988). Pour le cas du SBP, les valeurs sont supposées par analogie. Pour les différents matériaux considérés dans les scénarios, les valeurs sont présentées dans le Tableau A.2. Egalement présenté est le paramètre τ (tortuosité), qui est utilisé pour calculer le coefficient de diffusion-dispersion (Equation A.2).

Tableau A.2 – Propriétés des matériaux (pro parte selon Carsel & Parrish, 1988)

Matériau	θ_{sat} (%)	$\theta_{\text{rés}}$ (%)	K_{sat} (m/s)	n	τ
GSB	50	10	5×10^{-11}	--	0.3
SBP	50	10	5×10^{-11}	--	0.3
Argile	38	6.8	1.0×10^{-9}	1.09	0.3
Silt	46	3.4	7×10^{-7}	1.37	0.5
Silt sableux	41	6.5	1.2×10^{-5}	1.89	0.6

Notes : GSB = Géosynthétique bentonitique. SBP = Sable-bentonite-polymère

A noter que pour le GSB, on suppose une conductivité hydraulique à saturation de 5×10^{-11} m/s, valeur couramment utilisée dans les calculs d'équivalence et qui correspond par ailleurs aux valeurs typiquement mesurées sur des produits utilisés en France pour les étanchéités en fond d'installation de stockage (LIXAR2, 2008). La valeur de perméabilité pour la couche de sable-bentonite-polymère est prise volontairement équivalente à celle du GSB, ce qui est cohérent avec les mesures reportées pour ce matériau (par ex. BRGM, 2008).

Dans le cas du Scénario 1, c'est la couche de 1 m de matériau argileux qui contrôle l'infiltration verticale. Le gradient hydraulique qui s'exerce sur cette couche est donc : $(1+0.3) / 1 = 1.3$ et l'infiltration verticale est $Inf = 1.3 \times 10^{-9}$ m/s. Cette infiltration étant inférieure à la perméabilité à saturation de la couche sous-jacente (le silt), cette dernière ne sera pas saturée. A l'aide de l'équation A.4, on peut construire la relation conductivité hydraulique – teneur en eau (Figure A.3) et déterminer quelle sera la teneur en eau qui résultera d'une infiltration de 1.3×10^{-9} m/s pour un gradient hydraulique unitaire (écoulement gravitaire). On trouve : $\theta = 29.5\%$.

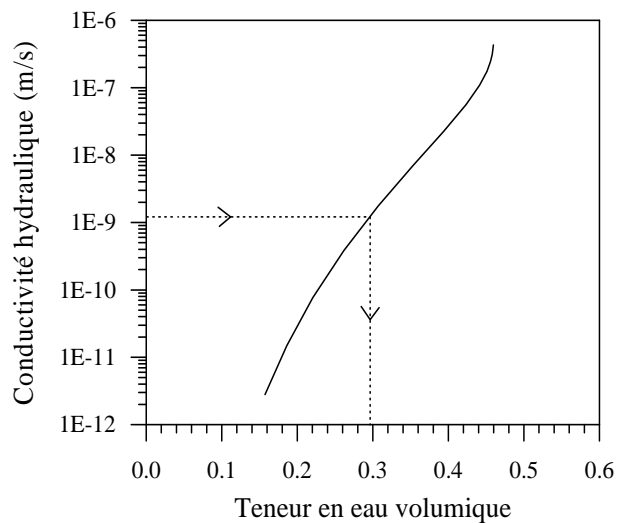


Figure A.3 – Utilisation de la relation Conductivité hydraulique – teneur en eau pour déterminer la teneur en eau résultant d'une infiltration donnée

Dans le cas du Scénario 2, c'est le GSB qui constitue la couche la moins perméable (Idem pour le Scénario 3 avec le SBP). Si on suppose que l'argile sous-jacente n'est pas saturée, le gradient hydraulique qui s'exerce sur le GSB est : $(0.01 + 0.3) / 0.01 = 31$ et l'infiltration verticale serait : $Inf = 1.6 \times 10^{-9}$ m/s. Cette valeur étant supérieure à la perméabilité à saturation de l'argile, on en déduit que l'argile sera saturée et qu'il faut considérer l'ensemble GSB + argile comme une couche équivalente. Le gradient hydraulique est donc $(0.01+1+0.3) / (0.01+1) = 1.3$ (même valeur que pour le scénario 1). La conductivité hydraulique équivalente de l'ensemble GSB + argile est la moyenne harmonique des conductivités respectives :

$$K_{\text{éq}} = \frac{E}{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{K_i}} \quad \text{A.5}$$

On obtient $K_{\text{éq}} = 8.4 \times 10^{-10}$ m/s. L'infiltration en régime permanent au travers du muticouche est donc $Inf = 1.1 \times 10^{-9}$ m/s. La même procédure appliquée aux autres scénarios donne les valeurs du Tableau A.4, qui présente également les teneurs en eau des différentes couches.

Tableau A.3 – Teneurs en eau des différentes couches utilisées pour les calculs de transport

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Infiltration (m/s)	1.3×10^{-9}	1.1×10^{-9}	2.6×10^{-10}	1.2×10^{-9}	2.6×10^{-10}
Matériau	Teneur en eau (%)				
GSB	--	50.0	--	50.0	--
SBP	--	--	50.0	--	50.0
Argile	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0
Silt	29.5	--	--	29.6	25.1
Silt sableux	--	13.1	11.4	--	--

A.4.3. Transport de solutés

Dans un premier temps on considère un traceur non réactif : l'ion chlorure (coefficient de diffusion dans l'eau pure : $D_0 = 2 \times 10^{-9}$ m²/s (voir équation A.2). Les valeurs de concentration en régime permanent calculés (dans Excel) à partir de l'équation A.1 sont présentées dans le Tableau A.4.

Les courbes d'évolution des concentrations, calculées à l'aide de l'équation A.3 sont présentées dans la Figure A.4. On note que les scénarios 1, 2 et 4 donnent des résultats sensiblement équivalents, que ce soit en termes de temps de transfert qu'en termes de plateaux de concentrations. Les scénarios 3 et 5 donnent des concentrations plus faibles, en raison de la plus forte épaisseur du mélange SBP comparée à celle du GSB.

Tableau A.4 – Concentrations relatives dans l'aquifère en régime permanent

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Concentration relative	1.28×10^{-2}	1.08×10^{-2}	2.64×10^{-3}	1.14×10^{-2}	2.68×10^{-3}

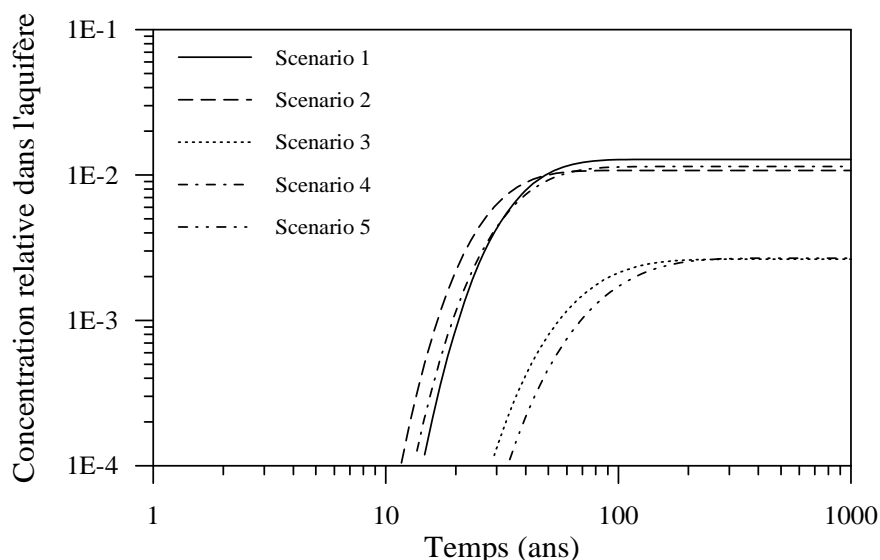


Figure A.4 – Comparaison des scénarios avec teneurs en eau non saturées pour certaines couches

A.4.4. Effet de la non-saturation

On peut s'interroger sur l'utilité de prendre en compte l'éventuel état de non saturation des couches. En effet, si on considère un traceur parfait, le fait de considérer que les couches sont saturées a peu d'influence, comme illustré dans la Figure A.5, qui est presque identique à la Figure A.4.

Mais des différences significatives apparaissent dès lors qu'on considère des polluants réactifs. Les courbes suivantes sont calculées en gardant les mêmes paramètres que précédemment, mais en incluant une constante de dégradation : $\lambda = 0.15$ 1/an (une telle valeur serait représentative, par exemple, pour le trichloroéthylène dans certaines conditions).

Les courbes de la Figure A.6 sont calculées en prenant en compte les teneurs en eau non-saturées des couches plus perméables, tandis que pour la Figure A.7, on a pris les teneurs en eau à saturation. On constate, d'une part, des différences plus fortes entre les scénarios et, d'autre part, que l'ordre des scénarios change suivant qu'on prend en compte ou non la non-saturation. Ceci est lié aux temps de transferts et par conséquent au temps disponible pour qu'opère la dégradation. Par exemple, dans le scénario 2, le matériau sous-jacent plus perméable (silt sableux) a une teneur en eau plus faible (13.1%) et par conséquent le temps de transfert, pour une infiltration donnée, est plus bref dans cette couche, ce qui laisse moins de temps pour la dégradation et donc la

concentration dans l'aquifère est plus élevée. Si on néglige la non-saturation et qu'on prend les teneurs en eau à saturation (Figure A.7), alors le scénario 2 apparaît comme étant plus favorable car le transfert est plus lent et il y a plus de temps pour la dégradation. Cet effet de la dégradation est encore accentué dès lors qu'on inclut des facteurs retard.

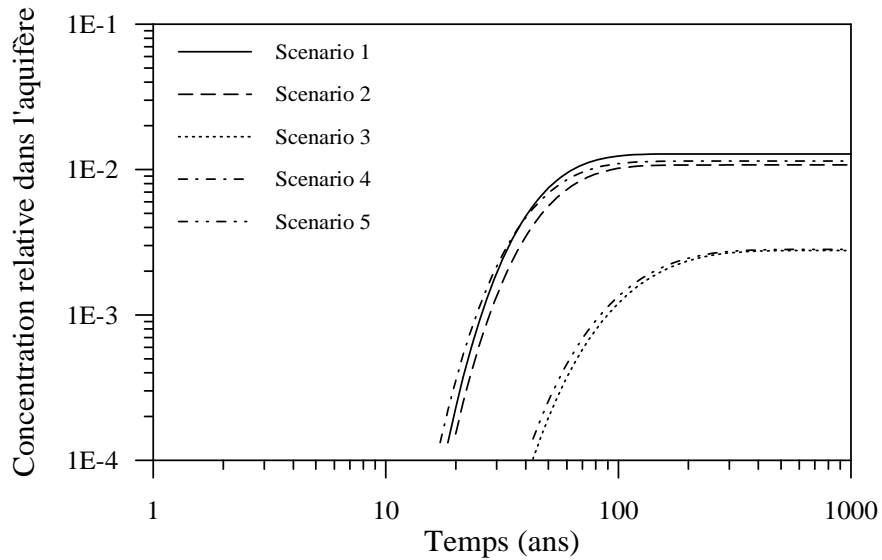


Figure A.5 – Comparaison des scénarios en prenant les teneurs en eau à saturation

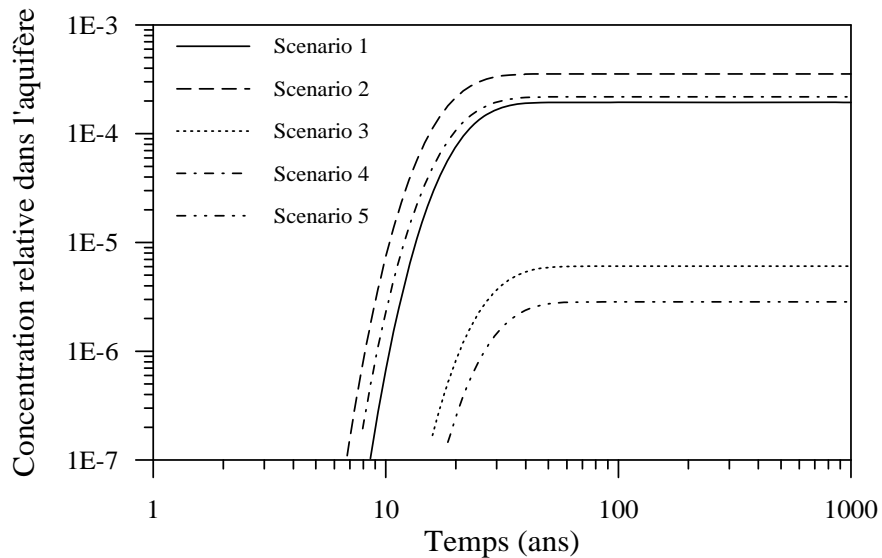


Figure A.6 – Comparaison des scénarios, avec dégradation et avec des teneurs en eau non saturées pour certaines couches

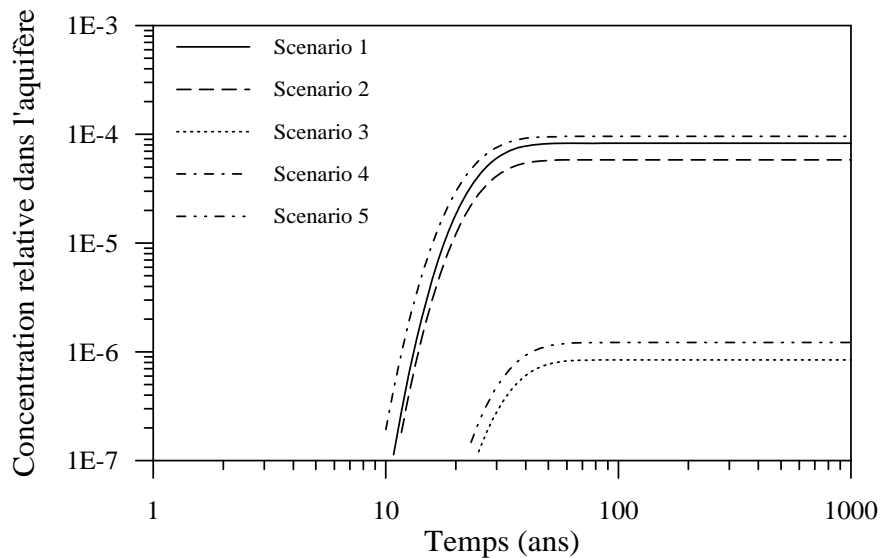


Figure A.7 – Comparaison des scénarios, avec dégradation, en prenant les teneurs en eau à saturation

A.5. Discussion : limites des calculs d'équivalence

Les calculs réalisés dans le cadre de dossiers d'équivalence considèrent des multicouches, dont chaque couche est parfaitement homogène. Or on sait que dans la réalité cela n'est jamais le cas. Comme il est illustré schématiquement dans la Figure 2, les matériaux argileux ont des discontinuités (fentes de dessiccation, interfaces entre les couches compactées), tandis que les GSB peuvent présenter des variations latérales de masse surfacique. A noter qu'aucun modèle utilisé à l'heure actuelle pour ce type de calcul ne rend compte de l'observation indiquée par les manufacturiers de GSB selon laquelle la conductivité hydraulique des GSB diminuerait lorsque la masse surfacique augmente, pour un même gradient hydraulique et une même contrainte de confinement. Les mesures étant réalisées pour un écoulement vertical, si le matériau était parfaitement homogène, on s'attendrait à ce que les valeurs ne soient pas influencées par l'épaisseur, dès lors que l'effet de l'épaisseur sur le gradient hydraulique est pris en compte.

De manière générale, les modèles de calculs utilisés à l'heure actuelle dans les calculs d'équivalence ne peuvent pas rendre compte du fait que **lorsque l'épaisseur d'une couche diminue, les risques liés aux défauts des matériaux augmentent**. C'est pour cette raison que ce guide tente de mettre l'accent sur la démonstration, par des études géologiques et hydrogéologiques adaptées, d'un niveau de protection satisfaisant, plutôt que sur des calculs théoriques tels que ceux présentés dans cette annexe.

Dans la quasi-totalité des calculs d'équivalence, on considère un traceur parfait (l'ion chlorure) et une source constante et de durée infinie. On peut se demander dès lors quel est l'intérêt de prendre en compte la diffusion. En effet, comme il est montré dans SARDINIA (2007a), si la nappe est éloignée d'au moins quelques dizaines de cm de la base de la couche peu perméable, la concentration dans l'aquifère sera contrôlée par

l'infiltration (flux advectif) et non par la diffusion, car le gradient de concentration sera faible.

Pour s'en convaincre il suffit de recalculer les plateaux de concentration du tableau A.5 en ne considérant que le flux advectif. L'équation A.1 devient l'équation de dilution utilisée par certains modèles de risques :

$$c^* = \frac{C_o}{1 + \frac{q H}{Inf L}} \quad \text{A.6}$$

On obtient des valeurs quasiment identiques à celles du Tableau A.5, ce qui implique que c'est l'infiltration (et donc la conductivité hydraulique et le gradient hydraulique) qui influence les résultats. Tout dépend donc de la couche de faible perméabilité. Il est donc clair que faire dépendre toute la sûreté (les performances de la barrière passive) sur l'efficacité d'une couche de très faible épaisseur (un centimètre dans le cas du GSB), paraît peu raisonnable. L'épaisseur demeure un atout et une garantie de sécurité, indépendamment de considérations théoriques sur les transferts en milieux poreux homogènes. C'est notamment pourquoi la position française sur l'utilisation des GSB en « équivalence » (SARDINIA, 2007a), préconise une utilisation en renforcement de couches peu perméables plus épaisses et non une substitution pure et simple de ces couches.