

Document public



Guide de recommandations pour la conception et l'évaluation de dispositifs « d'équivalence » en étanchéité passive d'installations de stockage de déchets - Version 3

Rapport final

BRGM/RP-69449-FR

Décembre 2019



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Guide de recommandations pour la conception et l'évaluation de dispositifs « d'équivalence » d'étanchéité passive d'installations de stockage de déchets - Version 3

Rapport final

BRGM/RP-69449-FR
Décembre 2019

B. Chevrier

Avec la collaboration du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire
(Bureau de la Planification et de la Gestion des Déchets)
et du Groupe de Travail sur les installations de stockage de déchets

Vérificateur :

Nom : P. Michel

Fonction : Correspondante

Date : 09/12/19

Signature :



Approbateur :

Nom : F. Garrido

Fonction : Directeur adjoint

Date : 10/12/2019

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Installation Stockage Déchets, Barrière passive, Équivalence, Note, Perméabilité.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Chevrier B. (2019) – Guide de recommandations pour la conception et l'évaluation de dispositifs « d'équivalence » d'étanchéité passive d'installations de stockage de déchets – Version 3 – Rapport final - Rapport BRGM/RP-69449-FR, 47 p., 6 ill., 3 tab., 1 ann.

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Le présent guide a été élaboré, à la demande du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, par un groupe de travail composé de :

- Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES), Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR), Bureau de la planification et de la gestion des déchets (BPGD) ;
- ANTEAGROUP ;
- AMORCE ;
- ARCADIS ;
- BRGM ;
- BURGEAP ;
- CHASSAGNAC CONSEILS ;
- DRIEE ;
- DSC ;
- ECOGEOS ;
- EODD ;
- FNADE ;
- FRANCE NATURE ENVIRONNEMENT ;
- INERIS ;
- INFRAG ;
- IRSTEA ;
- PAPREC ;
- PIZZORNO ;
- SAFEGE ;
- METED_K ;
- ROBIN DES BOIS ;
- RAZEL-BEC FAYAT ;
- SAFEGE ;
- GROUPE SECHE ;
- SOLVAY ;
- SUEZ ENVIRONNEMENT ;
- VEOLIA.

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). Les installations de stockage de déchets dangereux (ISDD) font l'objet de spécificités particulières. Cette version du guide est une réactualisation de la version de février 2009 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 faire l'objet de prescriptions techniques détaillées dans les Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP). Ces éléments doivent permettre d'apprécier le niveau de protection offert par le dispositif équivalent. À 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 nécessaire, pour justifier l'équivalence, plusieurs exemples sont présentés en détail en annexe de ce guide.

On notera que si ce guide propose des recommandations concernant les 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 5 de l'arrêté du 15 février 2016).

Sommaire

1. Introduction	7
1.1. CONTEXTE	7
1.2. OBJECTIFS DE CE GUIDE	7
1.3. CADRE RÉGLEMENTAIRE	7
1.4. RAPPEL SUR LES ROLES RESPECTIFS DES BARRIÈRES ACTIVES ET PASSIVES	9
1.5. DÉFINITION DE L'ÉQUIVALENCE	10
1.6. CAS SPÉCIFIQUE DES CASIERS EN REHAUSSE	11
2. Éléments de justification de l'équivalence en étanchéité passive.....	13
2.1. INTRODUCTION	13
2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE	13
2.3. ÉPAISSEUR DE LA BARRIÈRE ÉQUIVALENTE	13
2.4. ÉVALUATION DE L'IMPACT POTENTIEL.....	14
2.4.1. Approche de l'évaluation.....	14
2.4.2. Méthode de calcul.....	14
3. La note justificative	17
3.1. LES ÉLÉMENTS DU RENDU	17
3.2. EXEMPLES D'ÉQUIVALENCES.....	17
3.2.1. Introduction.....	17
3.2.2. Exemple 1.....	17
3.2.3. Exemple 2.....	21
3.2.4. Quelques solutions d'équivalence.....	22
3.3. LE CAS DES FLANCS.....	25
3.3.1. Introduction.....	25
3.3.2. Cas des flancs au-delà de 2 m par rapport au fond de casier	26
3.3.3. Considérations finales sur les flancs	27
3.4. RECOMMANDATIONS CONCERNANT CERTAINS MATÉRIAUX ALTERNATIFS..	28
3.4.1. Préambule	28
3.4.2. Les géosynthétiques bentonitiques	28
3.4.3. Recommandations concernant les sols traités	29
3.4.4. Recommandations particulières concernant les mélanges sable-bentonite- polymère.....	29
4. Précautions d'utilisation du guide	31
5. Références citées.....	33

Liste des Figures

Figure 1 - Illustration des prescriptions de l'article 8 de l'arrêté de 2016.	8
Figure 2 - Schéma de la situation existante.	18
Figure 3 - (a) : reconstitution complète de la barrière passive au-dessus du terrain naturel. (b) : dispositif équivalent proposé.	20
Figure 4 : Évolution de la concentration relative calculée dans l'aquifère en aval immédiat de l'installation de stockage.	20
Figure 5 - Schéma de principe des hypothèses de calcul des solutions d'équivalence proposées.	22
Figure 6 - Traitement des risbermes.	26

Liste des tableaux

Tableau 1 - Distinction entre barrière « active » et « passive ».	10
Tableau 2 - Indicateurs permettant de sélectionner les GSB sodiques utilisés en étanchéité de fond de casier d'ISDND (LIXAR2, 2008)	28
Tableau 3 - Épaisseur et perméabilité des GSB en fonction de la contrainte verticale.	29

Liste des annexes

Annexe 1 : Outils de calcul d'équivalence et exemples de calculs	35
--	----

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Les premières versions du « Guide Équivalence » sont parues respectivement en Juillet 2002 et Février 2009. Un groupe de travail a été constitué en 2014 afin de réactualiser ce guide, en fonction notamment, des évolutions réglementaires scientifiques et techniques.

1.2. OBJECTIFS DE CE GUIDE

La notion « d'équivalence » est actuellement autorisée dans le cadre de la réalisation de barrière passive de casiers ou de bassins de lixiviats 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 les acteurs du stockage des déchets élaborent un guide de recommandations afin de définir les règles de bonne pratique.

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

1.3. CADRE RÉGLEMENTAIRE

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

L'arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux, précise (Art. 8) :

« La protection du sol, des eaux souterraines et de surface est assurée par une barrière géologique dite « barrière de sécurité passive » constituée du terrain naturel en l'état répondant aux critères suivants :

- *le fond de la zone à exploiter présente, de haut en bas, une couche de perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s sur au moins 1 mètre d'épaisseur et une couche de perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-6} m/s sur au moins 5 mètres d'épaisseur ;*
- *les flancs de la zone à exploiter présentent une perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s sur au moins 1 mètre d'épaisseur sur toute leur hauteur ».*

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

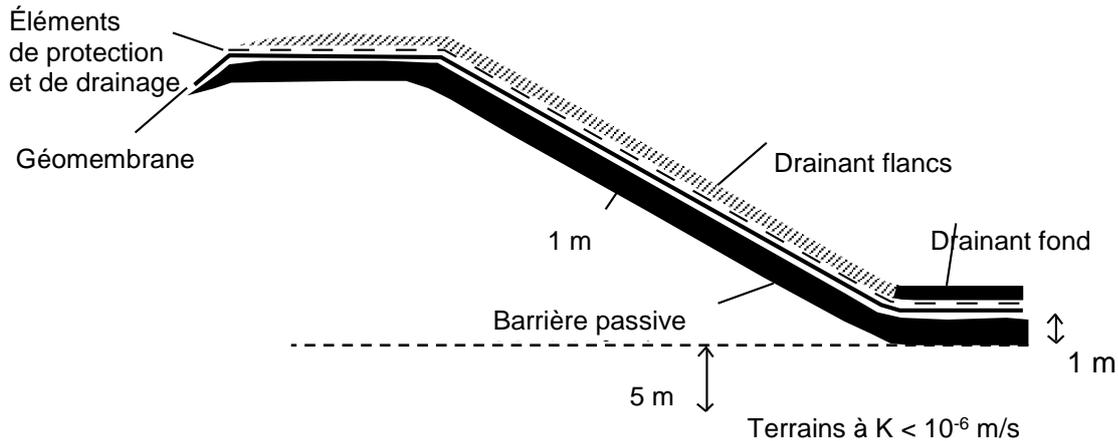


Figure 1 - Illustration des prescriptions de l'article 8 de l'arrêté de 2016.

La configuration de la Figure 1 est théorique : dans la pratique, pour que des matériaux à $K < 10^{-9}$ m/s soient présents naturellement sur les flancs, il faudrait que le casier soit entièrement creusé dans une formation à faible perméabilité présentant ces caractéristiques. 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 est complétée 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 2 mètres par rapport au fond. »

L'ensemble des éléments relatifs à l'équivalence de la barrière de sécurité passive est décrit dans la demande d'autorisation d'exploiter ».

« Une extension de la zone exploitée au droit ou en appui sur des casiers existants ne peut être réalisée que sur un massif de déchets stabilisé. L'exploitant doit en apporter la preuve ».

Enfin, l'arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux, précise (Art. 9) :

« Dans ce cas, si les dispositifs d'étanchéité ne sont pas conformes aux prescriptions de l'article 8, une barrière d'étanchéité passive conforme doit être mise en place sur le fond et les flancs des nouveaux casiers. »

Le dimensionnement de ce système équivalent est justifié par une étude d'équivalence. 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 du présent article figure dans le dossier de demande d'autorisation ».

Enfin, l'arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux mentionne (Art. 11) que *« Les bassins de stockage de lixiviats sont étanches et résistants aux substances contenues dans les lixiviats. Leurs dispositifs d'étanchéité sont constitués, du haut vers le bas, d'une géomembrane et d'une barrière d'étanchéité passive présentant une perméabilité égale ou inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s sur une épaisseur d'au moins 50 centimètres ou tout système équivalent ».*

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 1^{er} alinéa. En tout état de cause, l'épaisseur de la barrière reconstituée sera au minimum de cinquante centimètres ».*

**il convient de préciser qu'il s'agit de l'épaisseur de la barrière reconstituée sur les flancs à partir d'une hauteur de 5,0 m par rapport au fond de casier.*

On rappellera également les dispositions de la Directive du Conseil n°. 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. »*

1.4. RAPPEL SUR LES ROLES RESPECTIFS DES BARRIÈRES ACTIVES ET PASSIVES

Le dispositif d'étanchéité de fond et de flancs des ISDD et ISDND est constitué de deux barrières distinctes et complémentaires :

- la barrière active, constituée d'un niveau drainant surmontant une géomembrane. Elle a pour fonctions l'étanchéité, le drainage et la collecte des lixiviats en vue de leur traitement ;
- la barrière passive, constituée des terrains en place ou reconstituée, comprend une couche peu perméable surmontant, dans le cas des ISDND, une couche plus perméable dite « d'atténuation ». Elle a pour fonctions, d'une part, de limiter les flux de lixiviats vers le milieu naturel et, d'autre part, de réduire la charge polluante de ces lixiviats.

	Fonctions	Matériaux
Barrière dite « active »	Drainage	Granulaires, nappes drainantes
	Étanchéité active	Géomembrane
Barrière dite « passive »	Étanchéité passive	Argiles naturelles, matériaux fins, GSB, sols traités, SBP, ...
	Atténuation	Sol naturel

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

Tableau 1 - Distinction entre barrière « active » et « passive ».

Il est important de souligner que ces deux niveaux de sécurité sont **complémentaires et indépendants**. 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 pallier une insuffisance de l'autre barrière. 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.

1.5. DÉFINITION DE L'ÉQUIVALENCE

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 répondent pas naturellement à l'ensemble des prescriptions réglementaires.

La principale cible protégée par 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.

L'évaluation de l'équivalence se situe dans un cadre « **semi-générique** ». Dans le cadre de cette évaluation, les seules différences prises en compte sont celles des dispositifs d'étanchéité passive. Les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère cible sont identiques pour tous les dispositifs étudiés.

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 ?

1.6. CAS SPÉCIFIQUE DES CASIERS EN REHAUSSE

Dans le cas spécifique de la conception des barrières passives des casiers d'ISD en rehausse, le lecteur s'appuiera sur le guide « Guide de recommandations pour la conception des casiers d'ISDND en appui sur des casiers anciens » à compter de sa publication.

L'article 9 de l'arrêté ministériel du 15 février 2016 mentionne que :

« Une extension de la zone exploitée au droit ou en appui sur des casiers existants ne peut être réalisée que sur un massif de déchets ne présentant pas de risque de tassements qui par leur amplitude peuvent affecter le bon fonctionnement des barrières de sécurité passive et active. L'exploitant doit en apporter la preuve. L'exploitant doit également apporter la preuve de la stabilité du casier construit au droit ou en appui sur des casiers existants ».

Le recours à une solution équivalente est prévu par cet arrêté. La démonstration de la conformité de ce dispositif équivalent devra être réalisée en accord avec les recommandations du présent guide.

Plus particulièrement, une connaissance précise du massif de déchets sous-jacent est nécessaire et doit être démontrée dans la description du contexte géologique et hydrogéologique du site : épaisseur, paramètres hydrauliques (mesurés ou extrapolés), stabilité mécanique et état de dégradation biologique des déchets.

Dans le cas où la stabilité biologique de ce massif est démontrée, les déchets le constituant peuvent être inclus, pour tout ou partie, dans le dispositif de barrière passive.

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

2.1. INTRODUCTION

L'étude d'équivalence doit s'appuyer sur les résultats de la caractérisation géologique et hydrogéologique réalisée préalablement, pour être en mesure de répondre à certaines questions clés, 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, ...) ?

Ces éléments doivent figurer dans le volet géologique et hydrogéologique du dossier de demande d'autorisation d'exploiter (DDAE) et la note justificative de l'équivalence doit en faire la synthèse.

2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

La note d'équivalence devra être basée sur une connaissance du contexte géologique et hydrogéologique qui permet d'établir un modèle fiable du site en conformité avec les prescriptions du guide AFNOR BP X30-438.

Les données géologiques et hydrogéologiques recueillies lors de la phase documentaire permettent d'ores et déjà d'envisager ou non le recours à une équivalence.

2.3. ÉPAISSEUR DE LA BARRIÈRE ÉQUIVALENTE

Selon les prescriptions de l'arrêté du 15 février 2016 relatif aux ISDND, dans le cas du recours à l'équivalence, le dispositif d'étanchéité passive en fond de casier doit présenter *a minima* une couche de 1,0 m d'épaisseur. Sur les flancs, jusqu'à une hauteur de 2,0 m par rapport au fond de casier, l'épaisseur minimale de dispositif est de 0,5 m.

Selon l'arrêté du 30 décembre 2002 relatif aux ISDD, une solution équivalente ne peut être appliquée que sur les flancs, à partir d'une hauteur de 5,0 m par rapport au fond de casier. Dans ce cas, la barrière passive doit présenter une épaisseur minimale de 0,5 m.

La réglementation autorise donc, dans une certaine mesure, la réduction de l'épaisseur totale des dispositifs d'étanchéité passive des ISD, à condition qu'ils présentent des performances équivalentes aux dispositifs réglementaires de base.

Une solution couramment appliquée pour obtenir cette équivalence consiste à renforcer la barrière passive avec des matériaux en couches fines (quelques millimètres à quelques centimètres), présentant des valeurs de perméabilité faibles ($\sim 5 \cdot 10^{-11}$ m/s).

En fonction des conditions technico-économiques du site, une autre solution pour répondre aux exigences de conformité consistera à augmenter l'épaisseur et/ou à réduire la perméabilité de la couche peu perméable de la barrière passive.

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

On notera que si la réglementation relative aux ISD en vigueur en France, ne stipule pas une distance minimale entre la base de la couche de perméabilité $< 1.10^{-9}$ m/s et la surface de la nappe d'eau souterraine, en revanche il est clair que cet élément intervient dans l'évaluation de l'équivalence.

Il conviendrait que les plus hautes eaux connues d'une nappe¹ libre avérée se situent au moins à une distance de 2 m de la base de la couche de $1 \text{ m à } 10^{-9} \text{ m/s}$.

2.4. ÉVALUATION DE L'IMPACT POTENTIEL

2.4.1. Approche de l'évaluation

Le calcul n'est pas obligatoire dans tous les cas de figure.

Dans le cas où une justification quantifiée de l'équivalence n'est pas nécessaire, la note d'équivalence s'attachera alors à démontrer qualitativement la pertinence et la conformité réglementaire du dispositif proposé.

Dans le cas où une justification quantifiée de l'équivalence est nécessaire, il est requis lors de la comparaison entre différentes configurations de barrière d'utiliser exactement les mêmes caractéristiques du milieu aquifère, issues du modèle géologique et hydrogéologique.

Par ailleurs, il est préconisé de calculer l'évolution de la concentration relative (c/c_0) d'un traceur parfait dans l'aquifère cible où :

- c est la concentration dans l'aquifère cible ;
- c_0 est la concentration source (casier de stockage), prise comme étant unitaire et constante dans le temps.

On compare donc différentes successions de couches constitutives de la barrière, **toutes choses étant égales par ailleurs** (cf. §1.5). On se place par conséquent dans un cadre **semi-générique**, plutôt que dans un cadre de type « évaluation des risques ».

2.4.2. Méthode de calcul

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.

¹ Ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique (Dictionnaire français d'hydrogéologie, G. Castany, J. Margat, 1977).

Aquifère : corps de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. Un aquifère peut comporter une zone non saturée. (Dictionnaire français d'hydrogéologie, G. Castany, J. Margat, 1977).

Il est rappelé qu'un flux massique est une masse émise par unité de temps. Pour ce qui concerne le transfert de polluants dissous 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).

Le flux advectif a une influence sur la valeur du plateau de concentration dans l'aquifère (régime permanent) ainsi que sur l'évolution de cette concentration dans le temps (régime transitoire).

Pour une source supposée constante, un traceur parfait et des valeurs typiques de paramètres hydrauliques, le flux diffusif influencera le régime transitoire mais peu, voire pas du tout le régime permanent (plateau). On notera de plus que le flux diffusif ne dépend pas de la perméabilité du milieu.

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, telles que celles présentées 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 qui sert à calculer leur effet sur une ressource en eau souterraine, située à l'aplomb de la zone de stockage.

3. La note justificative

3.1. LES ÉLÉMENTS 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 le niveau des nappes d'eau souterraine au droit et dans le voisinage du projet et les mettre en perspective par rapport aux caractéristiques et à la position (notamment les cotes) du fond de forme du projet ;
- le modèle géologique et hydrogéologique : 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) ;
- l'inventaire et la carte des cibles potentielles (AEP, etc.) : il s'agit d'éléments du dossier de demande d'autorisation d'exploiter ;
- 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 casiers et la position des flancs ;
- la proposition d'un programme de contrôle de mise en œuvre interne, externe et extérieur ;
- une évaluation quantitative ou semi-quantitative (calcul) 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'ÉQUIVALENCES

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 réel et l'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 non dangereux. Il est décrit ici de manière succincte en mettant l'accent sur la démarche proposée et sur la justification de l'équivalence.

Situation géologique et hydrogéologique

La géologie du site est représentée schématiquement dans la Figure 2. 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 15 février 2016 relatif au stockage des déchets non dangereux, la géologie du site présente des non-conformités en raison de l'absence de la couche de 1 m à $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s et de la perméabilité des limons qui est légèrement supérieure à la valeur réglementaire de $1,0 \times 10^{-6}$ 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 3a ; 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 géosynthétique bentonitique (GSB) à base de bentonite sodique.

Cette proposition de dispositif équivalent est présentée en Figure 3b.

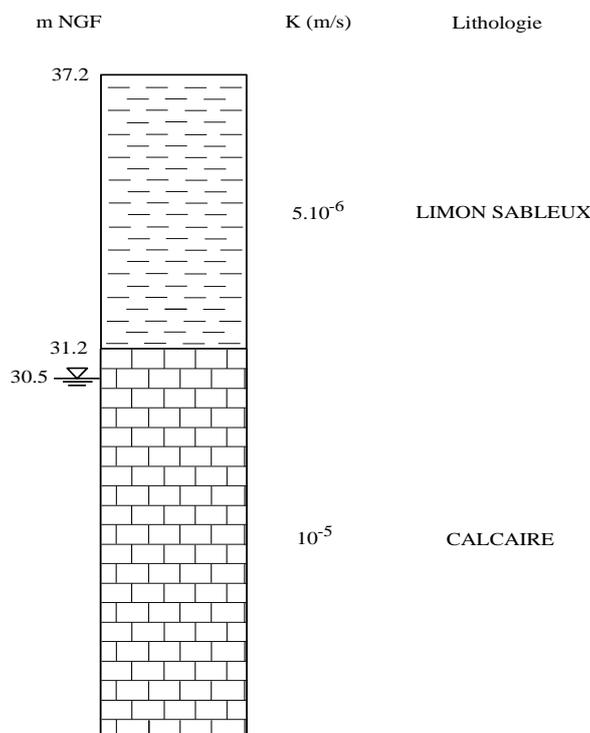


Figure 2 - Schéma de la situation existante.

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 rappeler 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 3a et le GSB dans la Figure 3b). 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).

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 3.4.

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 illustrée par la Figure 4. 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 4 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 3a, tandis que le scénario 2 correspond à la Figure 3b.

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 3b) est au moins équivalent au scénario 1.

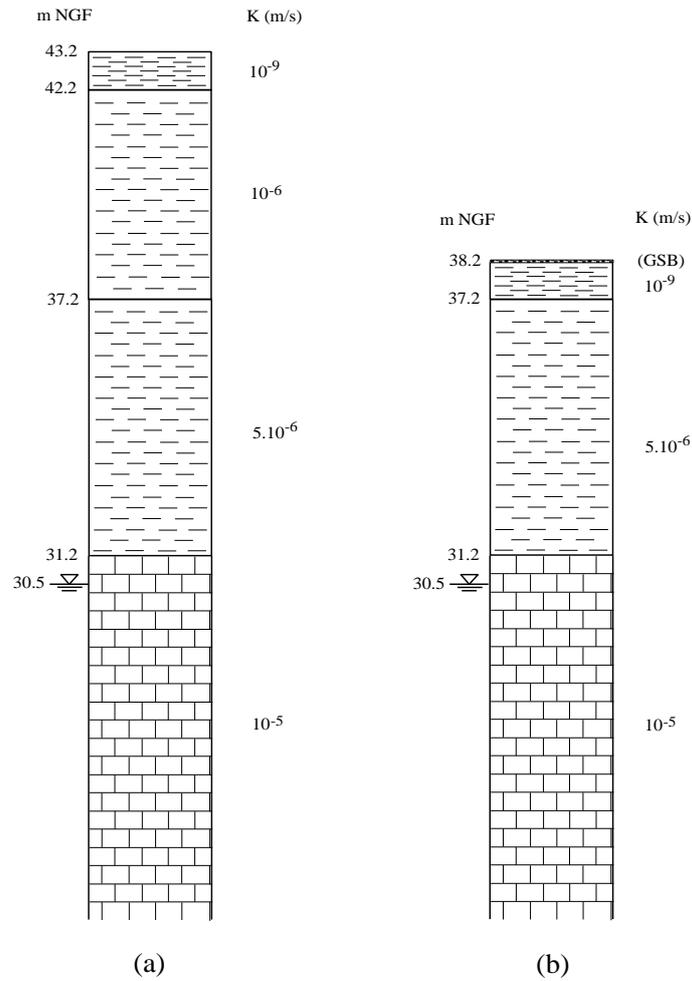


Figure 3 - (a) : reconstitution complète de la barrière passive au-dessus du terrain naturel. (b) : dispositif équivalent proposé.

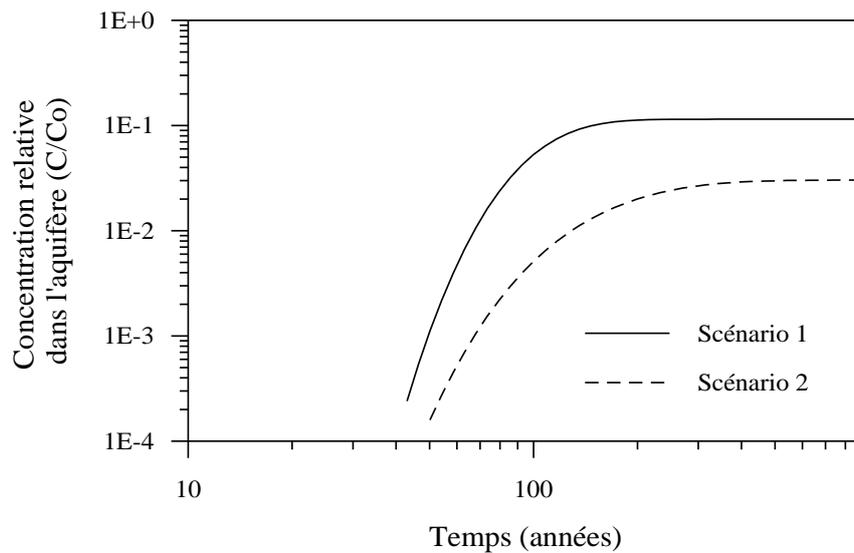


Figure 4 - Évolution de la concentration relative calculée dans l'aquifère en aval immédiat de l'installation de stockage.

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 régis 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.

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 de conformité ($1 \cdot 10^{-6}$ 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. Quelques solutions d'équivalence

Les tableaux suivants proposent des solutions génériques au-moins équivalentes à la solution de base de l'arrêté du 15 février 2016. Ces solutions garantissent, d'un point de vue théorique, que les dispositifs sont équivalents à la solution réglementaire de base **tant en régime transitoire qu'à l'équilibre** (voir Annexe A).

Les concepteurs pourront retenir ces solutions et s'abstenir de réaliser les calculs de la note d'équivalence.

En cas de modification de l'épaisseur et/ou de la perméabilité de la couche supérieure reconstituée, la note d'équivalence devra comporter les calculs recommandés.

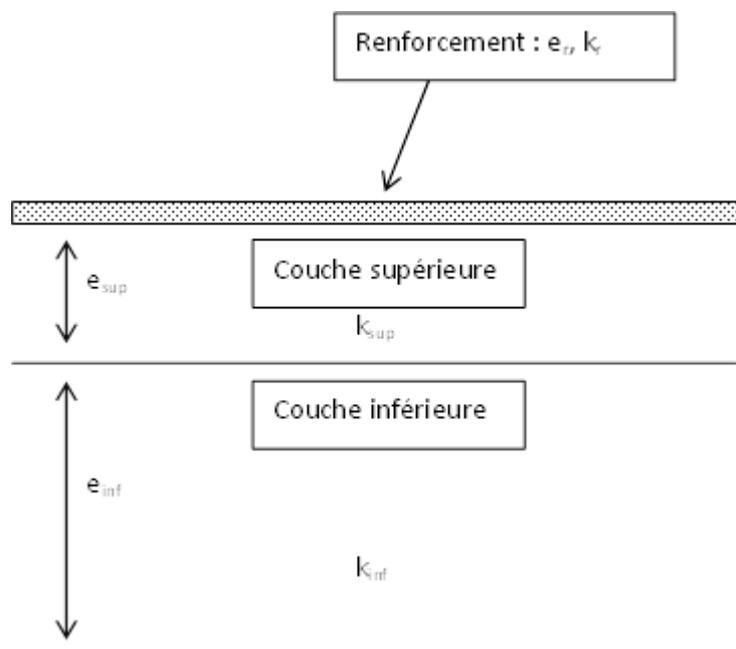


Figure 5 - Schéma de principe des hypothèses de calcul des solutions d'équivalence proposées.

Solutions reposant sur l'épaisseur de la couche supérieure

Épaisseur e_{sup} de la barrière supérieure reconstituée en fonction des perméabilités des barrières unitaires.								
Épaisseur de la couche inférieure $e_{inf}=5$ Renforcement : non								
		Perméabilité k_{inf} de la couche inférieure						
		1.10^{-4}	5.10^{-5}	1.10^{-5}	5.10^{-6}	1.10^{-6}	5.10^{-7}	1.10^{-7}
Perméabilité k_{sup} de la couche supérieure reconstituée	1.10^{-9}	1,2	1,2	1,2	1,1	1	1	1
	5.10^{-10}	1	1	1	1	1	1	1
	1.10^{-10}	1	1	1	1	1	1	1

Solutions reposant sur la présence d'une couche de renforcement et l'épaisseur de la couche supérieure

Épaisseur e_{sup} de la barrière supérieure reconstituée en fonction des perméabilités des barrières unitaires.								
Épaisseur couche inférieure $e_{inf}=5$ m Renforcement : GSB ($e_r=8$ mm, $k_r=3.10^{-11}$ m/s)								
		Perméabilité k_{inf} de la couche inférieure						
		1.10^{-4}	5.10^{-5}	1.10^{-5}	5.10^{-6}	1.10^{-6}	5.10^{-7}	1.10^{-7}
Perméabilité k_{sup} de la couche supérieure reconstituée	1.10^{-9}	1,1	1	1	1	1	1	1
	5.10^{-10}	1	1	1	1	1	1	1
	1.10^{-10}	1	1	1	1	1	1	1

Épaisseur e_{sup} de la barrière supérieure reconstituée en fonction des perméabilités des barrières unitaires.								
Épaisseur de la couche inférieure $e_{inf}=5$ m Renforcement: sable bentonite polymère ($e_r=9$ cm, $k_r=3.10^{-11}$ m/s)								
		Perméabilité k_{inf} de couche inférieure						
		1.10^{-4}	5.10^{-5}	1.10^{-5}	5.10^{-6}	1.10^{-6}	5.10^{-7}	1.10^{-7}
Perméabilité k_{sup} de la couche supérieure reconstituée	1.10^{-9}	1	1	1	1	1	1	1
	5.10^{-10}	1	1	1	1	1	1	1
	1.10^{-10}	1	1	1	1	1	1	1

Épaisseur e_{sup} de la barrière supérieure reconstituée en fonction des perméabilités des barrières unitaires.								
Épaisseur de la couche inférieure $e_{inf}=2$ m Renforcement : GSB ($e_r=8$ mm, $k=3.10^{-11}$ m/s)								
		Perméabilité de la tranche de 5 m non saturée sous la couche supérieure reconstituée						
		1.10^{-4}	5.10^{-5}	1.10^{-5}	5.10^{-6}	1.10^{-6}	5.10^{-7}	1.10^{-7}
Perméabilité de la couche supérieure reconstituée	1.10^{-9}		1	1	1	1	1	1
	5.10^{-10}	1	1	1	1	1	1	1
	1.10^{-10}	1	1	1	1	1	1	1

Épaisseur e_{sup} de la barrière supérieure reconstituée en fonction des perméabilités des barrières unitaires.								
Épaisseur de la couche inférieure $e_{inf}=2$ m Renforcement : SBP ($e_r=9$ cm, $k_r=3.10^{-11}$ m/s)								
		Perméabilité k_{inf} de la couche inférieure						
		1.10^{-4}	5.10^{-5}	1.10^{-5}	5.10^{-6}	1.10^{-6}	5.10^{-7}	1.10^{-7}
Perméabilité k_{sup} de la couche supérieure reconstituée	1.10^{-9}	1	1	1	1	1	1	1
	5.10^{-10}	1	1	1	1	1	1	1
	1.10^{-10}	1	1	1	1	1	1	1

Solutions reposant sur la présence d'une couche de renforcement et l'épaisseur de la couche inférieure

Épaisseur e_{inf} de la barrière inférieure en fonction de la perméabilité des barrières unitaires.								
Épaisseur couche supérieure $e_{sup}=0,5$ m								
Renforcement : GSB ($e_r=8$ mm, $k_r=3.10^{-11}$ m/s)								
		Perméabilité k_{inf} de la couche inférieure						
		1.10^{-4}	5.10^{-5}	1.10^{-5}	5.10^{-6}	1.10^{-6}	5.10^{-7}	1.10^{-7}
Perméabilité k_{sup} de la couche supérieure reconstituée	1.10^{-9}	8	7,5	7	7	6,5	6	6
	5.10^{-10}	8	7,5	7	6,5	6,5	6	6
	1.10^{-10}	8	7,5	7	6,5	6,5	6	6

Épaisseur e_{inf} de la barrière inférieure en fonction de la perméabilité des barrières unitaires								
Épaisseur couche supérieure $e_{sup}=0,5$ m								
Renforcement : SBP ($e_r=9$ cm, $k_r=3.10^{-11}$ m/s)								
		Perméabilité k_{inf} de la couche inférieure						
		1.10^{-4}	5.10^{-5}	1.10^{-5}	5.10^{-6}	1.10^{-6}	5.10^{-7}	1.10^{-7}
Perméabilité k_{sup} de la couche supérieure reconstituée	1.10^{-9}	4	4	4	3,5	3,5	3	3
	5.10^{-10}	4	4	4	3,5	3,5	3	3
	1.10^{-10}	4	4	4	3,5	3,5	3	3

3.3. LE CAS DES FLANCS

3.3.1. Introduction

Comme précisé dans la note d'application de l'arrêté du 15 février 2016, on considère comme flanc toute zone du casier dont la pente minimale excède 14 % (8°).

Sur pente forte et sur de grandes longueurs de rampants, il peut être décidé d'utiliser des risbermes pour réduire la sollicitation mécanique des matériaux géosynthétiques mais aussi en raison de la longueur des rouleaux.

Pour le cas particulier des risbermes, on distingue deux configurations :

- la pente de la risberme est supérieure à 5 % et dirigée vers l'intérieur du casier. La risberme est considérée comme un flanc ;
- la pente de la risberme est inférieure à 5 % et/ou dirigée vers l'extérieur du casier (vers le talus). La risberme est considérée comme un fond. Un drainage complémentaire devra y être mis en œuvre.

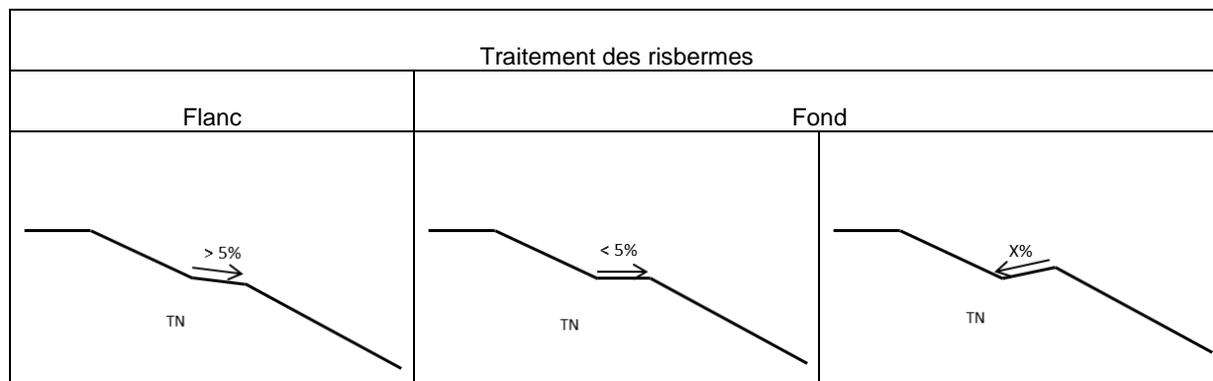


Figure 6 - Traitement des risbermes.

Les talus constituent un point délicat de l'aménagement des installations de stockage, notamment pour respecter une perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s sur au moins un mètre. La difficulté de compacter de l'argile sur une surface pentée motive la recherche d'une solution équivalente.

Néanmoins, conformément à la réglementation, la couche de fond d'un mètre à 1.10^{-9} m/s est 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 doit pas être inférieure à 2 m au-dessus du fond de forme (cf. Arrêté de 2016).

3.3.2. Cas des flancs au-delà de 2 m par rapport au fond de casier

Il est techniquement possible d'envisager la reconstitution d'une barrière passive de 1 m à 1.10^{-9} m/s sur toute la hauteur des talus, par la méthode excédentaire notamment. Néanmoins, en pratique, cette option est peu retenue au profit d'une solution équivalente basée sur des matériaux alternatifs : géosynthétiques bentonitiques (GSB) ou sable bentonite polymère (SBP).

Dans le cas où un GSB est utilisé sur les flancs, une attention toute particulière devra être apportée à l'état de surface (cf. Fascicule n° 13 du Comité Français des Géosynthétiques²).

L'expérience montre que lorsqu'un GSB est placé sous une géomembrane exposée, comme c'est le cas pour les flancs, sur des durées 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 ;

² Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets (CFG, 2011)

- une largeur de recouvrement insuffisante ;
- la présence d'une géomembrane texturée en contact avec le GSB (solution non recommandée par le CFG) ;
- une tension dans le GSB sur pente conduisant à une réduction des dimensions dans le sens de la largeur.

Les préconisations du Fascicule n° 13 du CFG visant à limiter ces effets sont les suivantes :

- 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 ;
- n'utiliser que des géomembranes lisses sauf cas particulier à justifier par la maîtrise d'œuvre ;
- ne pas utiliser des GSB comportant des géotextiles non tissés aiguilletés des deux côtés de la bentonite, sauf si l'un d'eux est renforcé ;
- s'assurer d'un traitement de la zone de recouvrement inter-lés par de la bentonite en poudre ou en pâte.

Plus particulièrement, le Fascicule n° 13 du CFG recommande les largeurs de recouvrement minimales suivantes :

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

Un point particulièrement important à prendre en compte est la résistance mécanique de l'ensemble des couches superposées. On cherchera à éviter la transmission de sollicitation mécanique vers les géosynthétiques d'étanchéité : principe de séparation des fonctions et création d'un « niveau de décollement ». Des systèmes d'ancrage des GSB sur pente sont proposés dans les fascicules 12 et 13 du CFG.

Pour le dimensionnement et le calcul de stabilité du DEG, on renverra le lecteur vers le fascicule n° 13 du CFG.

3.3.3.Considérations 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. Le sujet des flancs est toutefois plus complexe que celui des fonds car les considérations de stabilité mécanique, de faisabilité permettant d'atteindre la performance attendue y sont prépondérantes. Dès lors, il vaut mieux réserver le calcul à celui de la stabilité, en prenant en compte les angles de frottement de chaque interface (Cf. Fascicule n° 13). 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 de lixiviats perchées.

3.4. RECOMMANDATIONS CONCERNANT CERTAINS MATÉRIAUX ALTERNATIFS

3.4.1. Préambule

On aborde dans ce sous-chapitre le cas de certains matériaux peu perméables qui présentent un intérêt particulier dans un contexte de barrières passives, l'objectif étant de fournir des recommandations pour optimiser leur utilisation. Il est important de souligner qu'il n'est pas exprimé, dans ce guide, de préférence pour un matériau en particulier, différents matériaux potentiellement utilisables présentant des avantages et des inconvénients relatifs suivant les conditions spécifiques de chaque configuration particulière.

3.4.2. Les géosynthétiques bentonitiques

Un GSB est un produit manufacturé en forme de nappe, constitué d'un assemblage de matériaux comprenant au moins un géotextile et de la bentonite, assurant un rôle d'étanchéité (NF EN ISO 10-318).

L'hydratation du GSB s'opère au cours du temps grâce à l'humidité du sol support. Les GSB utilisés en étanchéité de fond et flancs de casier d'ISDND sont soit des GSB à base de bentonite sodique (naturelle ou activée), soit des GSB à base de bentonite calcique mais dans ce cas, la masse de bentonite par unité de surface doit être supérieure. Des recommandations pour la mise en œuvre de ces matériaux sont proposées dans le fascicule 13 du CFG.

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 elle rentre en contact. Si la bentonite échange son sodium pour des cations divalents (calcium, magnésium, ...), la perméabilité du GSB augmente.

Le Tableau 2 propose des indicateurs, rapides à contrôler, qui permettent de vérifier si un GSB sodique est adapté à une utilisation en étanchéité de fond d'ISDND.

Indicateur	Valeur	Commentaires
Masse surfacique (kg/m ²) NF EN 14196	≥ 5	Masse sèche de bentonite (à 0 % de teneur en eau)
Indice de gonflement libre (IG) XP P 84-703	≥ 24 cm ³ /2g	Corrélié à la proportion de smectite sodique
Capacité d'Echange Cationique (CEC) NF X 31.130	≥ 70 meq/100 g	Corrélié à la proportion de smectite sodique
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 l'on souhaite connaître l'origine de la bentonite

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

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

Concernant les valeurs de perméabilité et d'épaisseur à utiliser dans les calculs d'équivalence, pour les GSB à base de bentonite sodique, les couples suivants peuvent être appliqués par défaut en fonction de la contrainte effective subie par le matériau :

Contrainte verticale (kPa)	Épaisseur (mm) à saturation	Perméabilité (m/s)
10	9	5.10^{-11}
100	8	3.10^{-11}
160	7	1.10^{-11}

Tableau 3 - Épaisseur et perméabilité des GSB en fonction de la contrainte verticale.

Le choix de valeurs moins pénalisantes devra être justifié sur la base d'un rapport d'essai du fabricant du produit envisagé. Les exemples figurant au § 3.2.4 utilisent une valeur de 3.10^{-11} m/s, ceux figurant en annexe utilisent une valeur de 5.10^{-11} m/s.

3.4.3. Recommandations concernant les sols traités

Les sols traités comprennent notamment les traitements de sols *in situ* 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).

Le fascicule de documentation AFNOR FD P11-302 « Réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté » (AFNOR, 2017) présente l'ensemble de la démarche à suivre pour la réalisation d'une barrière compactée, depuis la caractérisation du gisement et des matériaux jusqu'à la méthodologie de mise en œuvre et de contrôles.

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

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.

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.

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 apporte un certain nombre de garanties quant aux caractéristiques et performances du produit. 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 lixiviats d'ISD (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

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.

Pour les mêmes raisons, les solutions équivalentes génériques proposées au chapitre 3.2.4 comprennent des dispositifs basés sur l'augmentation de l'épaisseur de la couche de faible perméabilité, sur le renforcement par des matériaux alternatifs ou une combinaison des deux solutions.

De plus, si on est en présence d'une ressource en eau particulièrement vulnérable, l'épaisseur de la barrière minérale peu perméable devrait logiquement être augmentée. Ainsi les recommandations proposées dans ce guide doivent être considérées et adaptées en fonction du contexte environnemental de chaque site, et notamment de la vulnérabilité de la nappe et de 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 5 de l'Arrêté de 2016).

5. 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 (2017) - Fascicule de documentation AFNOR FD P11-302. Réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté.

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 (2011) - Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets, Fascicule n°13

CFG (1998) - Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques. Comité Français des Géosynthétiques, Fascicule n°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) - Étude 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 1

Outils de calcul d'équivalence et exemples de calculs

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 MISIP (accessible gratuitement sur demande auprès du BRGM), 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 MISIP 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 .

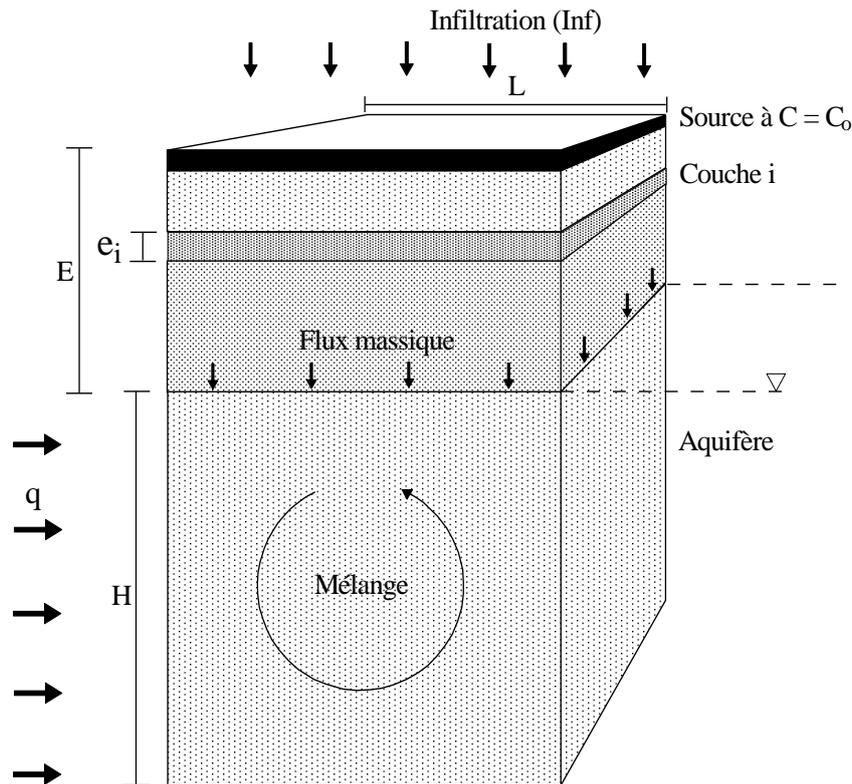


Figure A.1 – Modèle conceptuel pour un système multicouche

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) :

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

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

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).

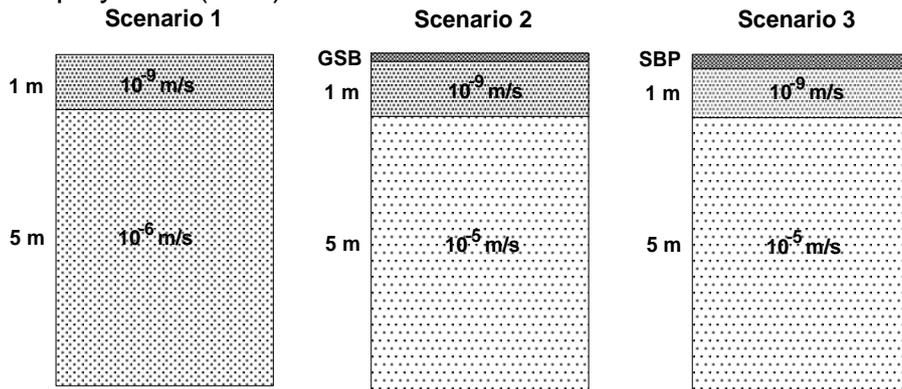


Figure A.2 – Scénarios simulés

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

Tableau A1 – Scénarios et épaisseurs des matériaux

Scénario	1	2	3
GSB	--	1 cm	--
SBP	--	--	7 cm
Argile	1 m	1 m	1 m
Silt	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 :

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

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	$1,0 \times 10^{-9}$	1,09	0,3
Silt	46	3,4	7×10^{-7}	1,37	0,5
Silt sableux	41	6,5	$1,2 \times 10^{-5}$	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 $1,3 \times 10^{-9}$ m/s pour un gradient hydraulique unitaire (écoulement gravitaire). On trouve : $\theta = 29,5\%$.

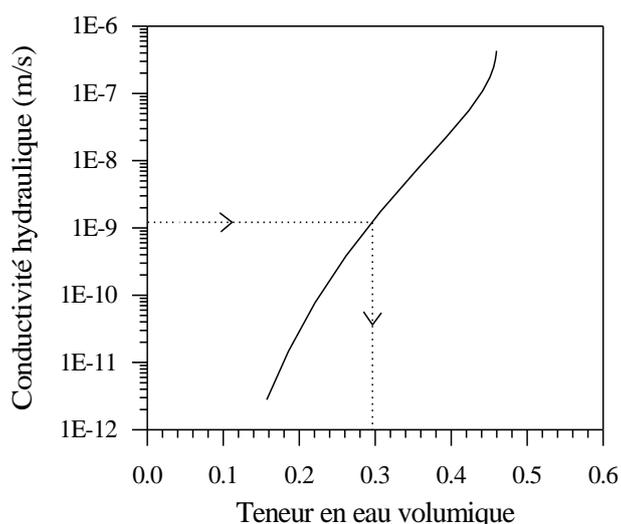


Figure A.3 – Utilisation de la relation Conductivité hydraulique – teneur en eau pour déterminer la teneur en eau résultant d'une infiltration donnée

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)	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$2,6 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$2,6 \times 10^{-10}$
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 et 2 donnent des résultats sensiblement équivalents, que ce soit en termes de temps de transfert qu'en termes de plateaux de concentrations. Le scénario 3 donne 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
Concentration relative	$1,28 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-2}$	$2,64 \times 10^{-3}$

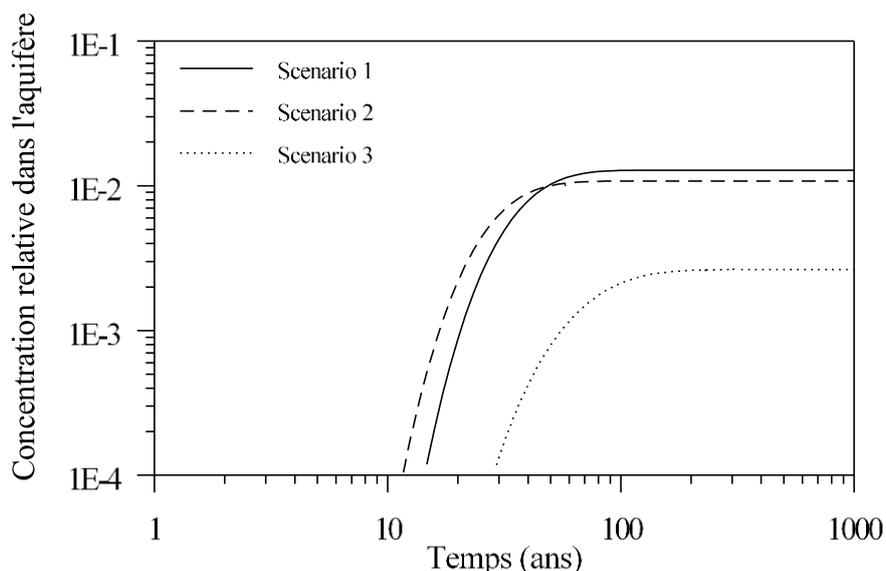


Figure A.4 – Comparaison des scénarios avec teneurs en eau non saturées pour certaines couches

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.

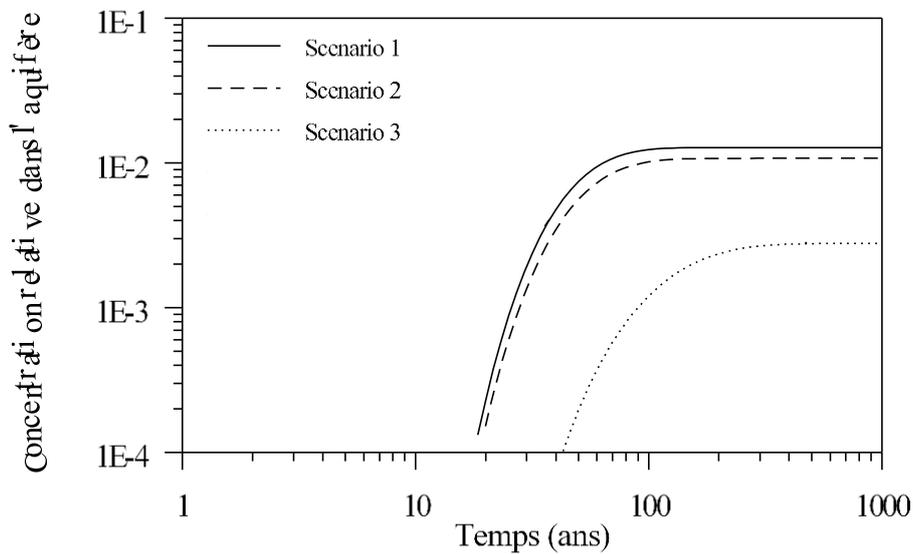


Figure A.5 – Comparaison des scénarios en prenant les teneurs en eau à saturation

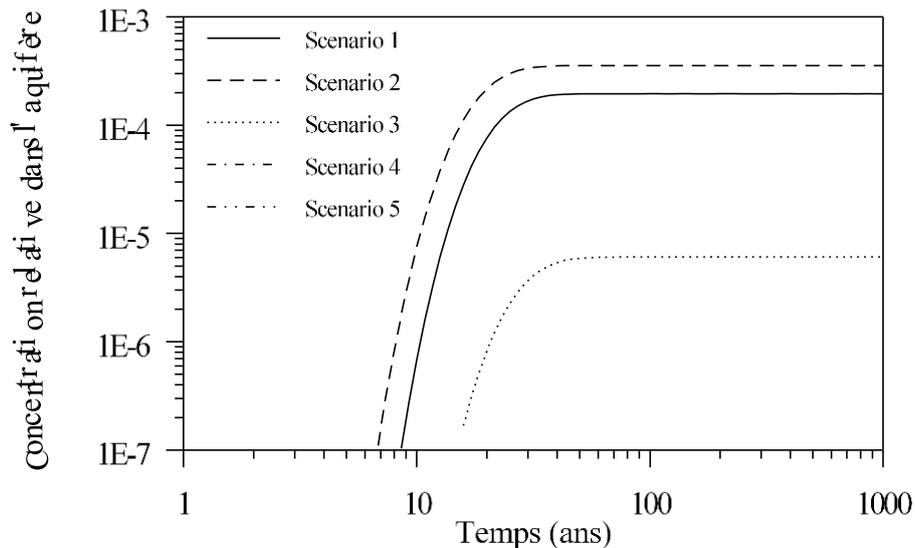


Figure A.6 – Comparaison des scénarios, avec dégradation et avec des teneurs en eau non saturées pour certaines couches

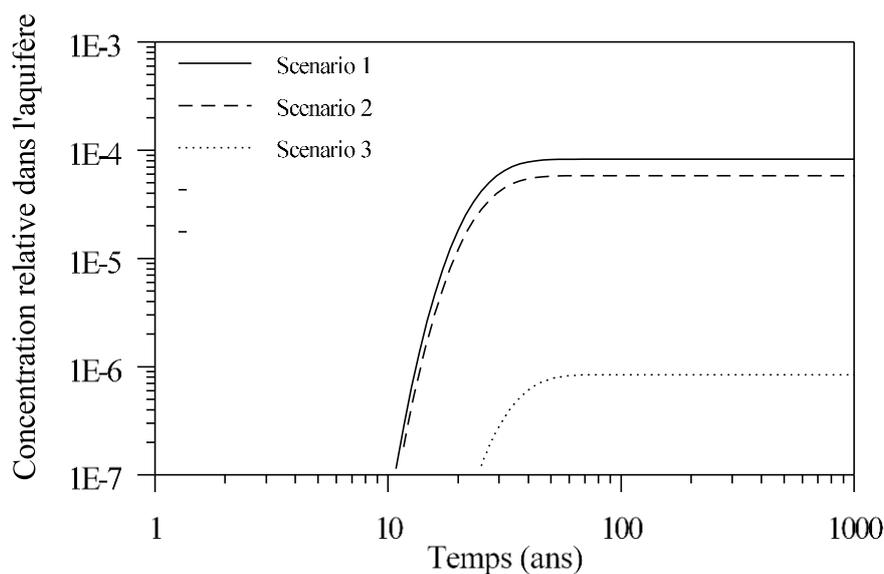


Figure A.7 – Comparaison des scénarios, avec dégradation, en prenant les teneurs en eau à saturation

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 fabricants 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.



Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement, Procédés et Analyses
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr