

**COVED REGION NORD ILE DE FRANCE NORMANDIE
BP 50199
F-59503 DOUAI CEDEX**

ISDND DE NURLU (80)

**ETUDE JUSTIFICATIVE POUR L'EQUIVALENCE EN
ETANCHEITE PASSIVE
NOTE DE CALCUL EN MODE HYDRO-DISPERSIF
(AMENAGEMENT DU CASIER C DE L'INSTALLATION)**

**Rapport *final*
Version 1
Affaire n° : 2740/13 12 3**

Rédaction : Alain COURADIN

Jeudi 25 octobre 2012



Laboratoire de Géotechnique Environnementale

*INSAVALOR Bât. CEI 66, boulevard Niels Bohr 69603 Villeurbanne cedex
Tel : 04 72 43 89 04 Fax : 04 72 43 85 05 E-mail : alain.couradin@insa-lyon.fr*



Note de calcul pour l'équivalence de l'étanchéité passive
COVED NORD ÎLE DE FRANCE NORMANDIE (59) – ISDND DE NURLU (80)

Mots clés : Equivalence, barrière de sécurité passive, flanc périmétrique, GSB

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

COURADIN, A. (2012) « ISDND de Nurlu (80) : Etude justificative pour l'équivalence en étanchéité passive. Note de calcul en mode hydro-dispersif (aménagement du casier C de l'installation) ». Rapport INSAVALOR 2740/13 12 3 pour le compte de COVED NORD ÎLE DE FRANCE NORMANDIE (59)

Ce rapport comporte 26 pages dont 21 de texte, 2 annexes, 6 figures et 3 tableaux

SOMMAIRE

1. Introduction	4
1.1. OBJECTIF DE LA PRESTATION DE L'INSA VALOR.....	4
1.2. DOCUMENTATION.....	5
1.2.1. Documents consultés	5
1.2.2. Références normatives	7
1.3. AVERTISSEMENT	8
2. Note de calcul	9
2.1. PREAMBULE	9
2.2. RAPPEL DES CONTEXTES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES	10
2.3. INVENTAIRE DES CIBLES POTENTIELLES	12
2.4. SCHEMA CONCEPTUEL.....	14
2.5. PROJET DE DISPOSITIF DE LA BARRIERE.....	15
2.5.1. Rappel de l'AM du 19 janvier 2006.....	15
2.5.2. Proposition du pétitionnaire pour les flancs du casier C.....	15
2.6. PRESCRIPTIONS.....	17
2.7. STABILITE MECANIQUE DES FLANCS.....	18
2.8. EVALUATION SEMI-QUANTITATIVE.....	19
3. Conclusion	21
4. Annexes	22
4.1. DEVELOPPEMENT DES SOLUTIONS ANALYTIQUES.....	23
4.2. FICHIER D'ENTREE DES DONNEES ET RESULTATS DES CALCULS	25

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Chronique piézométrique du niveau statique de la nappe de la craie au droit du piézomètre 48 2X 63 à Nurlu (source : Agence de l'eau Artois Picardie, 2012)	11
Figure 2 : Isopièzes de la nappe de la craie (source : BRGM NPC-PIC R 37 511 PIC 4S 93)	12
Figure 3 : Situation des captages AEP (source : BRGM NPC-PIC R 37 511 PIC 4S 93)	13
Figure 4 : Schéma conceptuel générique lié à une installation de stockage (source :Guyonnet, 1998)	14

Figure 5 : Schéma descriptif en coupe des aménagements projetés pour les barrières de sécurité active et passive du casier C (talus sud-ouest, nord-ouest et nord-est)	16
Figure 6 : Schéma descriptif en coupe des aménagements projetés pour les barrières de sécurité active et passive du casier C (digue de séparation)	16

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résultats de la simulation (c^* , r)	19
Tableau 2 : Détail des calculs : à gauche, le scénario réglementaire, à droite, celui proposé en solution alternative en flanc et pied de talus à la cote altimétrique + 116 m NGF	25
Tableau 3 : Détail des calculs : à gauche, le scénario réglementaire, à droite, celui proposé en solution alternative en flanc et pied de talus à la cote altimétrique + 118 m NGF	26

1. Introduction

1.1. Objectif de la prestation de l'INSAVALOR

Dans le cadre de l'aménagement du casier C de l'installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND) de Nurlu (80), il convient de s'assurer que la future barrière de sécurité passive respecte les exigences réglementaires de l'arrêté ministériel du 19 janvier 2006 « (...), *modifiant l'arrêté du 9 septembre 1997 modifié, relatif aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés* ». En conséquence, l'équivalence en étanchéité passive de la future barrière doit être démontrée et fait appel à un dossier technique composé d'une note de calcul. C'est dans ce contexte que la société COVED NORD – ILE DE FRANCE - NORMANDIE (59), sollicite le laboratoire de géotechnique environnementale de l'INSAVALOR (Lyon, 69, filiale de l'INSA de Lyon). Ce dossier se rapporte au cas des flancs du futur casier C de l'installation.

Le but est de garantir une sécurité environnementale de la barrière de sécurité passive du projet au moins équivalente à celle que la réglementation prescrit vis à vis de la maîtrise de ses effluents liquides.

Ce dossier est établi conformément au « *guide de recommandations pour l'évaluation de l'« équivalence » en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets* » du MEEDDAT (voir référence en documentation). Le plan de cette note est établi en fonction de l'ordre chronologique des éléments du rendu figurant dans le guide du MEEDDAT, à savoir :

1. Rappel des contextes géologique et hydrogéologique
2. Inventaire des cibles potentielles
3. Représentation d'un modèle conceptuel
4. Projet de dispositif de barrières
5. Prescriptions de mise en œuvre des géomatériaux
6. Evaluation de la stabilité mécanique des flancs de l'installation
7. Evaluation qualitative
8. Evaluation semi-quantitative en termes d'impact sur la ressource en eau

La mission confiée à l'INSAVALOR a fait l'objet d'une réunion de préparation en date du lundi 10 septembre 2012 à Guyancourt (78), lieu du siège social de la société COVED. Cette réunion avait pour objectif de lister les questions posées par la DREAL de Picardie, UT de la Somme (courrier en date du 12 juillet 2012), à propos de l'aménagement du casier C et notamment celles faisant références à ses flancs périmétriques vis-à-vis de l'article 11 de l'arrêté ministériel du 9 septembre 1997 modifié. En rappel, les questions portent sur i) la perméabilité du terrain naturel composant les flancs du casier C, ii) les dispositions constructives des géomatériaux artificiels et leurs spécifications techniques détaillées notamment leur perméabilité et épaisseur en distinguant leur situation (pied de talus, risberme, digue de séparation) et nature (matériau naturel rapporté, géosynthétique bentonitique).

1.2. Documentation

1.2.1. Documents consultés

Les pièces [P] (par ordre chronologique) analysées ou plus simplement consultées dans le cadre de la rédaction de cette note de calcul sont les suivants.

- [P1] **DREAL PICARDIE** (2012) ISDND de Nurlu – casier C, courrier de l'Inspecteur des Installations Classées en date du 12 juillet 2012. DREAL de Picardie, Unité Territoriale de la Somme – Subdivision 2 de la Somme. Référence : SC/IC/LT n°2012
- [P2] **COVED** (2012) ISDND de Nurlu – casier C, courrier de la société COVED REGION NORD ILE DE FRANCE - NORMANDIE en date du 12 avril 2012. Référence : CB-JMD/DPL NS 12 015
- [P3] **COVED** (2012) ISDND de Nurlu – Barrière de sécurité passive du casier C. Conformité aux prescriptions de l'arrêté ministériel du 9 septembre 1997 modifié – Présentation des dispositions retenues, mars 2012
- [P4] **DREAL PICARDIE** (2012) ISDND de Nurlu – casier C, courrier de l'Inspecteur des Installations Classées en date du 10 février 2012. DREAL de Picardie, Unité Territoriale de la Somme – Subdivision 2 de la Somme. Référence : SC/IC/LT n°2012-0139
- [P5] **COVED** (2008) « Installation de stockage de déchets de Nurlu (80) – Casier C, alvéole 5 : Essais de perméabilité en laboratoire d'un géosynthétique bentonitique ». Rapport réalisé par INSAVALOR (69), affaire 2740/27 8 1, octobre 2008, 6 pages
- [P6] **COVED** (2008) « ISDND de Nurlu (80) – Etude justificative pour l'équivalence en étanchéité passive – Flanc périphérique, note de calcul en mode hydro-dispersif (Barrière de sécurité passive des flancs du casier B, alvéole 5) ». Rapport réalisé par INSAVALOR (69), affaire 2740/28 8 1, juin 2008, 10 pages, 1 annexe
- [P7] **COVED** (2002) « CSD de Nurlu (80) – Examen géotechnique complémentaire. Bilan hydrique ». Dossier réalisé par ANTEA (59), affaire A 26684/A, avril 2002, 16 pages, 8 annexes
- [P8] **COVED** (2002) « 10) Etude d'impact : 4) Géologie – Hydrogéologie ». Dossier réalisé par EEC (69), avril 2002, 22 pages
- [P9] **COVED** (2002) « 12) Etude d'impact : 6) Gestion et protection des eaux ». Dossier réalisé par EEC (69), avril 2002, 41 pages

- [P10] **COVED** (2002) « CSD de Nurlu (80) – Calcul d'équivalence hydraulique : Traitement d'une craie à la bentonite (en vue de la reconstitution d'une barrière de sécurité passive) ». Rapport réalisé par INSA LYON DEVELOPPEMENT (69), affaire 2131/171, mars 2002, 14 pages et 4 annexes
- [P11] **COVED** (2002) « CSD de Nurlu (80) – Essais en laboratoire : Traitement d'une craie à la bentonite – Essais de perméabilité au perméamètre à paroi rigide ». Rapport réalisé par INSA LYON DEVELOPPEMENT (69), affaire 2131/171, janvier 2002, 5 pages et 2 annexes
- [P12] **COVED** (1997) « Site de Nurlu – Commune de Nurlu (Somme). Campagne de géophysique, méthode électromagnétique EM 31 ». Investigation et rapport réalisés par COGEMA Section géophysique, juin 1997, 10 pages, 4 annexes
- [P13] **COVED** (1997) « Piézomètres de surveillance à Nurlu (80) – Compte rendu de forage ». Investigations et rapport réalisés par ESF (94), dossier 96-4937, février 1997, 10 pages
- [P14] **COVED** (1996) « Centre de stockage du Bois de la Ville – Commune de Nurlu (Somme) – Etude géologique et hydrogéologique ». Rapport réalisé par SIMECSOL (92), affaire 38 96 052, dossier NT01 11576 001 01A, juin 1996, 123 pages

Les documents [D] (par ordre chronologique) analysés ou plus simplement consultés dans le cadre de la rédaction de cette note de calcul sont les suivants.

- [D1] **CFG**, (2010), « Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets ». mars 2010, version 2, 66 pages
- [D2] **AFNOR** (2009) Guide de bonnes pratiques pour les reconnaissances géologiques, hydrogéologiques, hydrologiques et géotechniques de sites d'installation de centres de stockage de déchets, novembre 2009, BP X 30-438
- [D3] **MEEDDAT**, (2009) « Guide de recommandations pour l'évaluation de l'équivalence en étanchéité passive d'installation de stockage ». Version 2, février 2009, 50 pages
- [D4] **GUYONNET, D., ET AL**, (2008) « Projet LIXAR 2 – Indicateurs de performance pour les géosynthétiques bentonitiques ». Rapport final. BRGM/RP-56356-FR, mai 2008, 166 pages
- [D5] **NOROTTE, V., POTHIER, C., COURADIN, A., DIDIER G.**, (2006) « Apport de la norme XP P 84-705 pour la réalisation d'essais de performance sur les géosynthétiques bentonitiques ». CFG, Rencontres Géosynthétiques 2006, Montpellier, 12 et 14 juin 2006, pp 231-237

- [D6] **JORF**, (2006) « Arrêté du 19 janvier 2006 modifiant l'arrêté du 9 septembre 1997 modifié relatif aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés ». JO du 16 mars 2006
- [D7] **CAZAUX, D.**, (2005) « Recommandations pour la caractérisation de la perméabilité des barrières d'étanchéité des installations de stockage de déchets ». Rapport final. Rapport BRGM-RP-53721-FR, 57 pages
- [D8] **GUYONNET, D., ET AL**, (2003) « LIXAR – Interactions lixivats-argiles ». Rapport final. BRGM/RP-52449-FR, juillet 2003, 148 pages
- [D9] **ROQUE, A., J., P.-M.**, (2001): « Transfert advectif et diffusif de polluants inorganiques dans les barrières d'étanchéité minérales présentes dans les centres de stockage de déchets ». Thèse de l'INSA de Lyon
- [D10] **GUYONNET, D.**, (1998) « Approche mathématique de l'impact des sites contaminés sur les eaux souterraines dans un contexte d'analyse de risque ». Thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse

1.2.2. Références normatives

Les essais mentionnés font références aux documents normatifs AFNOR en usage dont les intitulés sont rappelés ci-dessous.

- NF P 84-705** Géosynthétiques bentonitiques – Détermination à l'oedoperméamètre des caractéristiques de gonflement, flux et perméabilité des géosynthétiques bentonitiques (GSB) – Essai de caractérisation et essai de performance, AFNOR, novembre 2008
- NF X 30-420** Déchets - Détermination de la perméabilité d'une formation géologique en place, de matériaux rapportés, ou artificiellement reconstitués – Infiltromètres à simple anneau, de type fermé – Essai à charge constante et essai à charge variable, AFNOR, août 2007
- NF X 30-424** Détermination du coefficient de perméabilité d'un terrain par essai d'infiltration à charge constante en forage. AFNOR, décembre 2005
- NF EN 14196** Géosynthétiques – Méthodes d'essai pour la détermination de la masse surfacique des barrières géosynthétiques argileuses, AFNOR, juillet 2004
- NF P 84-703** Géosynthétiques bentonitiques – Détermination de la capacité de gonflement de l'argile dans les géosynthétiques bentonitiques, AFNOR, août 2002



- NF P 94-048** Sols : Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en carbonate – Méthode du calcimètre, AFNOR, octobre 1996
- NF P 11-300** Exécution des terrassements – Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, AFNOR, septembre 1992

1.3. Avertissement

La présente note a été établie sur la base des informations fournies à l'INSAVALOR par le pétitionnaire, des données scientifiques et techniques disponibles ou objectives et de la réglementation en vigueur. La responsabilité de l'INSAVALOR ne pourra pas être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes, obsolètes ou erronées.

2. Note de calcul

2.1. Préambule

Par rapport à la dernière étude (INSAVALOR, 2008), le contexte géologique et hydrogéologique du site dans son environnement peuvent être de nouveau appréciés à l'aide de documents (EEC, 2002, COGEMA, 1997, ESF, 1997, SIMECSOL, 1996) qui ne nous avaient pas été transmis précédemment. En l'occurrence, la lecture de ces documents nous permet d'améliorer la connaissance locale et régionale du milieu hydrogéologique environnant l'installation puisque ces documents dressent un état descriptif complet en termes de perméabilités des formations géologiques enveloppant l'installation, livrent les cibles potentielles situées dans son pourtour et renseignent au moins en partie le régime hydrogéologique de la nappe de la craie au droit du projet.

Dans le même temps, les contextes réglementaire et scientifique ont également évolué. Dans le cas du contexte réglementaire, l'article 11 figurant au chapitre II du titre II du précédent arrêté ministériel en date du 9 septembre 1997 a été remplacé par de nouvelles dispositions (JORF, 2006). Entre autres, les flancs périmétriques des casiers de stockage des installations sont nommément désignés et font appel depuis à des exigences réglementaires en termes de dispositions constructives en l'état, sinon, basées sur le principe de la barrière de sécurité passive équivalente. Dans le cas du contexte scientifique, l'effort s'est porté vis-à-vis de la meilleure compréhension du comportement des géomatériaux alternatifs susceptibles de présenter un intérêt particulier dans le contexte de la reconstitution artificielle des barrières de sécurité passive. Parmi ces géomatériaux alternatifs figure la famille des géosynthétiques bentonitiques (GSB). Cette famille de géosynthétiques manufacturés a fait l'objet depuis plusieurs années, tant au niveau national qu'international, d'un développement technologique accompagné par la conduite de nombreux programmes de recherche dont la publication des travaux révèle les avantages, les inconvénients suivant les conditions spécifiques de chaque configuration particulière (GUYONNET ET AL., 2008, 2003). Pour ce qui concerne leur application en installation de stockage de déchets, des recommandations viennent accompagner leur utilisation (CFG, 2010) et des critères de performances sous forme de caractéristiques leur sont attribués de façon à garantir leur fonction et pérennité. En termes de performances hydrauliques et concernant la valeur de perméabilité à utiliser dans les calculs d'équivalence (MEEDDAT, 2009), une valeur unique est retenue (avec une valeur égale à au moins 5.10^{-11} m/s) pour l'ensemble de la famille des géosynthétiques bentonitiques à base de bentonite sodique. Bien qu'ayant l'avantage de simplifier considérablement le paramétrage des solutions analytiques, cette hypothèse, ne permet pas de distinguer la configuration des géosynthétiques bentonitiques dans leur différent état de service. Par exemple, le texte normatif NF P 84-705 (AFNOR, 2008) distingue dans la réalisation d'un essai de caractérisation des GSB, deux (2) contraintes normales de confinement et de saturation. Ces contraintes sont directes et uniques et sont égales à 10 kPa sinon 160 kPa. En effet, dans le contexte des

installations de stockage des déchets il s'avère pertinent de déterminer les caractéristiques hydrauliques des GSB en fonction de leur position en barrière hydraulique sommitale, flanc ou fond de la barrière de sécurité passive (NOROTTE ET AL., 2006).

2.2. Rappel des contextes géologiques et hydrogéologiques

Les contextes géologique et hydrogéologique du site sont connus grâce aux travaux de reconnaissance du sous-sol conduits à la fois sur site et en laboratoire. Le site est implanté au droit des formations géologiques crayeuses appartenant à l'auréole du Crétacé supérieur du bassin de Paris. La craie est recouverte en partie sommitale par des formations plus récentes, il s'agit de sables argileux et d'argile de l'Eocène sinon de formations superficielles hétérogènes attribuables à la dynamique périglaciaire du Quaternaire. Les perméabilités associées à la formation crayeuse de surface ont été déterminées en forage par des essais Lefranc (ESF, 1997) et par des essais de type Nasberg (ANTEA, 2002). Les valeurs correspondantes sont comprises entre 8.10^{-5} m/s et 3.10^{-6} m/s pour les essais Lefranc et entre 2.10^{-5} m/s et 4.10^{-5} m/s pour les essais de type Nasberg. La première série d'essais a été réalisée à une profondeur comprise entre 5 et 10 mètres alors que la seconde série a été réalisée entre 10 et 20 mètres de profondeur. Ces profondeurs recoupent les cotes altimétriques comprises entre + 132,5 m et + 121 m NGF pour la première série et + 117 m NGF et + 110 m NGF pour la seconde série. L'ensemble de ces valeurs de perméabilité est à attribuer au faciès crayeux de surface dont le profil d'altération possède une répartition variable en termes de profondeur et d'intensité. Ainsi, le toit de la craie massive est rencontré en profondeur, à partir d'une vingtaine de mètres.

D'un point de vue structural, il n'est pas mentionné d'accidents majeurs, en revanche, un pli synclinal est signalé dont l'axe de direction sud-ouest nord-est passe par le site [EEC, 2002]. D'un point de vue géotechnique, les formations géologiques présentes au droit du projet ont fait l'objet d'une reconnaissance géotechnique en laboratoire. Cette reconnaissance porte 1) l'identification des géomatériaux pour conduire à leur classement (SIMECSOL, 1996), 2) sur la connaissance du potentiel d'étanchéité des géomatériaux susceptibles d'être utilisés en vue de reconstituer le niveau de faible perméabilité de la barrière de sécurité passive (INSAVALOR, 2002), 3) sur les propriétés mécaniques des matériaux (ANTEA, 2002, EEC, 2002, SIMECSOL, 1996) dont l'objectif est le dimensionnement des pentes des déblais et remblais constitués lors des travaux d'aménagement.

Le contexte hydrogéologique peut être résumé par l'existence au droit du projet et à l'échelle régionale d'un aquifère représenté par le substratum géologique crayeux. Cet aquifère contient la nappe de la craie dont le régime hydraulique dans l'environnement proche du site est connu grâce à l'enregistrement de la chronique d'un piézomètre référencé par l'Agence de l'eau Artois Picardie (EEC, 2002). Il s'agit du piézomètre appartenant au réseau de surveillance de la nappe de la craie et situé sur la commune de Nurlu. Le suivi de son niveau statique est réalisé depuis le 18 novembre 1964. Au droit de l'installation, il existe six (6) piézomètres dont au moins quatre (4) sont profonds de 80 mètres. Ces six (6) piézomètres ont été réalisés successivement au cours des différentes campagnes de reconnaissance du site, avec un (1) piézomètre (SC1 au nord du site) réalisé en 2001 (ANTEA, 2002), trois (3) piézomètres (Pz3,

Pz4 et Pz5) réalisés en 1997 (ESF, 1997) et enfin deux (2) piézomètres (Pz1, Pz2) contemporains de l'ancienne « décharge » (SIMECSOL, 1996). Bien que l'utilisation de ces ouvrages soit faite dans le cadre de la surveillance de la qualité géochimique de la nappe, il ne semble pas que le suivi de leur niveau statique soit réalisé. Toutefois, les données concernant le régime hydraulique de la nappe de la craie existent et leur synthèse permet de dresser un bilan simplifié de son régime (figure 1).

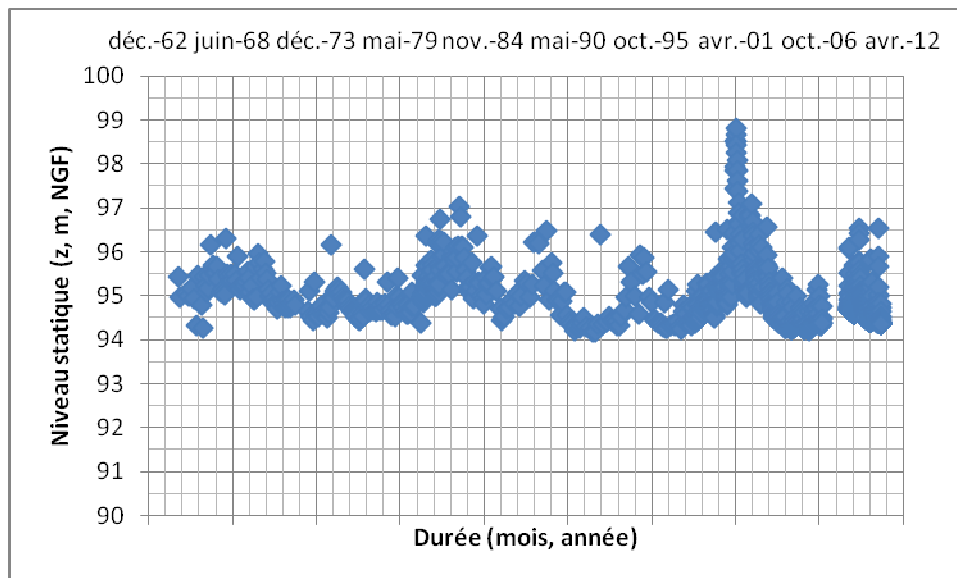


Figure 1 : Chronique piézométrique du niveau statique de la nappe de la craie au droit du piézomètre 48 2X 63 à Nurlu (source : Agence de l'eau Artois Picardie, 2012)

Globalement, le niveau statique de la nappe de la craie au droit du piézomètre 48 2X 63 à Nurlu possède une fluctuation de son niveau au cours du temps. Cette variation du niveau permet de déterminer un niveau des plus hautes eaux et de plus basses eaux respectivement égal à + 98,8 m NGF et + 94,2 m NGF. Ces niveaux remarquables ont été enregistrés pour le premier, le 3 mai 2001 et pour le second le 27 février 1992 et le 13 février 2006. Le niveau des plus hautes eaux au droit du site peut être estimé en extrapolant le niveau statique mesuré au droit du piézomètre Pz1 (amont du site) le 16 mai 2001. Ce niveau statique est égal à + 71,9 m NGF (ANTEA, 2002). Ce même jour, le niveau statique déterminé au droit du piézomètre de référence 48 2X 63 situé à Nurlu est égal à + 98,3 m NGF. L'écart entre ce niveau et celui déterminé en période de plus hautes eaux est égal à 0,5 mètre. En reportant cet écart au niveau mesuré au droit de Pz1, le niveau des plus hautes eaux au droit du site peut être estimé égal à + 72,4 m NGF. A l'échelle du site, le sens d'écoulement de la nappe de la craie possède une direction du nord-est vers le sud-ouest avec un gradient hydraulique approximativement égal à 1 % (figure 2). A l'échelle locale, l'installation de stockage de Nurlu est située hydrauliquement à proximité et à l'aval d'un dôme piézométrique dont le centre se répartit géographiquement au droit de la commune de Nurlu (EEC, 2002). L'existence de ce dôme piézométrique a pour conséquence de limiter l'impluvium en rapport avec l'installation et

d'infléchir les isopièzes jusqu'à créer une ligne de partage des eaux au droit de laquelle le flux devient nul. Cette ligne de partage des eaux souterraines passe par le site (figure 3).



Figure 2 : Isopièzes de la nappe de la craie (source : BGRM NPC-PIC R 37 511 PIC 4S 93)

2.3. Inventaire des cibles potentielles

L'aquifère de la craie est une ressource en eau potable destinée à la consommation humaine (figure 3). Cette ressource est exploitée à proximité de l'installation, toutefois aucun périmètre

de protection des ces ouvrages ne vient se juxtaposer à son voisinage. L'ouvrage AEP (alimentation en eau potable) le plus proche géographiquement de l'installation est celui situé au nord ouest de la commune de Moisilains (référence 00481X0002, P9), la distance qui le sépare de l'installation de stockage est égale à 3,3 km. Le suivant est celui situé au nord de la commune de Bussu (référence 00481X0002, P9) et la distance qui le sépare de l'installation est égale à 5 km.

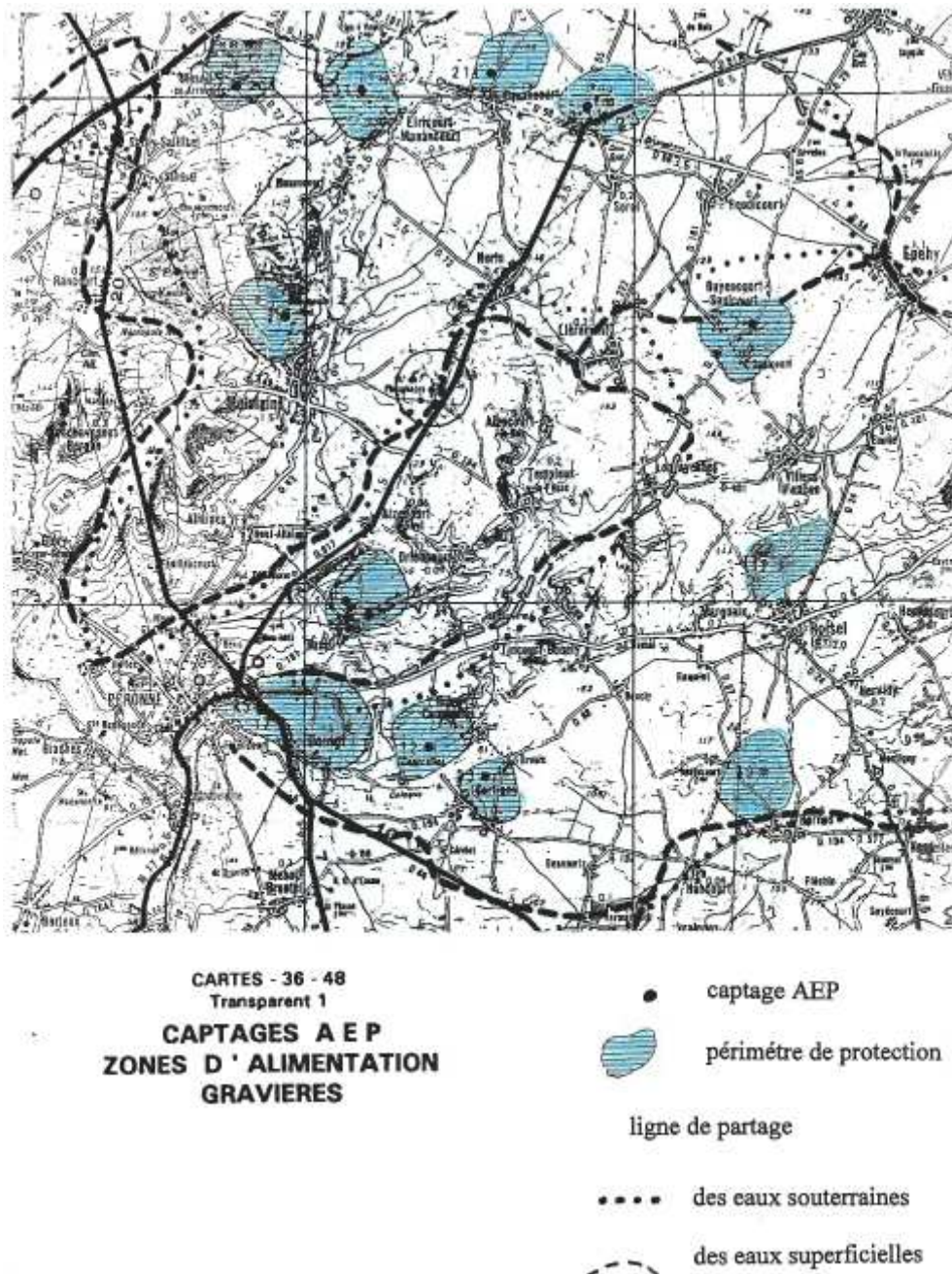


Figure 3 : Situation des captages AEP (source : BRGM NPC-PIC R 37 511 PIC 4S 93)

A partir des isopièzes représentés en figure 2, il est possible de déduire la position hydrogéologique de ces deux ouvrages par rapport à l'installation. Ils sont situés en aval de l'installation, le premier au nord-nord-ouest, le second au sud-sud-ouest. L'utilisation de la nappe de la craie à des fins industrielle, agricole voire domestique est connue et bien que soit mentionnée cette utilisation (EEC, 2002), la localisation géographique de ces ouvrages n'a pas été reportée graphiquement. En revanche, hormis les anciens puits de l'usine de phosphate et les piézomètres de surveillance liés au fonctionnement de l'installation, il n'existe pas dans un rayon de 500 mètres de l'installation d'autres ouvrages ayant accès à la nappe tels que puits, forage ou source.

2.4. Schéma conceptuel

Le schéma conceptuel générique lié à une installation de stockage de déchets (figure 4) peut se résumer par la présence d'un terme source (ayant une concentration unitaire), d'un terme transfert correspondant à un milieu géologique (en place ou reconstitué) représenté par le dispositif de matériaux de faible perméabilité et semi-perméable, puis d'un milieu récepteur correspondant à un aquifère jouant alors un rôle d'atténuation naturelle par un effet de dilution. Ainsi, la présence simultanée de ces trois termes (source, transfert, récepteur) conduit à l'évaluation quantitative (ou semi-quantitative) de l'impact potentiel sur la qualité géochimique de l'aquifère à travers le calcul d'une concentration maximale relative pour un temps quasi-infini.

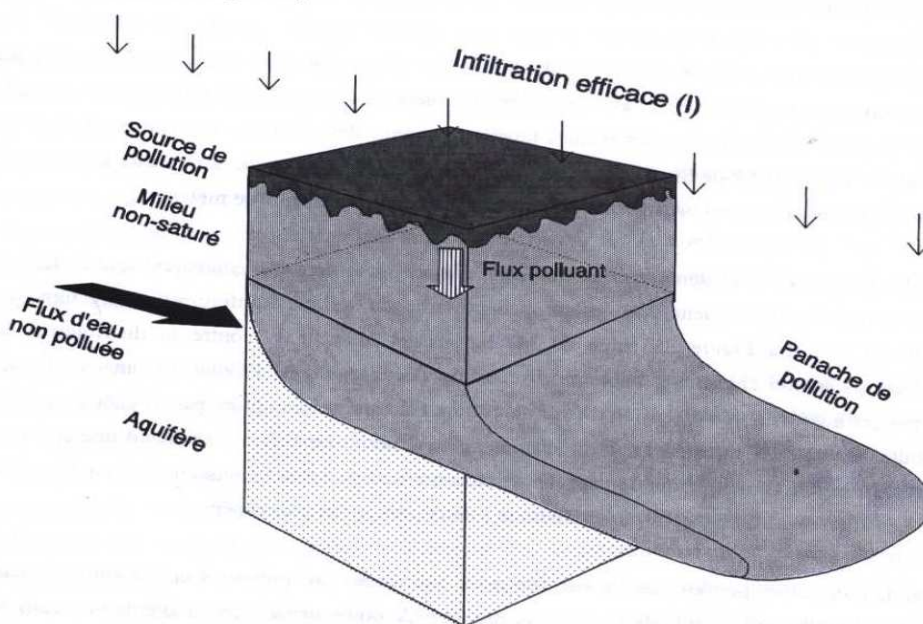


Figure 4 : Schéma conceptuel générique lié à une installation de stockage (source :Guyonnet, 1998)

Les géomatériaux naturels en place constituant les flancs de l'installation de Nurlu (casier C) sont représentés par les formations géologiques évoquées ci-dessus, alors que le terme cible sera représenté par la nappe de la craie.

2.5. Projet de dispositif de la barrière

2.5.1. Rappel de l'AM du 19 janvier 2006

Le dispositif réglementaire (noté dans cette étude am) est celui de l'arrêté ministériel du 9 septembre 1997 modifié au 31 décembre 2001, au 3 avril 2002 puis au 19 janvier 2006 (JORF 2006). Celui-ci mentionne dans son article 11 deux (2) seuils de perméabilité pour chacun des deux (2) niveaux de la barrière de sécurité passive, avec *« 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 à 1.10^{-9} m/s sur au moins 1 mètre ».*

L'article poursuit en précisant les prescriptions à respecter en cas de reconstitution de la barrière, avec : *« 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. ».* Au-delà, de cette hauteur de deux (2) mètres, aucune prescription réglementaire n'est précisée en termes de perméabilité et d'épaisseur des géomatériaux constituant la barrière de manière artificielle (le niveau semi-perméable n'est également pas mentionné). De même, le texte ne précise pas si la reconstitution en fond de casier intéresse un dispositif monocouche ou multicouche. En revanche, le texte précise que *« En tout état de cause, l'étude montrant que le niveau de protection sur la totalité du fond et des flancs de la barrière est équivalent aux exigences fixées au premier alinéa figure dans le dossier de demande d'autorisation. ».*

2.5.2. Proposition du pétitionnaire pour les flancs du casier C

Du point de vue du critère réglementaire, le site ne possède pas sur les flancs de son installation le niveau imperméable. En conséquence, la reconstitution de la barrière de sécurité passive est envisagée. Les flancs périphériques du casier C peuvent se décliner en deux configurations (de bas en haut). La première (en bas de talus) fait référence à l'apport d'un géomatériau de façon à créer une forme en cuvette « étanche » en pied de talus conformément aux prescriptions de la réglementation. A ce niveau minéral est associée une nappe de géosynthétique bentonitique (GSB). La seconde configuration (au-delà de cette cuvette étanche) fait appel à une nappe de géosynthétique bentonitique pour prolonger la performance hydraulique de la barrière jusqu'en tête de talus (ancrage du DEG).

Un schéma descriptif de principe de ces aménagements est représenté ci-dessous (figures 5 et 6). Ces schémas représentent en coupe les dispositions constructives projetées au droit des trois (3) talus périmétriques du casier C (sud-ouest, nord-ouest, nord-est) et de la digue de séparation située entre les casiers B et C.

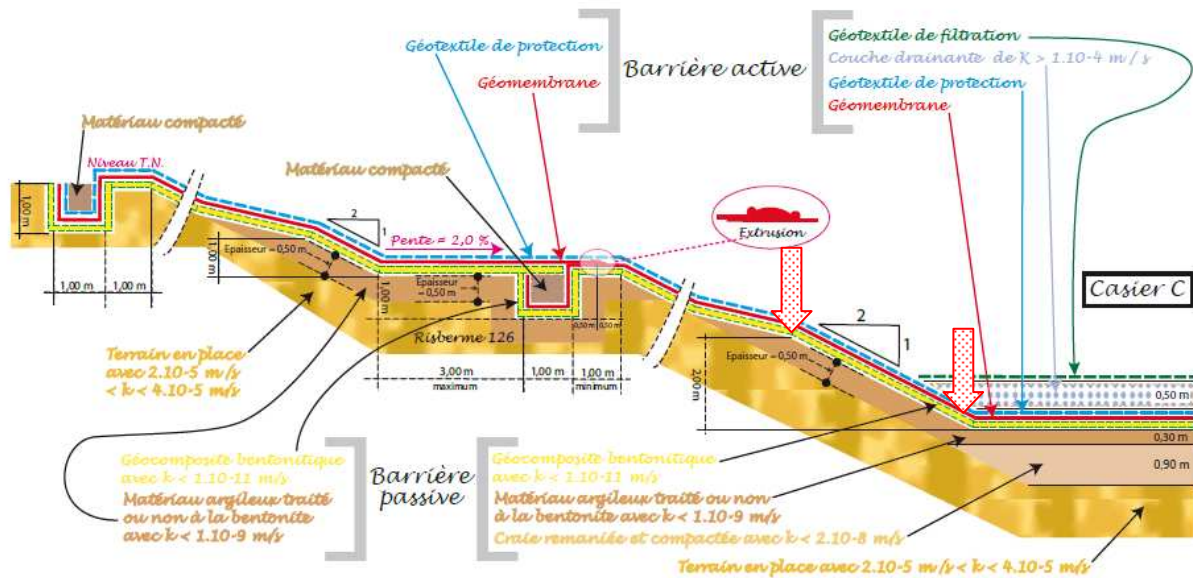


Figure 5 : Schéma descriptif en coupe des aménagements projetés pour les barrières de sécurité active et passive du casier C (talus sud-ouest, nord-ouest et nord-est)

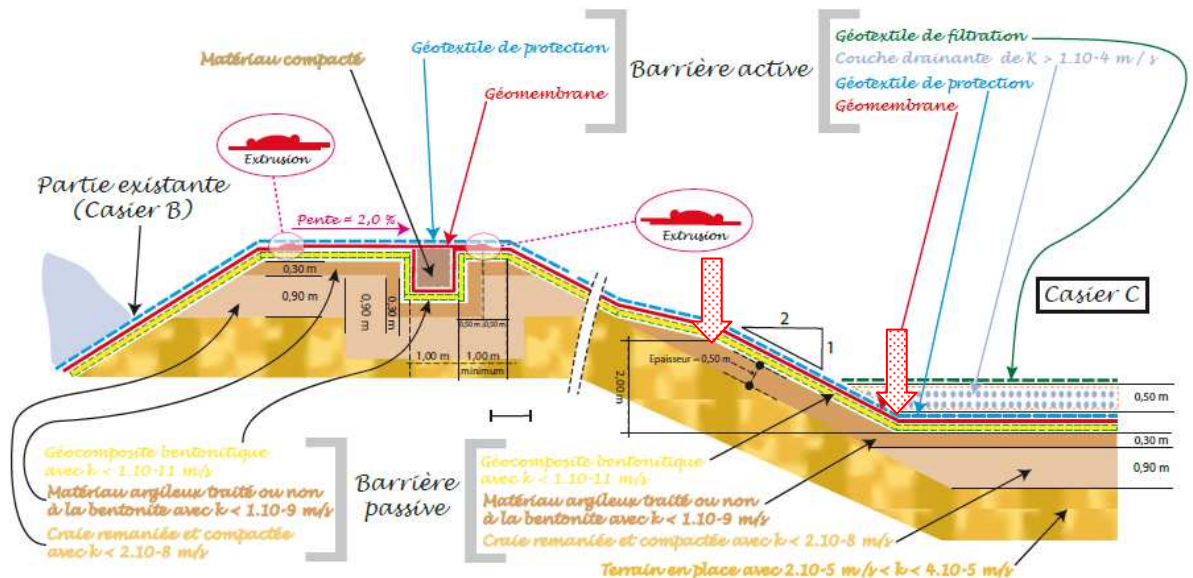


Figure 6 : Schéma descriptif en coupe des aménagements projetés pour les barrières de sécurité active et passive du casier C (digue de séparation)

La pente des flancs est de 2(H) pour 1(V). La cote altimétrique situé en fond de casier est égale à + 116 m NGF, si bien que celle à attribuer à la partie sommitale du pied de talus est égale à + 118 m NGF.

Au niveau du pied de talus des flancs périmétriques, l'épaisseur du géomatériau constituant le niveau de faible perméabilité est au moins égale à 0,5 mètre sur une hauteur égale à deux (2) mètres par rapport à la cote altimétrique du fond de casier. La perméabilité de ce géomatériau est au moins égale à 1.10^{-9} m/s. Dans le cas du géosynthétique bentonitique et dans un souci de simplification, il est préférable d'attribuer une valeur unique et homogène de la perméabilité et de l'épaisseur quelle que soit la configuration, avec respectivement 5.10^{-11} m/s et 10 mm. Ces valeurs sont celles qui sont rencontrées habituellement pour la famille des géosynthétiques bentonitiques retenue dans le cadre de travaux d'aménagement en installation de stockage de déchets non dangereux (GUYONNET ET AL., 2008, 2003, NOROTTE ET AL., 2006). Chaque flanc périmétrique présente une risberme intermédiaire. Dans le cas des trois (3) flancs périmétriques venant s'adosser au substratum naturel, le niveau de faible perméabilité de la risberme est constituée par un ensemble multicouche composé de haut en bas par une nappe de géosynthétique bentonitique associée à un géomatériau fin dont la perméabilité et l'épaisseur sont respectivement inférieure à 1.10^{-9} m/s et au moins égale à 0,5 mètre. Dans le cas du flanc périmétrique situé en continuité avec la partie existante de l'exploitation (digue de séparation des casiers B et C), la risberme est constituée par un ensemble multicouche composé de haut en bas par une nappe de géosynthétique bentonitique associée à un géomatériau fin dont la perméabilité et l'épaisseur sont respectivement inférieure à 1.10^{-9} m/s et au moins égale à 0,3 mètre puis par de la craie remaniée dont la perméabilité et l'épaisseur sont respectivement inférieure à 2.10^{-8} m/s et au moins égale à 0,9 mètre. Cette dernière disposition constructive en risberme est identique à celle projetée en fond de casier C.

Deux dispositions constructives sont retenues par le calcul dans le cas des flancs périmétriques. Ces dispositions sont les plus pénalisantes (sa+116 et sa +118 en référence aux cotes altimétriques basse et haute du pied de talus). Leur situation est symbolisée par des flèches verticales de couleur rouge dont le remplissage est en pointillé (figures 5 et 6).

Ainsi, les données qui amènent au dimensionnement de la barrière de sécurité passive du projet d'aménagement du casier C sont les éléments suivants (MEEDDAT, 2009) :

1. Cotes altimétriques NGF projetées au droit du casier C
2. Cote altimétrique NGF du niveau statique des plus hautes eaux au droit de l'installation
3. Perméabilité et épaisseur des géomatériaux constituant la barrière artificielle
4. Perméabilité et épaisseur des géomatériaux naturels non saturés constituant l'enveloppe du casier C

2.6. Prescriptions

Le matériau candidat à la reconstitution du niveau imperméable de la barrière de sécurité passive en pied de talus est un sol fin traité ou non en bentonite. Ce matériau nécessitera une étude géotechnique en laboratoire. Cette étude en laboratoire aura comme objectif d'identifier

géotechniquement le matériau candidat et de définir les caractéristiques de compactage du matériau et sa formulation s'il y a lieu d'en améliorer le potentiel d'étanchéité par apport d'adjuvant (AFNOR, 2009). Cette étude géotechnique devra faire l'objet d'une expertise par un laboratoire de géotechnique environnementale indépendant (MEEDDAT 2009). La mise en œuvre du matériau nécessitera au préalable la réalisation d'une planche d'essais avant sa généralisation à l'échelle du casier C. Cette planche permettra de définir pour les engins disponibles la méthodologie de mise en œuvre du matériau et sera instrumentée par des essais de perméabilité afin de contrôler ses caractéristiques hydrauliques (AFNOR, 2009, CAZAUX, 2005).

Dans le cas du géosynthétique bentonitique nous retiendrons les caractéristiques minimales suivantes : une bentonite sodique encapsulée par aiguilletage entre deux nappes de géotextiles dont la masse surfacique en bentonite (à teneur en eau sèche) est égale à au moins 5 kg/m^2 (NF EN 14 196) et dont la proportion en carbonate de calcium reste inférieure à 5 % (NF P 94-048). Ces différentes grandeurs seront validées en laboratoire par des essais de caractérisation, avec en plus, l'indice de gonflement libre de la bentonite contenue dans la nappe et enfin la détermination de la perméabilité sous contrainte uni-axiale (respectivement NF XP P 84-703, NF P 84-705). Sa mise en œuvre devra également faire l'objet d'un suivi par un organisme tiers (notamment lors des opérations de réception du fond de forme en fond et flancs de casier et lors de son application en flancs périmétriques).

En tout état de cause, l'entreprise d'application se rapprochera des prescriptions de mise en œuvre du fournisseur et fera référence à l'état de l'art en la matière (CFG, 2010, MEEDDAT, 2009). La largeur des recouvrements des lés de la nappe de GSB sera déterminée en fonction de la longueur des rampants en talus (CFG, 2010), avec :

1. < 5 m de rampant, $L = 0,3 \text{ m}$
2. Entre 5 et 20 m, $L = 0,4 \text{ m}$
3. Entre 20 et 40 m, $L = 0,6 \text{ m}$

Enfin, il est recommandé de procéder au suivi du niveau statique de la nappe de la craie au droit de l'installation. Ce suivi s'effectuera de manière à constater ses fluctuations annuelles et inter-annuelles en ayant recours aux ouvrages présents au droit de l'installation. Les périodes de mesure du niveau statique dans le courant de l'année peuvent correspondre aux mois de janvier/février, avril/mai, et octobre/novembre (fréquence non exhaustive). Ces mesures pourront être projetées sur un fond cartographique de manière à reporter les isopièzes correspondant à la période des plus hautes eaux et des plus basses eaux. Ainsi, une direction d'écoulement de la nappe de la craie à l'échelle du site pourra être déduite selon ces deux périodes de référence.

2.7. Stabilité mécanique des flancs

Dans le cas des flancs des installations de stockage de déchets, un calcul d'équivalence est toujours possible mais sa réalité physique sera toujours délicate à concevoir et sa validité difficile à démontrer. Aussi, il est préférable de réserver le calcul à la vérification de leur

stabilité au glissement car la composante mécanique y est essentielle (sans cette condition, le DEDG ne fonctionne plus).

La stabilité mécanique des flancs périmétriques de l'installation a été évaluée à l'aide d'une étude géotechnique (ANTEA, 2002, SIMECSOL, 1996). Ces calculs définissent des ordres de grandeur au regard des pentes à adapter en fonction de la nature des affleurements géologiques qui restent à découvrir. D'autre part, nous savons que le pétitionnaire souhaite reconstituer un dispositif conforme aux prescriptions réglementaires en pied de talus. Au-delà et jusqu'à la tranchée d'ancrage du DEDG, la mise en œuvre d'une nappe de géosynthétique bentonitique sodique devrait théoriquement garantir aux flancs périmétriques de l'installation une solution au moins équivalente.

2.8. Evaluation semi-quantitative

La solution d'équivalence est justifiée par une méthodologie (évaluation semi-quantitative et qualitative du risque en scénario semi-générique) et par des calculs (développement et résolution de solutions analytiques). Ces calculs permettent de comparer les performances de plusieurs systèmes de barrières de conceptions différentes en termes d'impact potentiel sur la qualité géochimique de la nappe d'eau souterraine. Autrement dit, « *deux barrières d'étanchéité passive seront considérées comme étant équivalentes, lorsqu'elles assurent un même niveau de protection en terme d'impact potentiel du site de stockage sur une ressource en eau souterraine* » (MEEDDAT, 2009).

Dans le cas de l'installation de Nurlu (80), la ressource en eau souterraine est représentée par la nappe de la craie.

Le développement de la solution analytique conduisant au calcul de la concentration de la concentration relative maximale (c^*) dans le cas d'un cas d'un multicouche est présenté en annexe à ce document. Les calculs conduisent à un rapport de performance (se reporter à la feuille de calcul en annexe) au moins équivalent ($R > 1$). Le tableau ci-dessous traduit ce rapport de performance en faveur de la solution alternative.

Tableau 1 : Résultats de la simulation (c^* , r)

	am	Sa+116	Sa+118
c^*	$1,3.10^{-2}$	$1,06.10^{-2}$	$1,14.10^{-2}$
R	-	1,2	1,1

Légende :

am, sa : Scénarios réglementaire et alternatif

c^* : Concentration relative maximale pour un temps infini

R : Rapport d'équivalence entre les scénarios (am/sa)

Note : Les concentrations calculées sont données à titre de comparaison des scénarios et non pas dans un but prédictif.

Afin de conduire le calcul avec un souci de réalisme, nous nous sommes référés aux valeurs fournies par les études et travaux de reconnaissance du site. La charge hydraulique utilisée dans le cadre de cette simulation est conforme à la prescription réglementaire (JORF, 2006). La valeur du coefficient de diffusion des chlorures est une valeur courante que l'on trouve dans la littérature (GUYONNET, 1998, ROQUE, 2001), il en est de même pour la porosité, la tortuosité et pour la relation de la dispersion longitudinale (le dixième du chemin parcouru dans la direction parallèle à l'écoulement). Les paramètres de perméabilité et d'épaisseur du géosynthétique bentonitique sont connus (MEEDDAT, 2009). La valeur de la perméabilité du géosynthétique bentonitique (3.10^{-11} m/s) est une valeur réaliste qui peut-être retenue compte tenu du retour d'expérience accordé à cette famille de géosynthétiques. Toutefois il faut garder à l'esprit que des valeurs de perméabilité issues d'essais en laboratoire démontrent de meilleures performances puisqu'il est couramment déterminé des perméabilités inférieures à 10^{-11} m/s pour des contraintes uni-axiales habituellement rencontrées au droit d'installations de stockage de déchets.

3. Conclusion

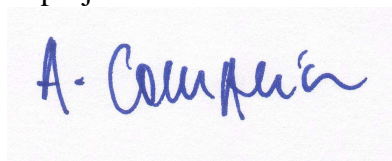
La solution d'équivalence proposée est démontrée par une méthodologie (évaluation qualitative du risque en scénario semi-générique) et des calculs en mode hydro-dispersif (développement et résolution de solutions analytiques). Cette méthodologie permet de comparer les performances de plusieurs systèmes de barrières de conceptions différentes, et ce avec des hypothèses de calcul maximaliste (majorant le risque potentiel).

Les calculs permettent de démontrer que le scénario proposé par le pétitionnaire est au moins équivalent à celui préconisé par l'arrêté ministériel.

Les arguments en faveur de la reconstitution de la barrière sont les suivants :

1. Un contexte géologique et hydrogéologique connu et favorable
2. L'absence de points de ressources en eau potable à proximité du site
3. Une reconstitution du niveau de faible perméabilité associant un dispositif multicouche (un géomatériau naturel couplé à un produit manufacturé de type géosynthétique bentonitique sodique)
4. L'adaptation des géotextiles bentonitiques sodiques aiguilletés pour ce type d'ouvrage
5. Des travaux d'aménagement intégrant un système de contrôle qualité
6. La démonstration par le calcul que le scénario alternatif est au moins équivalent au scénario réglementaire

Cette note est assortie de recommandations (prescriptions de mise en œuvre et spécifications techniques détaillées des géomatériaux) afin de garantir un fonctionnement optimal et durable de la barrière passive projetée.

A handwritten signature in blue ink, reading 'A. Couradin', is shown within a rectangular box.

Alain Couradin
Chef de projet INSAVALOR
Responsable de l'activité géotechnique environnementale
Rédacteur de la note



Note de calcul pour l'équivalence de l'étanchéité passive
COVED NORD ÎLE DE FRANCE NORMANDIE (59) – ISDND DE NURLU (80)

4. Annexes

4.1. Développement des solutions analytiques

La migration verticale à partir du terme source à travers la barrière de sécurité passive est gouvernée à partir de l'équation de transport :

$$i \frac{\partial c(z,t)}{\partial z} - \theta D \frac{\partial^2 c(z,t)}{\partial z^2} = -R\theta \frac{\partial c(z,t)}{\partial t} - R\theta \lambda c(z,t) \quad (1)$$

Où :

$c(z,t)$ = concentration à la profondeur z dans la couche et au temps t (M/L^3)

i = infiltration verticale (Darcy) ($L^3/L^2.T^{-1}$)

θ = teneur en eau volumique

D = coefficient de diffusion-dispersion (L^2/T)

R = facteur retard à travers la barrière géologique

λ = constante de décroissance de premier ordre (T^{-1}).

Note : Comme il a été rappelé en hypothèse, le facteur retard (R) et la constante de décroissance de premier ordre (λ) ne sont pas pris en compte par la simulation.

Le coefficient de diffusion-dispersion (D) est :

$$D = \alpha \frac{i}{\theta} + D_0 \psi \quad (2)$$

Où :

α = dispersivité longitudinale (L)

D_0 = coefficient de diffusion dans l'eau pure (L^2/T)

ψ = tortuosité

L'équation de transport dans l'aquifère est :

$$R_a \phi \frac{\partial C}{\partial t} = -q \frac{\partial C}{\partial x} - \phi D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \phi D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \phi D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - R_a \phi \lambda_a C + M \quad (3)$$

Où :

C = concentration dans l'aquifère au point x,y,z et au temps t (M/L^3)

ϕ = porosité de l'aquifère

D_x, D_y, D_z = coefficient de dispersion-diffusion dans les directions x,y,z (L^2/T)

R_a = facteur de retard dans l'aquifère

λ_a = constante de dégradation de premier ordre dans l'aquifère (T^{-1})

M = flux massique à la surface de la nappe (sur l'aire $L \cdot B$) (M/T)

La concentration relative maximale (c^*) pour un temps quasi-infini après dilution dans l'aquifère en régime permanent est obtenue à partir de l'équation 4 (GUYONNET, 1998) :

$$c^* = \frac{c_0}{1 + \frac{q_u H}{iL} \left[1 - \exp\left(-\int_0^e \frac{i e}{\theta D} \right) \right]} \quad (4)$$

Où :

- c_0 = concentration source unitaire
- q_u = flux de DARCY dans l'aquifère en aval de la zone source (L^3/L^2T^{-1})
- E = épaisseur de l'aquifère (L)
- i = infiltration verticale (L^3/L^2T^{-1})
- e = épaisseur de la barrière (L)
- L = plus grande longueur de la zone source dans la direction d'écoulement des eaux souterraines (L)
- θ = teneur en eau volumique

4.2. Fichier d'entrée des données et résultats des calculs

Calcul de la concentration maximale relative											
				Charge hydraulique	h=	0,3	m				
				Plus grande longueur du site dans le sens d'écoulement	L=	100	m				
				Perméabilité de l'aquifère	kaqu=	5E-05	m/s				
				Pente de l'aquifère	p=	1,0%					
				Epaisseur de l'aquifère	H=	20,0	m				
				Flux de Darcy dans l'aquifère	q=	5E-07	m/s				
				Coefficient de diffusion	Do=	2E-09	m2/s				
				Rapport des concentrations Cam/Csa=		1,2					
am						sa+116					
Niveau faible perméabilité						GSB					
e1 =	1,1	m				e1 =	0,008	m			
k1 =	1,0E-09	m/s				k1 =	3E-11	m/s			
						Niveau faible perméabilité = Barrière argileuse ouvragée					
e2 =	42,5	m				e2 =	0,3	m			
k2 =	4,0E-05	m/s				k2 =	1E-09	m/s			
						Niveau faible perméabilité = Barrière crayeuse ouvragée					
						e3 =	0,3	m			
						k3 =	2E-08	m/s			
						Formations géologiques crayeuses					
						e4 =	43,0	m			
						k4 =	8E-05	m/s			
Infiltration	1,3E-09	m/s				Infiltration	1,1E-09	m/s			
Cam	1,3E-02					Csa	1,06E-02				
Epaisseur couche e =	Dispersivité H= ei/10	Porosité H'	Tortuosité H	D(z)= Hi /H+D0H	l(e/HD)	Epaisseur couche e =	Dispersivité H= ei/10	Porosité H'	Tortuosité H	D(z)= Hi /H+D0H	l(e/HD)
1,1	0,1	0,3	0,3	1,1E-09	4,38	0,01	0,0008	0,7	0,3	6,0E-10	0,02
42,5	4,3	0,3	0,3	2,2E-08	9,73	0,3	0,03	0,3	0,3	7,1E-10	1,52
						0,3	0,03	0,3	0,3	7,1E-10	1,52
						43,0	4,3	0,3	0,3	1,6E-08	9,62
43,6	m				14,1	43,6	m				12,7

Tableau 2 : Détail des calculs : à gauche, le scénario réglementaire, à droite, celui proposé en solution alternative en flanc et pied de talus à la cote altimétrique + 116 m NGF

Calcul de la concentration maximale relative											
				Charge hydraulique	h=	0,3	m				
				Plus grande longueur du site dans le sens d'écoulement	L=	100	m				
				Perméabilité de l'aquifère	kaqu=	5E-05	m/s				
				Pente de l'aquifère	p=	1,0%					
				Epaisseur de l'aquifère	H=	20,0	m				
				Flux de Darcy dans l'aquifère	q=	5E-07	m/s				
				Coefficient de diffusion	Do=	2E-09	m ² /s				
				Rapport des concentrations Cam/Csa=		1,1					
am						sa+118					
Niveau faible perméabilité e1 = 1,1 m k1 = 1,0E-09 m/s e2 = 44,5 m k2 = 4,0E-05 m/s Infiltration 1,3E-09 m/s Cam 1,3E-02						GSB					
						e1 = 0,008 m k1 = 3E-11 m/s					
						Niveau faible perméabilité = Barrière argileuse ouvragée					
						e2 = 0,0 m k2 = 1E-09 m/s					
						Niveau faible perméabilité = Barrière crayeuse ouvragée					
						e3 = 0,0 m k3 = 2E-08 m/s					
						Formations géologiques crayeuses					
						e4 = 45,6 m k4 = 8E-05 m/s					
						Infiltration 1,2E-09 m/s					
						Csa 1,14E-02					
Epaisseur couche e =	Dispersivité H= ei/10	Porosité H'	Tortuosité H	D(z)= Hi /H#D0H	l(e/HD)	Epaisseur couche e =	Dispersivité H= ei/10	Porosité H'	Tortuosité H	D(z)= Hi /H#D0H	l(e/HD)
1,1	0,1	0,3	0,3	1,1E-09	4,38	0,01	0,0008	0,7	0,3	6,0E-10	0,02
44,5	4,5	0,3	0,3	2,3E-08	9,74	0,0	0	0,3	0,3	6,0E-10	-
						0,0	0	0,3	0,3	6,0E-10	-
						45,6	4,559	0,3	0,3	1,8E-08	9,67
45,6	m				14,1	45,6	m				9,7

Tableau 3 : Détail des calculs : à gauche, le scénario réglementaire, à droite, celui proposé en solution alternative en flanc et pied de talus à la cote altimétrique + 118 m NGF