



ARCHAMBAULT CONSEIL

**GURDEBEKE S.A.**

**65, boulevard Carnot**

**60400 NOYON**

**Note d'évaluation de l'équivalence en étanchéité  
passive sur les flancs et sur le fond du projet de  
Centre de Stockage de Déchets  
Non Fermentescibles peu évolutifs  
d'Hardivillers (Oise)**

**CMC02674-R2-v3  
Novembre 2013**

ETUDES ET EXPERTISES : EAU & ENVIRONNEMENT

SIEGE & AGENCE SUD EST : ZA du Charpenay - 16 rue de l'Aqueduc - 69210 LENTILLY - Tél : 04 78 48 83 83 - Fax : 04 72 38 03 56  
AGENCE NORD EST IDF : 3 av. du Général Gallieni - 92000 Nanterre - Tél : 01 55 90 16 68 - Fax : 04 72 38 03 56  
AGENCE CENTRE OUEST : 175 rue Morandière - 37260 Monts - Tél : 02 47 26 98 31 - Fax : 04 72 38 03 56  
ARCHAMBAULT CONSEIL - SAS Capital 500 000 € - SIRET 32875112800054 - APE 7112B

[www.archambault-conseil.fr](http://www.archambault-conseil.fr)

# SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>4</b>
1.1	PRESENTATION DE L'ETUDE.....	4
1.2	CONTENU DE LA NOTE D'EQUIVALENCE.....	4
1.3	RAPPELS REGLEMENTAIRES .....	5
1.3.1	Réglementation française et européenne .....	5
1.3.2	Distinctions entre barrières active et passive.....	6
1.3.3	L'équivalence.....	6
1.4	GUIDE DE BONNES PRATIQUES .....	7
1.5	DOCUMENTS CONSULTES.....	8
<b>2</b>	<b>NOTE D'EQUIVALENCE .....</b>	<b>9</b>
2.1	RAPPEL SUR LE CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU SITE.....	9
2.1.1	Contexte géologique et structural .....	9
2.1.2	Contexte hydrogéologique.....	11
2.1.3	Perméabilités de la barrière passive naturelle en place .....	13
2.1.3.1	Perméabilité en fond de site (craie en place).....	14
2.1.4	Perméabilité de la barrière passive reconstituée ou rapportée .....	16
2.1.4.1	Couche de 1m à $10^{-7}$ m/s en fond.....	16
2.1.4.2	Couche de 1 m à $10^{-7}$ m/s en flanc .....	17
2.1.4.3	Couche de 1 m à $10^{-9}$ m/s en fond.....	17
2.1.5	Conformité et représentativité des essais de perméabilité.....	18
2.1.6	Cible .....	19
2.1.7	Justification de l'équivalence.....	19
2.1.7.1	Constat.....	19
2.1.7.2	Exigences à remplir pour la structure de la barrière passive.....	20
2.1.8	Schéma de principe de conception.....	21
2.2	PROJET DE RECONSTITUTION DE LA BARRIERE PASSIVE .....	21
2.2.1	Zone la plus pénalisante.....	21
2.2.2	En fond.....	22
2.2.2.1	Structure.....	22
2.2.2.2	Evaluation quantitative (calcul d'équivalence) .....	22
2.2.3	En flanc.....	24
2.2.3.1	Structure.....	24
2.2.3.2	Evaluation qualitative .....	24
2.2.3.3	Evaluation semi-qualitative .....	26



2.2.4	Prescriptions de mise en œuvre et de contrôle des matériaux .....	27
2.2.4.1	GSB .....	28
2.2.4.2	Couche à $10^{-9}$ m/s .....	29
3	AVIS SUR LA CONFORMITE DE LA BARRIERE EQUIVALENET PROPOSEE .....	31

## Liste des figures

<i>Figure 1 : recommandations pour la structure du fond de forme.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 2 : contexte géologique et structural.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3 : coupe géologique locale passant par le projet.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4 : carte de synthèse du contexte hydrogéologique.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 5 : coupe schématique des plus hautes eaux de la nappe .....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 6 : localisation des essais de perméabilités in situ.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 7 : schéma de conception.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 8 : résultats de la simulation pour le fond avec MISP-VI.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 9 : résultats de la simulation en flancs avec MISP-VI .....</i>	<i>27</i>

## Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : essais de perméabilité in-situ sur la craie en place .....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 2 : essai de perméabilité sur la craie en flanc.....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 3 : essais de perméabilité sur la couche de craie compactée à <math>1.10^{-7}</math> m/s en fond</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 4 : essais de perméabilité sur la couche de craie compactée à <math>10^{-7}</math> m/s en flanc .</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 5 : essais de perméabilité sur les argiles rapportées à <math>10^{-9}</math> m/s.....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 6 : scenarii en fond de site .....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 7 : scenarii en flancs de site.....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 8 : synthèse des éléments de conformité de la barrière passive .....</i>	<i>31</i>



# 1 INTRODUCTION

## 1.1 PRESENTATION DE L'ETUDE

L'étude présentée ci-après entre dans le cadre de la création des casiers 1 à 5 du projet de Centre de Stockage de Déchets Non Fermentescibles peu évolutifs (CSDNF) d'Hardivillers (Oise) par la société GURDEBEKE S.A.

L'objectif de cette étude est de réaliser la note d'équivalence en étanchéité passive du fond et des flancs du centre de stockage.

L'équivalence se justifie par l'absence partielle de l'horizon semi-perméable (5 m à  $k < 10^{-6}$  m/s).

Cette étude a été réalisée conformément au « Guide de recommandations pour l'évaluation de l'équivalence en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets », version 2 de février 2009.

## 1.2 CONTENU DE LA NOTE D'EQUIVALENCE

Le guide précise que « *Les principaux éléments nécessaires à la rédaction de la note justificative (...) comprennent notamment les contextes géologiques et hydrogéologiques, ainsi que la vulnérabilité des cibles potentielles. Les conditions de mise en œuvre et les caractéristiques des matériaux rapportés (Géosynthétique Bentonitique GSB, ou autre), doivent être décrits et argumentés. Ces éléments doivent permettre d'apprécier le niveau de protection offert par le dispositif équivalent* ».

Le guide précise ensuite que dans certains cas, il faut réaliser : « *une évaluation quantitative ou semi-quantitative de l'impact sur les eaux souterraines au droit du site, pour la configuration de barrière proposée, comparé à celui obtenu pour la barrière réglementaire* ». A noter qu'une évaluation quantitative (calcul) 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 ».

L'essentiel de cette note s'appuie sur les éléments concrets extraits de l'étude des volets géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques pour la qualification technique du projet de Centre de Stockage de Déchets Ultimes Minéraux d'Hardivillers (Oise), et de l'étude de stabilité des flancs de la société RINCENT BTP.

## **1.3 RAPPELS REGLEMENTAIRES**

### **1.3.1 Réglementation française et européenne**

L'article 11 de l'arrêté du 9 septembre 1997, modifié le 19 janvier 2009, relatif aux centres de stockage de déchets non dangereux, précise que :

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

*« Lorsque la barrière géologique ne répond pas naturellement aux conditions précitées, elle peut être complétée artificiellement et renforcée par d'autres moyens présentant une protection équivalente. L'épaisseur de la barrière ainsi reconstituée ne doit pas être inférieure [...] à 0,5 m pour les flancs jusqu'à une hauteur de deux mètres par rapport au fond. En tout état de cause, l'étude montrant que le niveau de protection sur la totalité du fond et des flancs de la barrière reconstituée est équivalent aux exigences fixées au premier alinéa, figure dans le dossier de demande d'autorisation. »*

Les dispositions de la Directive du Conseil n° 1999/31/CE du 26 avril 1999, fixent le même dispositif de reconstitution :

*« 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 non dangereux :  $k < 1,0 \cdot 10^{-9}$  m/s ; épaisseur  $> 1$  m. »*

### 1.3.2 Distinctions entre barrières active et passive

En France le stockage des déchets s'appuie sur le principe de barrières multiples offrant deux niveaux de sécurité complémentaires et superposées.

La barrière supérieure est dite « active » car il s'agit d'un dispositif d'étanchéité et de drainage des lixiviats collectés en fond de casiers sur une géomembrane en Polyéthylène haute Densité (PeHD) et par un massif drainant.

La barrière inférieure est dite « passive » car il s'agit du milieu géologique naturel constitué par des matériaux peu perméables en place ou rapportés.

Comme la barrière active n'a pas à vocation de fonctionner *ad vitam aeternam*, la barrière passive est là pour suppléer celle active à un moment où la majorité de la charge polluante aura été traitée.

### 1.3.3 L'équivalence

La note d'équivalence ne prend en compte que les éléments constitutifs de la barrière passive. Elle ne concerne pas la barrière active.

La cible étant l'aquifère et l'eau souterraine qu'il contient, l'objectif de l'évaluation de l'équivalence est le suivant :

*« 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 réglementation (soit 1 m à  $10^{-9}$  m/s) ? »*

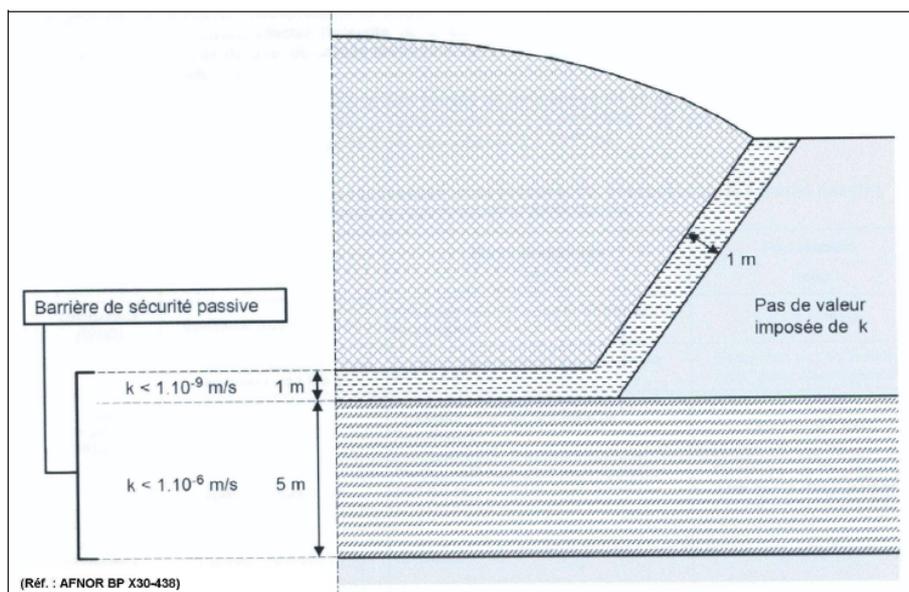
L'équivalence est ainsi définie dans le guide de référence :

*« 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 ».*

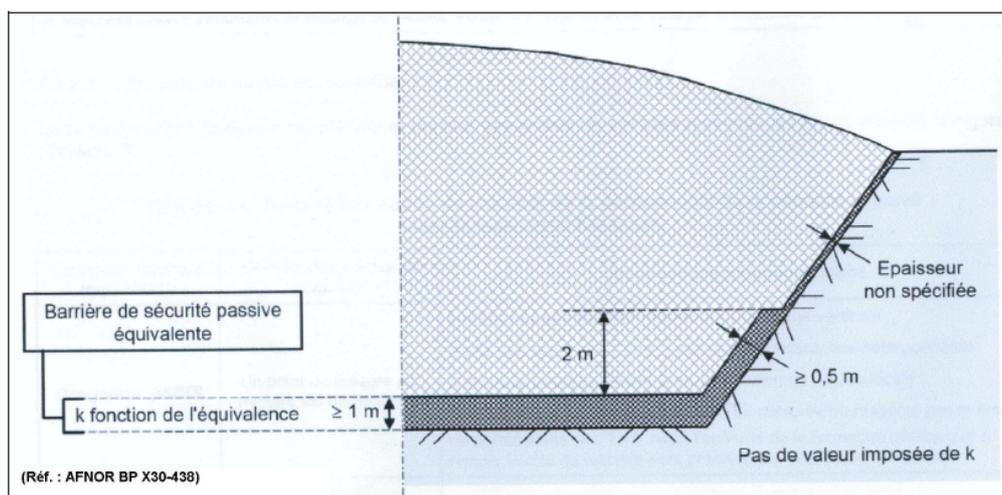
## 1.4 GUIDE DE BONNES PRATIQUES

Le « Guide de bonnes pratiques pour les reconnaissances géologiques, hydrogéologiques et géotechniques de sites d'installations de stockage de déchets » de l'AFNOR (BP X30-438) précise les solutions alternatives équivalentes dont le principe est illustré selon le schéma de la Figure 1 (extraite du guide de l'AFNOR) :

Figure 1 : recommandations pour la structure du fond de forme



Principe de la barrière passive selon la réglementation française (A)



Principe de la barrière passive équivalente selon la réglementation française (B)

Ainsi, en flanc, une barrière équivalente est composée, a minima, et de bas en haut :

- d'un matériau d'une épaisseur de 0,5 m à  $k < 1,0 \cdot 10^{-9}$  m/s sur les 2 m de base ;
- puis, au-dessus de cette base, d'un GSB ou d'un SBP (par exemple).

## 1.5 DOCUMENTS CONSULTÉS

[P1]	ARCHAMBAULT Conseil : Etudes géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques pour la qualification technique du projet de CSDNF d'Hardivillers (Oise), CMC02674-R1-v3, novembre 2013
[P2]	RINCENT BTP : étude géotechnique G2 selon NFP94-500 Création des casiers 1 à 5 – CSDUM de Hardivillers (60), rapport N°13.3.1510/1, Ind.A, du 22/11/2013
[P3]	Etude de stabilité des talus et de perméabilité. Extension des alvéoles 17 à 26. CDSU de Lihons (80). Rapport 11-3-1285/1. Rincenc BTP, 3 p. + 7 annexes, Septembre 2012.
[P4]	GAUFOR : CSDMU Hardivillers – Gurdebeke S.A. – Travaux de Barrière de Sécurité Passive (BSP) - Casier N°1 Alvéole N°1 – Affaire 11.416 – Compte rendu de planche d'essais du 31/08/2011 - Argile compactée $1\text{m } 10^{-9} \text{ m/s}$ , 31/08/2011
[P5]	GAUFOR : CSDMU Hardivillers – Gurdebeke S.A. – Travaux de Barrière de Sécurité Passive (BSP) - Casier N°1 Alvéole N°3 – Affaire 11.416 – Contrôle de perméabilité - Craie compactée $1\text{m } 10^{-7} \text{ m/s}$ , 30/09/2011
[P6]	GAUFOR : CSDMU Hardivillers – Gurdebeke S.A. – Travaux de Barrière de Sécurité Passive (BSP) - Casier N°1 Alvéole N°3 – Affaire 11.416 – Contrôle de perméabilité - Argile compactée $1\text{m } 10^{-9} \text{ m/s}$ , 17/10/2011
[P7]	ANTEA : Tierce expertise du calcul d'ancrage des géosynthétiques du CSDMU d'Hardivillers, PICP120093/N12/417, 02/07/2012
[P8]	RINCENT BTP : CSDMU Hardivillers, Etanchéité de la barrière passive de fond d'alvéole 1, PV N°11.2.1416/1 Ind 0, Contrôle extérieur de perméabilités, 18/07/2011

[D1]	Guide de recommandations pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets. MEEDAT, Version 2, 50 p, février 2009
[D2]	Recommandations sur la caractérisation de la perméabilité des barrières d'étanchéité des installations de stockage de déchets. BRGM : RP-53721-FR, 59 p, Juin 2005
[D3]	Intercomparaison des méthodes de mesure des faibles perméabilités. Synthèse. Guide technique ADEME, 69 p. + 6 annexes, 1999.
[D4]	Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par Géosynthétiques Bentonitiques, CFG, Fascicule n° 12, 56 p, 1998.
[D5]	Cahier technique sur les centres de stockage de déchets ménagers et assimilés. ADEME, 105 p, 1998.



## **2 NOTE D'EQUIVALENCE**

### **2.1 RAPPEL SUR LE CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU SITE**

*Le cadre géologique et hydrogéologique a été défini dans l'étude de faisabilité.*

#### **2.1.1 Contexte géologique et structural**

Le projet se situe dans la région naturelle du Beauvaisis du département de l'Oise. Cette région est caractérisée par la présence d'un substratum crayeux secondaire recouvert partiellement par des formations tertiaires éocènes argilo-sableuses et par des limons quaternaires.

Les formations géologiques sont affectées d'ondulations en structures synclinales et anticlinales d'axe NW-SE en rapport avec l'accident du pays de Bray à 10 km plus au sud.

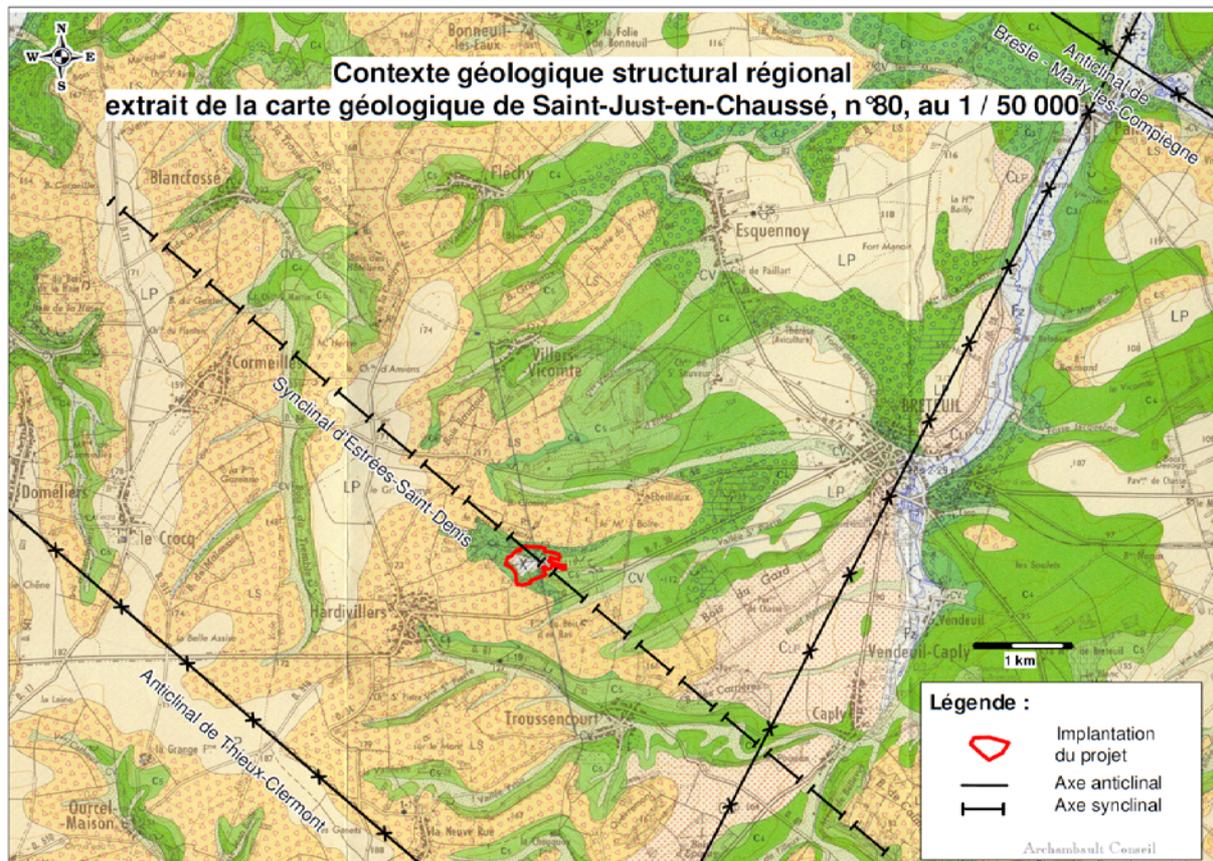
Le projet se trouve au niveau d'un axe synclinal entre les deux axes anticlinaux de Domeliers-Thieux au Sud-est et de Paillart-Ferrières au Nord-ouest figurant sur la carte géologique de Saint-Just-en-Chaussé (Figure 2).

Le synclinal est souligné par la présence de la craie du Campanien inférieur, localement phosphatée aux alentours d'Hardivillers. Cette craie phosphatée (en structures lenticulaires) a d'ailleurs été exploitée jadis sur site.

Le plateau crayeux est entaillé par de nombreuses vallées sèches et humides. Le projet occupe une de ces vallées sèches : la vallée Saint-Pierre qui rejoint la vallée de la Noye à l'Est, au niveau du bourg de Breteuil.

L'affleurement du Turonien dans la vallée de la Noye au niveau de Breteuil révèle également une flexure d'axe Nord-est/Sud-ouest qui recoupe les axes structuraux majeurs précédemment décrits.

Figure 2 : contexte géologique et structural



D'après les études réalisées dans le cadre du dossier (analyse structurale, photo-interprétation linéamentaire et recueil des données bibliographiques du BRGM), aucune structure cassante de type faille n'est mise en évidence à hauteur du site.

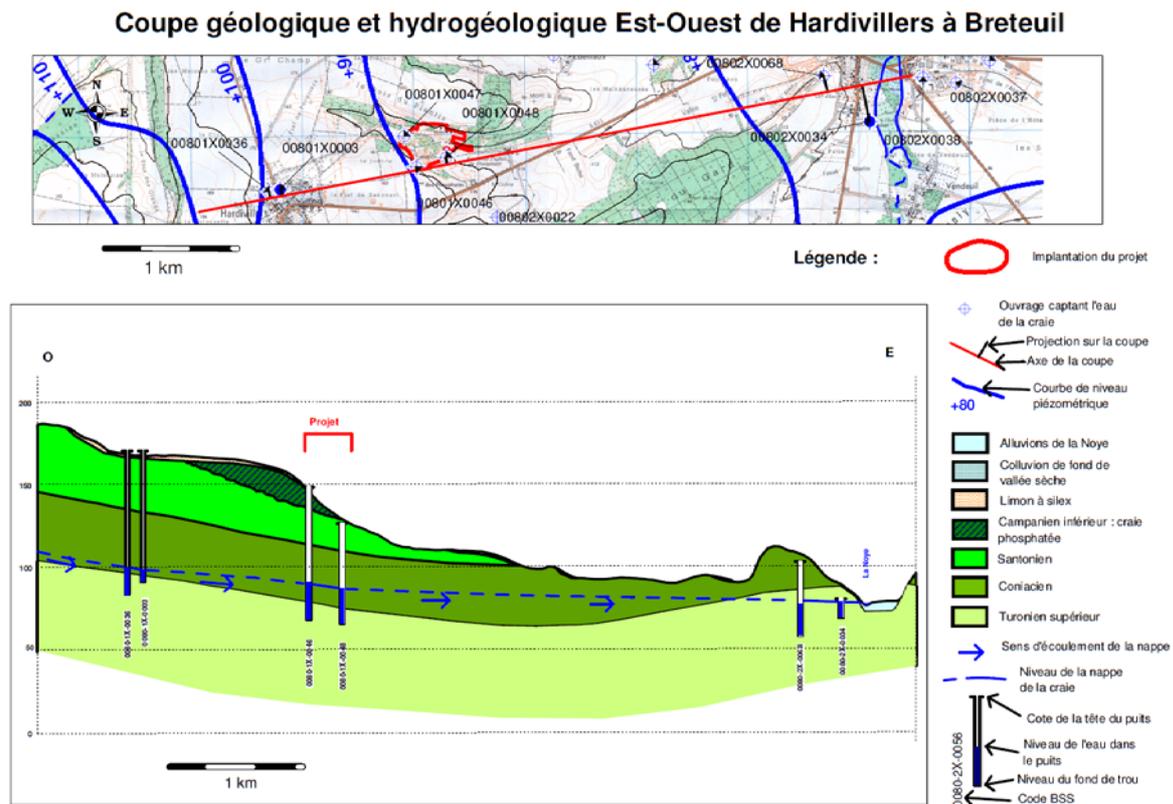
Le contexte local est illustré par la coupe géologique en Figure 3.

Au droit du projet, la géologie est très simple puisque l'on retrouve exclusivement des horizons crayeux. Elle a été définie avec précision à l'aide de 3 sondages carottés, 8 sondages destructifs et 4 sondages pressiométriques.

Ainsi, de haut en bas, on retrouve :

- des remblais crayeux, vestige de l'exploitation passée ;
- la craie blanche à silex en place du Campanien, déstructurée au sommet ;
- la craie blanche du Santonien (c5), 30m, homogène ;
- la craie du Coniacien (c4), 45m ;
- les Dièves bleues du turonien, mur du réservoir crayeux.

Figure 3 : coupe géologique locale passant par le projet



Au carreau d'exploitation de la carrière, le toit de la craie est fortement diaclaté, et fracturé (fractures verticales orientées N330° ; certaines de ces diaclases sont visibles sur les flancs de la carrière. Cette déstructuration du substratum s'observe essentiellement sur le haut de l'ancienne carrière. Le passage à la craie blanche est souligné par un niveau assez continu de poches de dissolution parfois remplies de sable ocre.

Le projet prévoit de reprendre en outre le sommet de la formation crayeuse en fond de carrière, qui a été déstructurée, afin d'obtenir une couche homogénéisée de 1 m à perméabilité inférieure à  $k=10^{-7}$  m/s.

## 2.1.2 Contexte hydrogéologique

L'étude hydrogéologique a permis de définir les éléments suivants :

- l'absence de venues d'eau latérales en flanc de site ;
- le premier niveau d'eau sous le site est contenu dans le réservoir de la craie qui contient une nappe à usage sensible (exploitée par l'AEP dans le secteur) ;

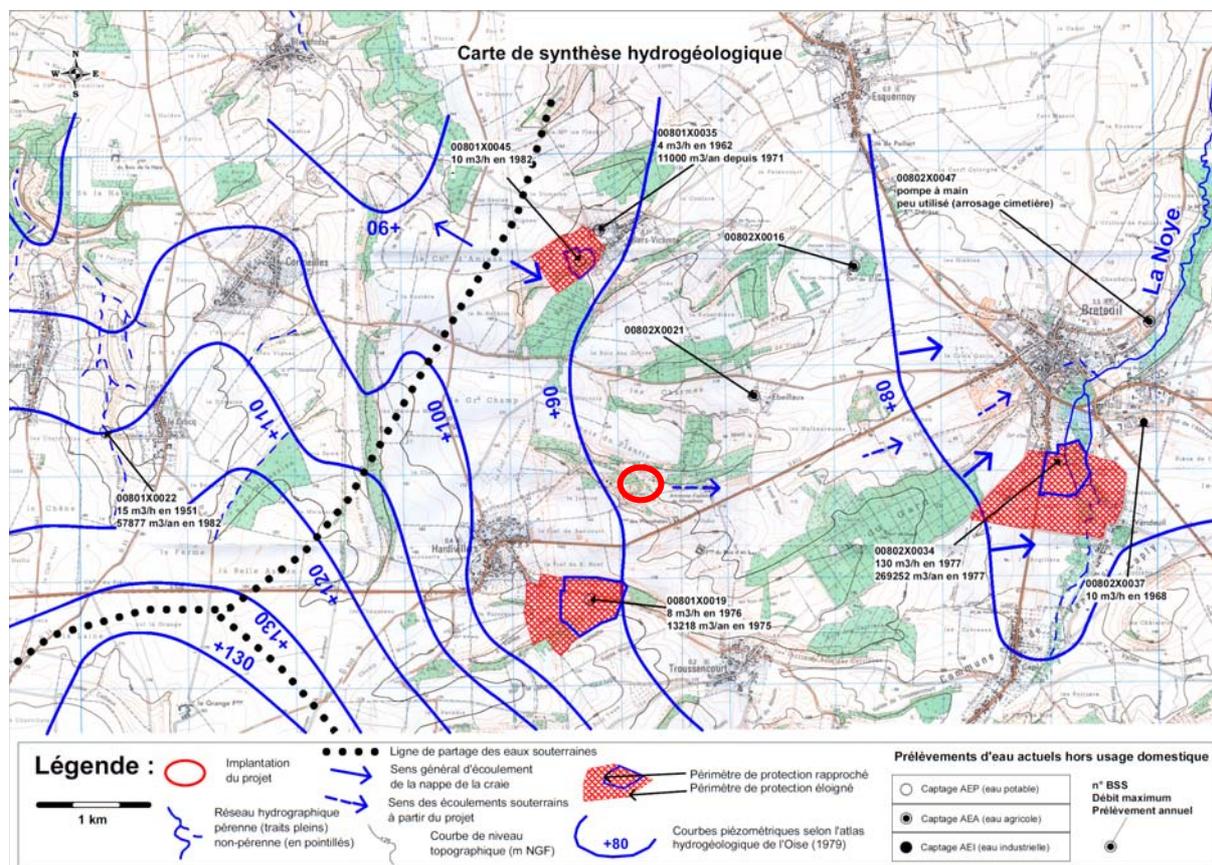
Le niveau des plus hautes eaux a été déterminé à près de +98mNGF soit à plus de 25 m de profondeur par rapport au fond de forme du projet. La nappe s'écoule au sein des formations du Campanien, du Santonien, et du Coniacien regroupées sous l'appellation d'aquifère du Sénonien. Cet aquifère constitue un réservoir d'eau d'importance régionale ;

- Les nappes plus profondes ne sont pas concernées par le projet (confinées et protégées par des écrans imperméables).

La Figure 4, ci-après permet de synthétiser le contexte hydrogéologique. La nappe de la craie est drainée par le réseau hydrographique (Noye à l'Est) et s'écoule grossièrement conformément à la topographie.

Bien que la nappe à un usage sensible, la ressource captée (captages AEP) n'est pas vulnérable au site. Une expertise hydrogéologique a d'ailleurs été réalisée sur le sujet par l'hydrogéologue agréé mandaté par la préfecture de l'Oise afin de justifier de l'absence de vulnérabilité du site sur la ressource captée (notamment pour l'AEP de Vendeuil-Caply alimentant la ville de Breteuil dans la vallée de la Noye, à Est du site).

Figure 4 : carte de synthèse du contexte hydrogéologique



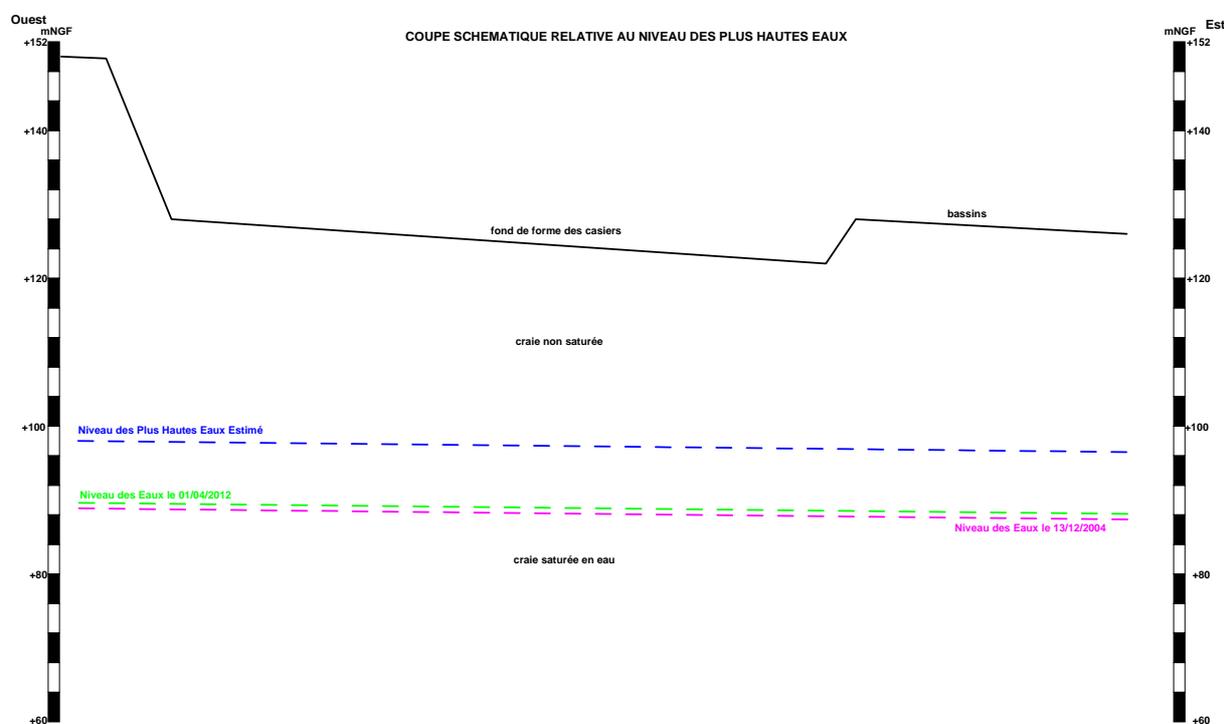
L'étude de qualification hydrogéologique a également permis de définir les plus hautes eaux possibles de la nappe en extrapolant, sur site, les données issues des piézomètres de suivi de la nappe appartenant au réseau de surveillance de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie.

Ainsi, les plus hautes eaux sont ainsi définies (Figure 5)

- En amont de la zone de stockage (à l'ouest), le niveau est à 98 m NGF ;
- En aval, il est à 96 m NGF au point bas du site (à l'Est) ;

Ces données servent de base pour le calcul d'équivalence de la barrière passive.

Figure 5 : coupe schématique des plus hautes eaux de la nappe



Ces données servent de base pour le calcul d'équivalence de la barrière passive.

### 2.1.3 Perméabilités de la barrière passive naturelle en place

Les essais de perméabilité ont été réalisés dans le cadre de l'étude de qualification ainsi qu'en phase travaux (contrôle externe et contrôle extérieur).

La position des essais est illustrée sur la Figure 6 et ont été réalisés sur les différentes couches constitutives de la barrière passive telle que définie dans l'AP et mises en œuvre sur site :

- argile rapportée à  $10^{-9}$  m/s ;
- craie recompactée en fond et en flanc sur 1 m à  $k < 10^{-7}$  m/s ;
- craie en place (équivalent des 5 m à  $10^{-6}$  m/s).

Figure 6 : localisation des essais de perméabilités in situ



Généralement et hors zones karstiques ou fracturées, la perméabilité naturelle de la Craie oscille intrinsèquement entre  $10^{-4}$  à  $10^{-7}$  m/s soit dans une gamme intermédiaire entre les différentes normes d'essais de perméabilité existant in situ.

### 2.1.3.1 Perméabilité en fond de site (craie en place)

32 essais ont été réalisés sur la Craie en place dont 23 aux cotes de la barrière passive (équivalent des 5 m à  $10^{-6}$  m/s), 1 en dessus et 8 légèrement en dessous :

- 5 essais de surface au double anneau (NF X 30-418, Rincant BTP),
- 24 essais en sondage selon la norme NF X 30-423, Rincant BTP)
- 3 essais en grand dans une fosse d'infiltration (Archambault)

Les valeurs de perméabilité s'échelonnent entre  $6,5 \cdot 10^{-5}$  m/s et  $1,9 \cdot 10^{-7}$  m/s.

Tableau 1 : essais de perméabilité in-situ sur la craie en place

<b>ESSAI DE PERMEABILITE en fosse DOUBLE ANNEAU (NF X 30-418)</b>							
Sondage proche	Réf.	Cote NGF	K (NF X 30-418)		K (m/s)	Estim. Fond de forme NGF	Estim. Fond de forme -5 m
			(m/TN)	NGF			
SD1	K1	125.82	2	123.82	1.2 E-06	125	120
SD2	K2	125.48	2	123.48	1.4 E-06	124.5	119.5
SD3	K3	125.16	3	122.16	1.6 E-06	122.2	117.2
SD4	K4	124.01	1.5	122.51	1.1 E-06	124	119
SD6	K6	126.08	1.5	124.58	1.1 E-06	125	120
<b>SONDAGES DESTRUCTIFS enregistrés (120 mm)</b>							
Réf.	Cote NGF	Prof. (m)	K (NF X 30-423)		K (m/s)	Estim. Fond de forme NGF	Estim. Fond de forme -5 m
			(m/TN)	NGF			
SD1	125.82	10	1.5 à 2.5	123.82	2.8 E-06	125	120
			4.5 à 5.5	120.82	9.7 E-06		
			6.5 à 7.5	118.82	2.5 E-06		
SD2	125.49	10	1.5 à 2.5	123.49	1.9 E-07	124.5	119.5
			4.5 à 5.5	120.49	6.4 E-06		
			7.5 à 8.5	117.49	2.2E-07		
SD3	125.16	11	2.5 à 3.5	122.16	7.2 E-06	122.2	117.2
			5.5 à 6.5	119.16	2.0 E-05		
			8.5 à 9.5	116.16	5.9 E-06		
SD4	124.01	10	1.5 à 2.5	122.01	1.4 E-05	124	119
			4.5 à 5.5	119.01	2.3 E-06		
			7.5 à 8.5	116.01	3.3 E-07		
SD5	127.33	15	6 à 7	120.83	2.3 E-05	120.5	115.5
			9.5 à 10.5	117.33	3.1 E-05		
			12.5 à 13.5	114.33	6.3 E-06		
SD6	126.08	10	1.5 à 2.5	124.08	7.9 E-06	125	120
			4.5 à 5.5	121.08	5.4 E-05		
			7.5 à 8.5	118.08	6.2 E-06		
SD7	130.8	15	6.5 à 7.5	123.8	6.5 E-05	123.5	118.5
			9.5 à 10.5	120.8	2.5 E-06		
			12.5 à 13.5	117.8	1.2 E-06		
SD8	137.58	20	11.5 à 12.5	125.58	1.4 E-05	126	121
			14 à 15	123.08	4.5 E-05		
			16.5 à 17.5	120.58	9.4 E-06		
Fosse			F1	F2	F3 *	Moyenne	
Capacité d'absorption (m/s)			8,0.10 <sup>-6</sup>	9,3.10 <sup>-6</sup>	8,5.10 <sup>-6</sup>	8,6.10 <sup>-6</sup>	
Approche de la perméabilité K (m/s)			2,3.10 <sup>-6</sup>	5,0.10 <sup>-6</sup>	3,3.10 <sup>-6</sup>	3,5.10 <sup>-6</sup>	

### 3.3.3.2 Perméabilité en flanc

Elle a été évaluée à partir des 3 sondages carottés réalisés sur le pourtour du site à raison de 3 essais par sondages.

Tableau 2 : essai de perméabilité sur la craie en flanc

SONDAGES CAROTTES (114 mm)										
Réf.	Cote NGF	Prof. (m)	Ech Intact (m/TN)		K (NF X 30-423) (m/TN)			K (m/s)	Estim. Fond de forme NGF	
				NGF			NGF			
SC1 (2011)	152.08	30	10	142.08	6.5	à	7.5	145.08	1.0E-06	126
			18.5	133.58	13.5	à	14.5	138.08	3.1E-07	
					20.5	à	21.5	131.08	3.3E-07	
			27.5	124.58	26.5	à	27.5	125.08		
SC2 (2013)	127.58	10	3	124.58	1	à	2.5	125.83	4.5E-06	120
			6	121.58	3	à	4.5	123.83	1.6E-05	
			9	118.58	5	à	6.5	121.83	1.7E-05	
SC3 (2013)	133.49	15	3	130.49	2.25	à	3.75	130.49	2.5E-05	122.5
			8	125.49	5	à	6.5	127.74	6.7E-07	
			13	120.49	8	à	9.5	124.74	7.7E-06	

La perméabilité en flanc varie de  $2,5 \cdot 10^{-5}$  m/s à  $3,1 \cdot 10^{-7}$  m/s.

Les valeurs de perméabilité sur la Craie en place (fond et flanc) demeurent relativement homogènes : elles sont comprises entre  $6,5 \cdot 10^{-5}$  m/s et  $1,9 \cdot 10^{-7}$  m/s. Les essais ont été réalisés en respect des normes et conformément aux règles de l'art. Ils permettent d'avoir une vision claire et objective de la perméabilité de la Craie sous le site :

Elle n'est pas karstique et homogène en grand. Pour le calcul d'équivalence, il faudra prendre la valeur la plus élevée obtenue (pénalisante), à savoir  $6,5 \cdot 10^{-5}$  m/s.

## 2.1.4 Perméabilité de la barrière passive reconstituée ou rapportée

### 2.1.4.1 Couche de 1m à $10^{-7}$ m/s en fond

15 essais ont été réalisés sur la couche de craie compactée à  $10^{-7}$  m/s (au-dessus de la craie en place, voir Figure 6 et synthèse Tableau 3) :

- 6 essais au droit de l'alvéole n° 1 du casier n° 1 (Gaufor) ;
- 9 essais au droit de l'alvéole n° 3 du casier n°1 (Rincent BTP).

Les valeurs obtenues sont toutes inférieures à  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s donc à la valeur de perméabilité réglementaire de  $10^{-6}$  m/s du substratum définie pour la couche d'atténuation.

Tableau 3 : essais de perméabilité sur la couche de craie compactée à  $1.10^{-7}$  m/s en fond

N° Essai	Nature	Profondeur	Perméabilité K 20°C (m/s)	Observations
E1	Craie compactée	75 cm	$1.0 \cdot 10^{-7}$	CONFORME
E2		En flanc	$9.0 \cdot 10^{-8}$	CONFORME
E3		50 cm	$1.0 \cdot 10^{-7}$	CONFORME
E4		50 cm	$9.4 \cdot 10^{-8}$	CONFORME
E5		Surface	$9.8 \cdot 10^{-8}$	CONFORME
E6		En flanc	$9.1 \cdot 10^{-8}$	CONFORME

Réf. Essai	1	2	3	4	5
Profondeur (m/TN)	0	0	0	-0,50	-0,50
Nature sol	Craie compactée				
K <sub>20°</sub> (m/s)	$8,4 \cdot 10^{-8}$	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$	$7,6 \cdot 10^{-8}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$

Réf. Essai	6	7	8	9
Profondeur (m/TN)	-0,50	-0,75	-0,75	-0,75
Nature sol	Craie compactée			
K <sub>20°</sub> (m/s)	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$7,0 \cdot 10^{-8}$	$8,8 \cdot 10^{-8}$	$9,5 \cdot 10^{-8}$

#### 2.1.4.2 Couche de 1 m à $10^{-7}$ m/s en flanc

Deux essais d'eau ont été effectués sur la craie compactée en flanc (Tableau 4) de l'alvéole n° 3 du casier n° 1 (GAUFOR).

Tableau 4 : essais de perméabilité sur la couche de craie compactée à  $10^{-7}$  m/s en flanc

N° Essai	Nature	Profondeur	Perméabilité K 20°C (m/s)	Observations
DA 1	Craie compactée	50 cm	$6.1 \cdot 10^{-9}$	CONFORME
DA 2		50 cm	$7.7 \cdot 10^{-9}$	CONFORME

Les valeurs sont très nettement inférieures aux exigences réglementaires de perméabilité pour la couche d'atténuation ( $<10^{-6}$  m/s) du substratum.

#### 2.1.4.3 Couche de 1 m à $10^{-9}$ m/s en fond

Les argiles mises en œuvre sur le site d'Hardivillers proviennent du gisement de Lihons et ont déjà fait leur preuve sur le site de l'ISDND de Lihons (80).

Une planche d'essai (pièce 5) validée par le contrôle extérieur, a été réalisée selon la norme NF X 30-420, sur l'alvéole n°3 du casier n° 1 (voir figure 1), pour valider les conditions de mise en œuvre de l'argile en BSP avec les moyens en matériel de terrassement de GURDEBEKE S.A.

Sur cette base, onze essais de perméabilité ont été exécutés, selon la norme NF X 30-420, sur de l'argile compactée en flanc (2 m de base), en fond, en surface, et en digue sur l'alvéole n° 1 du casier n° 1 (Tableau 5).

Tableau 5 : essais de perméabilité sur les argiles rapportées à  $10^{-9}$  m/s

N° Essai	Nature	Profondeur	Perméabilité K 20°C (m/s)	Observations
K1	Argile compactée	Fond en surface	$1.9 \cdot 10^{-10}$	CONFORME
K2		En digue à 50 cm	$1.6 \cdot 10^{-10}$	CONFORME
K3		Fond en surface	$1.2 \cdot 10^{-10}$	CONFORME
K4		En flanc	$2.0 \cdot 10^{-10}$	CONFORME
K5		Fond à 40 cm	$2.1 \cdot 10^{-10}$	CONFORME
K6		Fond à 70 cm	$2.0 \cdot 10^{-10}$	CONFORME
K7		En flanc	$1.4 \cdot 10^{-10}$	CONFORME
K8		En fond à 40 cm	$1.2 \cdot 10^{-10}$	CONFORME
K9		En fond à 70 cm	$1.0 \cdot 10^{-10}$	CONFORME
K10		En digue à 50 cm	$1.2 \cdot 10^{-10}$	CONFORME
K11		Fond à 50 cm	$1.6 \cdot 10^{-10}$	CONFORME

Les valeurs de perméabilités obtenues sont inférieures à la valeur réglementaire de  $1.10^{-9}$  m/s, avec un intervalle compris entre  $1,0 \cdot 10^{-10}$  m/s et  $2,1 \cdot 10^{-10}$  m/s.

## 2.1.5 Conformité et représentativité des essais de perméabilité

Les essais réalisés sont suffisants en nombre (32 essais en fond et 9 en flancs sur la craie en place) et ont été réalisés avec des normes complémentaires représentatives de la gamme de perméabilité de la formation (en forage selon la norme NFX 30-423, en surface selon la norme NF X 30-418, etc.).

Hormis le premier mètre plus perméable (déstructuré), on peut en conclure que la craie a une perméabilité relativement faible proche du seuil réglementaire ( $10^{-6}$  m/s).

Toutefois, il convient, pour être sécuritaire, de prendre la valeur la plus pénalisante pour les calculs d'équivalence à savoir une perméabilité de  $6,5 \cdot 10^{-5}$  m/s pour la craie formant la barrière passive en place (équivalent des 5 m d'atténuation à  $k < 10^{-6}$  m/s) bien que sa perméabilité en grand soit plus faible (proche de  $10^{-6}$  m/s).

Sur la craie en place, 1 m de craie est recompressé afin d'obtenir une couche à perméabilité inférieure à  $10^{-7}$  m/s. La conformité de cet horizon a été validé en fond et en flanc par 17 essais de perméabilité en fond de site (1 m à  $k < 1,10^{-9}$  m/s, 11 essais in situ).

## **2.1.6 Cible**

N'est étudiée ici que la ressource en eau souterraine destinée à la consommation humaine ou désignée aussi par alimentation en eau potable (AEP).

La ressource en eau souterraine est exclusivement contenue dans la nappe de la Craie. La position des captages existants est illustrée dans la Figure 4.

D'après les documents consultés, le site est en dehors de tout périmètre de protection de captage AEP. Le captage le plus proche est situé en amont hydrogéologique.

Le premier captage AEP potentiellement en aval est le captage de Breteuil situé à Vendeuil-Caply localisé dans la vallée de la Noye.

Une expertise hydrogéologique a été réalisée sur le sujet par l'hydrogéologue agréé en matière d'hygiène publique mandaté par la préfecture de l'Oise qui a justifié de l'absence de vulnérabilité du site sur le captage.

Il existe cependant une vulnérabilité potentielle de la ressource présente sous le site. L'absence de vulnérabilité est conditionnée par la mise en place des barrières de sécurité du CSDNF, à savoir la présence d'une barrière active et d'une barrière passive conforme à la réglementation en vigueur.

## **2.1.7 Justification de l'équivalence**

### **2.1.7.1 Constat**

Le constat pour justifier le besoin d'équivalence repose sur les 3 points suivants :

- Le site repose sur la Craie, formation aquifère et ressource AEP dans le secteur.

Les études géologiques et notamment les tests de perméabilité in situ, ont montré :

- L'absence de l'horizon imperméable en place en fond et en flanc de site (1 m à  $k < 10^{-9}$  m/s) : la couche supérieure de la barrière passive devra être reconstituée ;

- L'absence partielle de l'horizon d'atténuation en fond de site (5 m à  $k < 10^{-6}$  m/s) : la barrière passive doit être renforcée.

Conformément à la réglementation, et pour les raisons citées ci-avant, une équivalence doit être proposée et démontrée.

La structure est présentée et détaillée ci-après.

### 2.1.7.2 Exigences à remplir pour la structure de la barrière passive

La structure équivalente doit répondre aux 4 exigences suivantes, en réponse à la réglementation et afin de prendre en compte la sensibilité locale :

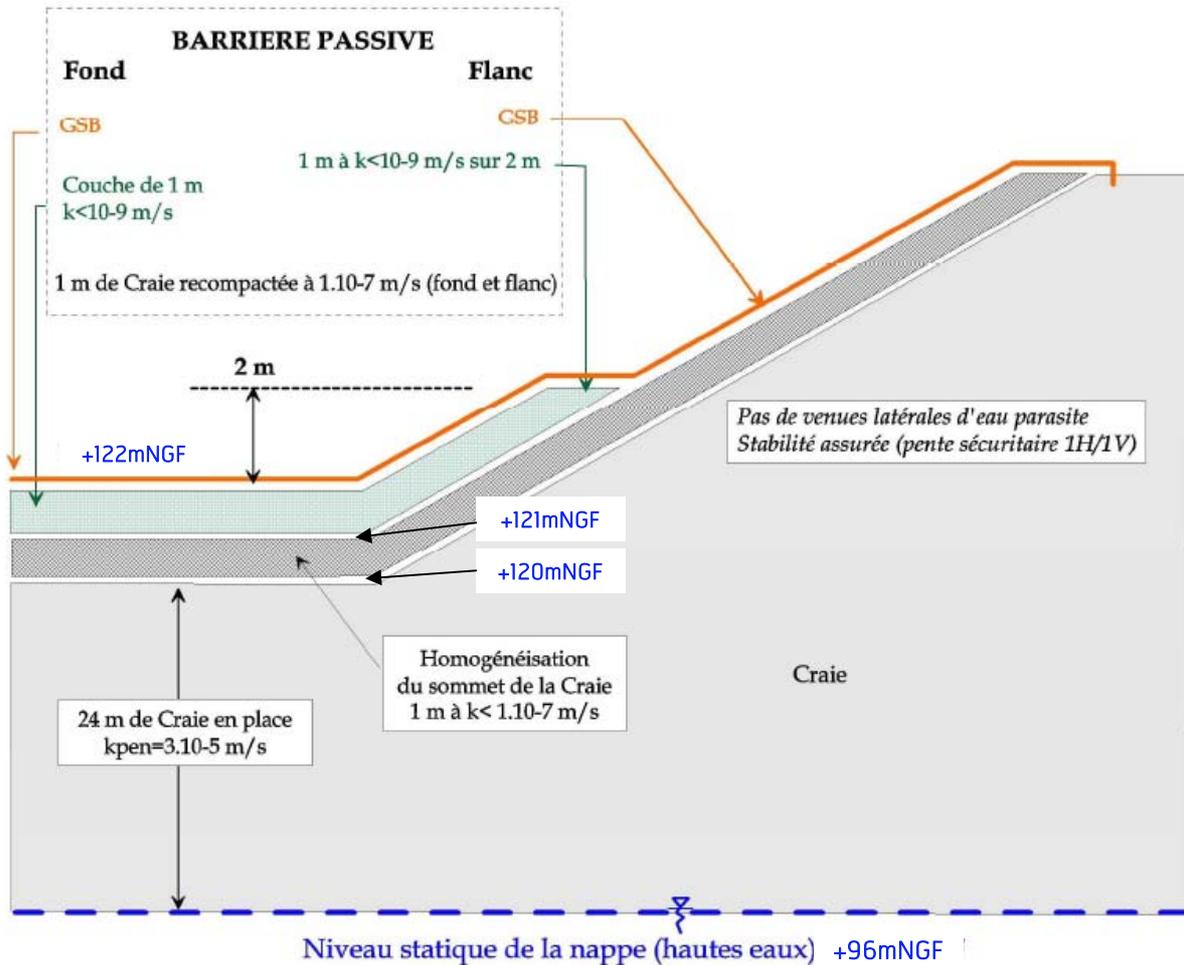
- Exigence 1 : l'absence de couche à  $10^{-9}$  m/s impose une reconstitution de la couche imperméable de la barrière passive ;
- Exigence 2 : l'absence de la couche d'atténuation (5 m à  $10^{-6}$  m/s) impose que la barrière passive soit renforcée ;
- Exigence 3 : la présence d'une ressource en eau sous le site impose que la barrière passive soit renforcée ;
- Exigence 4 : justification de la cote minimale de la base de la couche à  $10^{-9}$  m/s.

Le guide de recommandation pour l'évaluation de l'équivalence en étanchéité passive d'Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux du MEDDAD [D1] précise l'épaisseur minimale de la couche d'atténuation (équivalent au  $10^{-6}$  m/s) en cas de présence sous le site d'horizon relativement perméable :

*« Dans le cas d'un matériau relativement perméable, il conviendrait que les plus hautes eaux connues se situent au moins à une distance de 2 m de la base de la couche à  $1$  m à  $10^{-9}$  m/s ».*

## 2.1.8 Schéma de principe de conception

Figure 7 : schéma de conception



## 2.2 PROJET DE RECONSTITUTION DE LA BARRIERE PASSIVE

### 2.2.1 Zone la plus pénalisante

La zone la plus pénalisante est localisée au point bas des casiers 2 et 3 où la cote est à +122mNGF, c'est-à-dire où la distance à la nappe en hautes eaux est la plus faible (26m de profondeur pour une cote de la nappe à +96mNGF).

## 2.2.2 En fond

### 2.2.2.1 Structure

La structure mise en œuvre se compose, de haut en bas :

- GSB à bentonite calcique naturelle de 6 mm à sec et  $k < 5.10^{-11}$  m/s ;
- 1m d'argile de Lihons rapportée et compactée à  $k < 1.10^{-9}$  m/s ;
- 1m de craie homogénéisée et compactée à  $k < 1.10^{-7}$  m/s ;
- 24m de craie en place non déstructurée à  $k < 6,5/10^{-5}$  m/s.

### 2.2.2.2 Evaluation quantitative (calcul d'équivalence)

Les dispositions en fond de l'exploitation pour lesquelles un calcul de performances a été réalisé sont schématisées dans le tableau 5 ci-dessous. Deux calculs ont été réalisés :

- Cas 1 : dispositions réglementaires ;
- Cas 2 : solution équivalente avec les paramètres pénalisants déduits de l'étude

Tableau 6 : scenarii en fond de site

	Réglementation Cas 1	Equivalence (pénalisant) Cas 2
Niveau imperméable	e1=1 m à $k < 10^{-9}$ m/s	GSB e0= 6 mm à $k_{pen}=5.10^{-11}$ m/s
		e1= 1 m à $k_{pen}=10^{-9}$ m/s
Niveau semi-perméable	e2=5 m à $k < 1. 10^{-6}$ m/s	e2= 1 m à $k=1.10^{-7}$ m/s
Terrains en place	e3=20 m à $k < 6,5. 10^{-5}$ m/s	e3=23 m à $k < 6,5. 10^{-5}$ m/s

Le modèle mathématique, développé par le BRGM (logiciel MISP), calcule une concentration maximale dans la nappe à partir d'une concentration unitaire traversant la barrière passive et ce pour un temps infini et une charge hydraulique de 30 cm de lixiviats. Le détail est présenté en annexe du présent document.



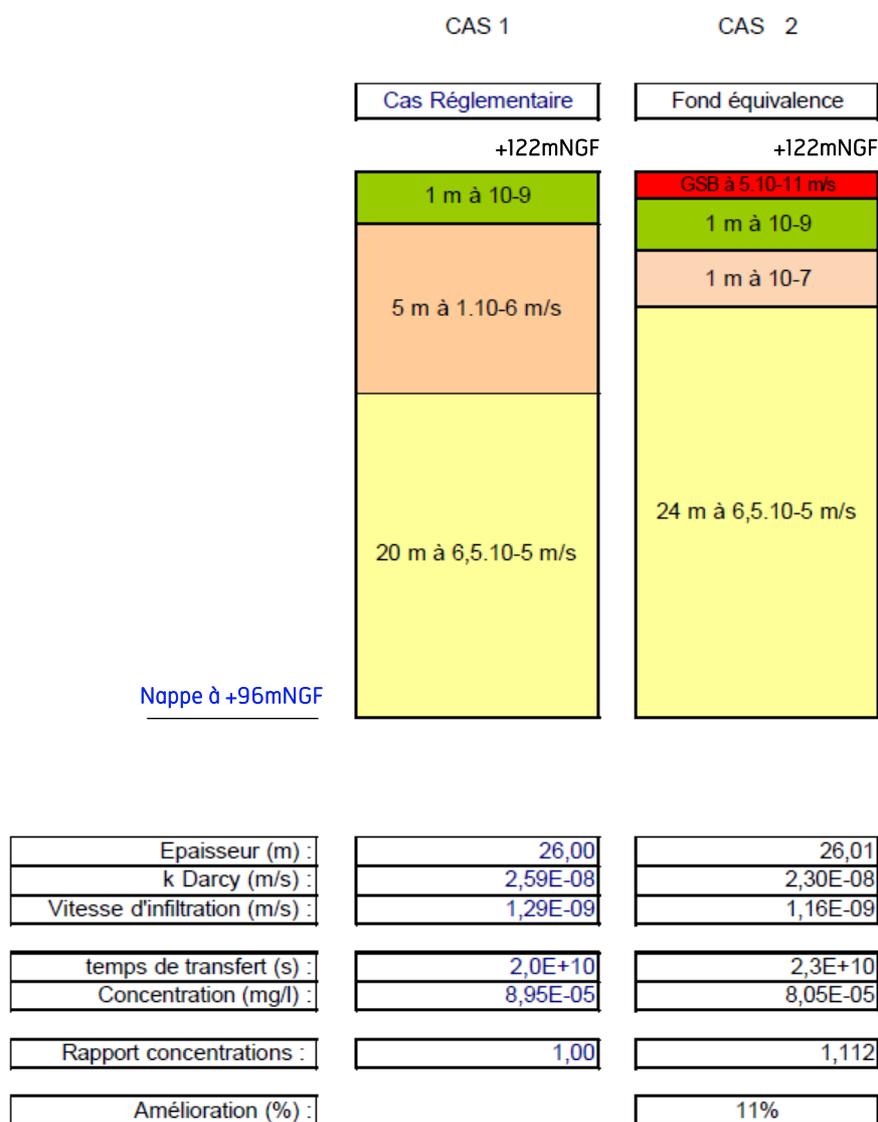
Les résultats sont présentés sur la Figure 8 ci-après.

La concentration résultante du calcul sous MISP-VI dans la nappe de la Craie pour le dispositif réglementaire est de  $5,95 \cdot 10^{-5}$  mg/l (cas 1).

Il est de  $5,05 \cdot 10^{-5}$  mg/l pour le dispositif équivalent en condition pénalisante (cas 2) soit 11% meilleur que la réglementation (rapport de 1.112).

La structure proposée en fond (GSB + argile rapportée compactée sur 1m à  $k < 10^{-9}$  m/s + 1m de craie compactée à  $k < 10^{-7}$  m/s est conforme, et au moins équivalente à la structure réglementaire car elle offre une protection meilleure que le dispositif réglementaire vis-à-vis de la ressource en eau.

Figure 8 : résultats de la simulation pour le fond avec MISP-VI



## 2.2.3 En flanc

### 2.2.3.1 Structure

La structure proposée est illustrée dans le schéma conceptuel. De la base du site à 2m par rapport au fond, de haut en bas :

- GSB à bentonite calcique de 6 mm à sec et  $k < 5.10^{-11}$  m/s ;
- 1 m d'argile de Lihons rapportée pris perpendiculairement à la pente du talus et compactée à  $k < 1.10^{-9}$  m/s ;
- 1 m de craie recompactée à  $k < 1.10^{-7}$  m/s

Au-delà de 2 m par rapport au fond :

- GSB à bentonite calcique naturelle de 6 mm à sec et  $k < 5.10^{-11}$  m/s ;
- 1 m de craie recompactée à  $k < 1.10^{-7}$  m/s

La base est conforme à la réglementation (1 m d'argile compactée à  $k < 1.10^{-9}$  m/s).

Une justification doit être proposée pour le flanc au dessus de 2 m par rapport au fond pour lequel seul le GSB contribue au renforcement de la barrière passive.

### 2.2.3.2 Evaluation qualitative

Comme spécifié dans la guide des bonnes pratiques [D1], une démonstration quantitative n'est pas nécessaire et souvent « sujette à caution ».

Il est précisé que « (...) la problématique des flancs est autrement plus complexe que celle des fonds (...). Il vaut mieux réserver le calcul à celui de la stabilité. (...) La solution équivalente sur les flancs peut être argumentée de manière qualitative en invoquant notamment la stabilité mécanique ou l'amélioration du drainage sur les flancs permettant de réduire les risques de mise en charge par des nappes perchées ».

Ainsi, la démonstration qualitative passe par la justification de l'absence de venues latérales et par la justification de la stabilité du talus.

### **2.2.3.2.1 Absence de venues latérales**

L'étude hydrogéologique a démontré l'absence de venues latérales. Aucun dispositif de détournement des venues latérales n'est nécessaire.

### **2.2.3.2.2 Stabilité mécanique**

Dans le cas du GSB posé sur les flancs, la stabilité mécanique de l'ensemble GSB/talus a été étudiée. La stabilité du GSB dépend :

- d'une part de sa résistance à la traction qui doit être supérieure à 10KN/m (ce qui autorise une mise en œuvre sur des rampants supérieurs à 10m dans le sens traction) ;
- d'autre part sur la mise en œuvre du GSB enfoui dans la tranchée d'ancrage en tête de talus (la distance au nez du talus doit être suffisante pour supprimer le risque de glissement du nez).

Les calculs de stabilité d'ensemble ont été réalisés par Rincint BTP à l'aide du logiciel TALREN vers 2.0.4 aux ELS en situation définitive et provisoire et aux ELU [P2]. Le logiciel utilise une approche statique et applique la méthode des tranches de Bishop. Les lignes de ruptures potentielles sont de type circulaire.

La situation provisoire la plus défavorable concerne le talus en déblais total du flanc Ouest au droit de la future alvéole 3 du casier 1 en aval de l'installation du local pesée avec un talus de près de 25m.

Les conclusions de Rincint BTP sont les suivantes [P2] :

#### *« 5.2.4 Synthèse*

*En situation la plus défavorable, une pente en déblai de 1 de base de hauteur (1/1) peut être retenue.*

*Par voie de conséquence, cette géométrie peut être appliquée à l'ensemble des déblais du projet. »*

Le calcul de résistance à la traction du GSB a également été réalisé par Rincint BTP [P2]. L'ancrage minimum à respecter devra présenter une hauteur de 0,70m et une largeur de 1,00m avec retour des géosynthétiques sur toute la largeur de tranchée.

### 2.2.3.3 Evaluation semi-qualitative

Bien que la justification qualitative précédente soit suffisante pour justifier de l'équivalence en flanc, un calcul d'équivalence de performances a été tout de même réalisé avec une charge fictive en lixiviats de 1 cm. Les différents cas étudiés sont schématisés dans le Tableau 7 ci-après :

- cas 3 : dispositions réglementaires ;
- cas 4 : solution équivalente avec les paramètres pénalisants (GSB à  $5.10^{-11}$  m/s).

Tableau 7 : scenarii en flancs de site

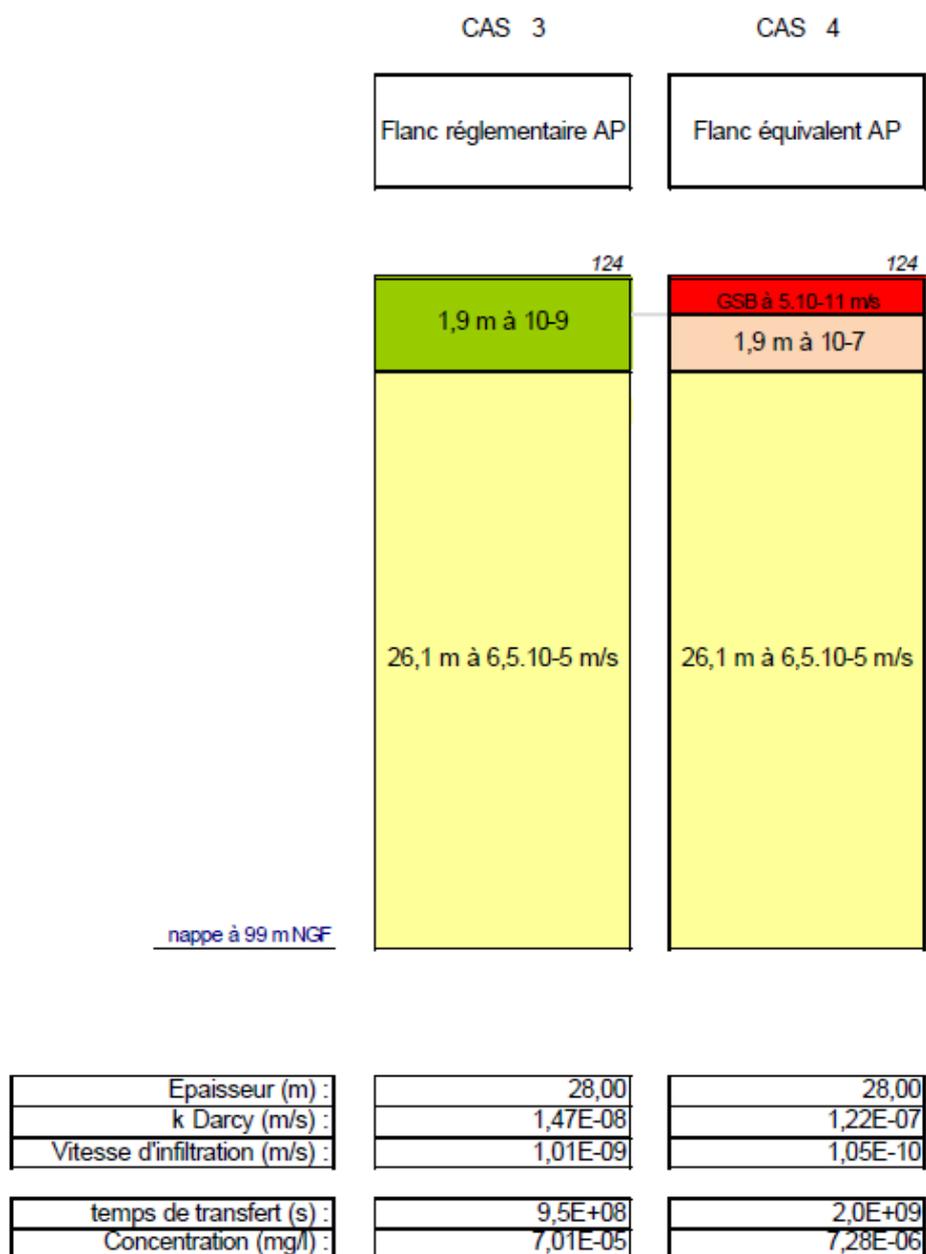
	Réglementation Cas 3	Equivalence (pénalisant) Cas 4
Niveau imperméable	$e1=1\text{ m}$ à $k<10^{-9}\text{ m/s}$ <i>(épaisseur réelle de 1,9 m pris perpendiculairement à la pente)</i>	GSB $e0= 6\text{ mm}$ à $k_{pen}=5.10^{-11}\text{ m/s}$
Niveau semi-perméable	$e2=26,1\text{ m}$ à $k<6,5. 10^{-5}\text{ m/s}$	$e1= 1\text{ m}$ à $k<10^{-7}\text{ m/s}$ <i>(épaisseur réelle de 1,9 m pris perpendiculairement à la pente)</i> $e2= 26,1\text{ m}$ à $k<6,5. 10^{-5}\text{ m/s}$

Les résultats sont présentés dans la Figure 9 ci-après.

La concentration résultante du calcul sous MISP dans la nappe de la craie pour le dispositif réglementaire est de  $7,01.10^{-5}$  mg/l (cas3).

Il est de  $7,28.10^{-6}$  mg/l pour le dispositif équivalent en condition pénalisante (cas4).

Figure 9 : résultats de la simulation en flancs avec MISP-VI



La structure proposée en flanc (GSB calcique) est conforme et est au moins équivalente à la structure réglementaire.

## 2.2.4 Prescriptions de mise en œuvre et de contrôle des matériaux

*Ce paragraphe n'est qu'une proposition de prescriptions et doit être validé par le contrôle extérieur le moment venu lors des travaux de mise en œuvre.*

### 2.2.4.1 GSB

Le Géosynthétique Bentonitique est un matériau composite constitué d'une âme en poudre ou granulés d'argiles, enchâssée entre deux géotextiles et polypropylène solidaires (généralement aiguilletés). L'ensemble forme une nappe, de 40 m de longueur et de 0,6 cm d'épaisseur (à sec) et 0,8 cm à saturation.

La nature de l'argile est importante. Celle qui est mise en place sur les flancs est à base de bentonite calcique (conforme aux exigences du site (substratum crayeux avec risque d'échanges cationiques en cas d'utilisation d'un GSB à bentonite sodique).

La masse surfacique en bentonite est égale à au moins 5000 g/m<sup>2</sup>. La résistance à la traction (sens production/sens travers) doit être supérieure à 10 kN/m.

En situation normale, le coefficient de perméabilité de ce GSB sous 30 kPa est  $k < 5.10^{-11}$  m/s.

#### 2.2.4.1.1 Programme d'essais en laboratoire

Ces valeurs de référence du GSB pourront être validées en laboratoire par des essais de caractérisation (XP P 84-703, NF EN 14196, XP P 84-705) effectués sur des échantillons de GSB prélevés à la livraison sur le chantier.

Le programme d'essais en laboratoire est défini en page 18 du fascicule n° 12 du Comité Français des Géosynthétiques (CFG, [D4]) comprenant la vérification des caractéristiques fonctionnelles à considérer, notamment celles classées N (nécessaires) dont :

- le pouvoir du gonflement de la bentonite ;
- la masse surfacique ;
- la perméabilité sous contrainte.

#### 2.2.4.1.2 Programme de contrôles sur site

L'organisation du chantier de pose du GSB devra suivre les recommandations du Comité Français de Géosynthétiques développés dans le fascicule n° 12 de Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par Géosynthétique Bentonitique et plus particulièrement du tableau page 18, des caractéristiques de mise en œuvre et du §3.3 pages 21 à 32.

Il convient, en particulier de s'assurer que :

- la couche de support est adaptée à recevoir un GSB (pas de racines, pas de points de poinçonnement, matériau non pulvérulent, etc.) ;
- le plan de pose et de récolement mentionne les zones de recouvrement et les découpes particulières (au niveau d'ouvrages par exemple) ;
- la surface de recouvrement entre lés est respectée (dans le sens de la longueur : 15 à 30 cm, aux extrémités des rouleaux : 40cm) ;
- la largeur d'ancrage en tête de talus est respectée (1,5m en cas d'enfouissement dans une tranchée par simple lestage, 3 m si des engins doivent circuler).

Plusieurs contrôles de chantier sont recommandés : contrôle interne, externe et extérieur, destinés à vérifier les recommandations du CFG. Les modalités de contrôles sont détaillées dans le chapitre 4 du fascicule, p. 33 à 38, avec notamment :

- le contrôle des zones de stockage, de manutention des produits et de réception des matériaux et matériels sur le chantier ;
- le contrôle associé à la mise en œuvre et réception de la couche support ;
- le contrôle du plan de calepinage, du plan de phasage et du plan de récolement ;
- le contrôle associé à la mise en œuvre du GSB (Récolement, ancra, etc.)

#### 2.2.4.2 Couche à $10^{-9}$ m/s

Préalablement à l'aménagement des alvéoles, l'exploitant doit élaborer un cahier des charges techniques des travaux d'exécution de la barrière passive rapportée avec la validation et le suivi par un organisme extérieur, comprenant en particulier :

- déblaiement préliminaire :
  - ◆ le contrôle de la qualité du matériau argileux ;
  - ◆ les conditions de son extraction, tri et pré stockage ;
- avant la mise en œuvre in situ en fond de site :
  - ◆ la préparation du fond de terrassement par le déblai sur 1 mètre minimum du toit déstructuré de la craie et le remblaiement par les limons argileux du site recompactés sur 2 m en couches successives ;
  - ◆ la réalisation d'une planche d'essai avant chacune des campagnes d'imperméabilisation ;

*Devront être définis en particulier : l'épaisseur des couches élémentaires (de l'ordre de 0.25m), des caractéristiques des engins de compactage en vue de définir le nombre de passes d'engins nécessaire par couche élémentaire.*

*Les caractéristiques du matériau à mesurer lors de la mise en œuvre de la planche d'essai sont à minima les suivantes : teneur en eau (in situ), densité (in situ), essais Proctor (sur échantillons); perméabilité au laboratoire et in situ, l'étalonnage d'une relation perméabilité/densité en place /teneur en eau.*

- ◆ La définition et le suivi de la procédure de mise en œuvre du matériau argileux propre à assurer l'imperméabilité requise ;
- ◆ Lors de la pose de la couche imperméable ;
  - la mise en place de la barrière passive rapportée en 4 couches minimum par mètre d'épaisseur finale du matériau argileux ;
  - le contrôle de la teneur en eau et de la densité du matériau posé et de l'homogénéité spatiale du compactage par couverture au gamma-densimètre ;
  - la mesure de perméabilité de chaque couche de matériau argileux compacté (une mesure par 1 000 m<sup>3</sup> de matériau posé) ;
  - le repérage sur plan à échelle adaptée des points de mesure ;
  - l'émission d'un rapport de contrôle extérieur de surveillance et la réception de chaque phase d'aménagement du fond et des flancs du CSDNF.

La barrière de sécurité passive doit être mise en œuvre selon les recommandations et les informations figurant notamment dans les documents suivants :

- *Mise en œuvre de matériaux rapportés destinés au confinement des centres de stockage - Août 1996 – Rapport BRGM R 38696 ;*
- *Interaction argile – lixiviat- impact sur la fondation d'étanchéité de la barrière passive - Août 2000 – Note technique du service environnement et Procédés du BRM référencée EPI/DEM – HG /BB n° 2000/702.*

### 3 AVIS SUR LA CONFORMITE DE LA BARRIERE EQUIVALENTE PROPOSEE

Les éléments nécessaires à la justification de la recevabilité et de la conformité de la barrière passive équivalente proposée, sont repris dans le Tableau 8 ci-après.

La barrière passive proposée par le pétitionnaire tant en fond de site qu'en flanc, est conforme en tous points et offre une protection au moins équivalente au dispositif réglementaire.

**Tableau 8 : synthèse des éléments de conformité de la barrière passive**

	Exigence 1	Exigence 2	Exigence 3	Exigence 4	Exigence 5	Exigence 6
Réglementation guide	1 m à $10^{-9}$ m/s en fond et en flanc (0,5m minimum sur les 2 m de base des flancs)	5 m à $10^{-6}$ m/s en fond	Protection de la ressource en eau	Base de la couche à $10^{-9}$ m/s 2 m au-dessus des plus hautes eaux	Calcul d'équivalence fond et flanc si barrière passive absente	/
Constat – Etat initial	Absent	Absent partiellement	Ressource en eau sous le site potentiellement vulnérable	Plus hautes eaux estimées à +96mNGF	Barrière passive absente au moins partiellement	Toit de la craie déstructurée
Recommandation	Barrière passive à reconstituer	Barrière passive à reconstituer	Barrière passive à reconstituer	/	Proposer une structure équivalente validée par un calcul d'équivalence	Recompacter le toit de la craie sur 1 m
Cas équivalent	Apport d'argile de Lihons compactée à $k < 10^{-9}$ m/s sur le fond et sur les 2 m de base des flancs sur 1 m et mise en place d'un GSB en fond et en flanc	GSB + 1 m de craie recompactée à $k < 10^{-7}$ m/s en fond	Mise en place d'un GSB en fond	Cote de la base de la couche à $10^{-9}$ m/s à +121mNGF soit à 25 m au-dessus des plus hautes eaux	Barrière équivalente proposée et validée par le calcul en fond et en flanc	/
Recevabilité - Conformité	Conforme	Conforme	Conforme	Recevable	Conforme	Recevable

Nanterre, novembre 2013

**BARON Philippe**

Hydrogéologue expert

## **ANNEXES**



## NOTES DE CALCUL (MISP\_V1)

### HYPOTHESES DE CALCUL

Le code de calcul utilisé fait appel à des solutions analytiques dont les principales hypothèses de résolution se résument au cas d'un régime permanent en mode hydro-dispersif (advection et dispersion –diffusion), d'un milieu saturé et d'un domaine à une dimension (1D) avec les conditions maximalistes pénalisantes suivantes :

- la barrière de sécurité passive est considérée comme étant poreuse, homogène, isotrope, indéformable et saturée en eau ;
- le calcul du transfert massique des solutés en mode diffusif nécessite la sélection d'un traceur, en l'occurrence les chlorures ( $R=1$ ) ;
- le calcul du flux de Darcy à travers la barrière passive est considéré avec un écoulement vertical, unidirectionnel et uniforme ;
- le calcul du flux de Darcy dans l'aquifère est considéré avec un écoulement horizontal unidirectionnel et uniforme ;
- le mélange du flux massique d'infiltration avec celui de l'aquifère est supposé homogène ;
- le terme source est supposé infini dans le temps avec une concentration unitaire constante dans le temps ;
- le terme transfert est considéré comme nul (interaction entre la phase liquide interstitielle et la phase solide de la barrière géologique).

## ECRITURE MATHEMATIQUE

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

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

- où :  $c(z,t)$  = concentration à la profondeur  $z$  dans la couche et au temps  $t$  ( $M/L^3$ )  
 $i$  = infiltration verticale (Darcy) ( $L^3/L^2.T^{-1}$ )  
 $\theta$  = teneur en eau volumique  $D$  = coefficient de diffusion-dispersion ( $L^2/T$ )  
 $R$  = facteur retard à travers la barrière géologique  
 $\lambda$  = constante de décroissance de premier ordre ( $T^{-1}$ ).

Le coefficient de diffusion-dispersion ( $D$ ) est :

$$D = \alpha \frac{i}{\theta} + D_0 \psi$$

- où :  $\alpha$  = dispersivité longitudinale ( $L$ )       $\psi$  = tortuosité  
 $D_0$  = coefficient de diffusion dans l'eau pure ( $L^2/T$ )

L'équation de transport dans l'aquifère est :

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

- où :  $C$  = concentration dans l'aquifère au point  $x,y,z$  et au temps  $t$  ( $M/L^3$ )  
 $\phi$  = porosité de l'aquifère       $R_a$  = facteur de retard dans l'aquifère  
 $D_x, D_y, D_z$  = coefficient de dispersion-diffusion dans les directions  $x,y,z$  ( $L^2/T$ )  
 $\lambda_a$  = 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 dans l'aquifère en régime permanent est obtenue à partir de l'équation :

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

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



## PARAMETRAGE DU MODELE ANALYTIQUE MISP\_VI

La concentration relative maximale ( $c^*$ ) est calculée en régime permanent au toit de l'aquifère ( $z=0$ ),

le long de l'axe du panache ( $y=0$ ).

Le calcul en fond est réalisé sous une charge en lixiviats de 30 cm (réglementaire).

Le calcul en flanc est réalisé au dessus des 2 m de remontée du mètre à  $k < 10^{-9}$  m/s présent en fond de site avec une charge imposée de 1 cm.

Les feuilles de paramétrage des 3 cas étudiés sont présentées dans les pages ci-après.

## CAS 1:

```

***** CAS 1 Fond Cas reglementaire *****
*****
***** PARAMETRES DE LA SOURCE *****
1          OPTION_S pour le type de terme source
50.00     Longueur de la source dans la direction d'ecoulement des eaux (m)
50.00     Largeur de la source dans la direction perpendiculaire (m)
1.00E+00  Concentration source (mg/l) pour OPTION_S = 1, 2 ou 3
0.00     Duree de la concentration constante (an) (OPTION_S = 2)
0.00E-00  Constante de degradation de la conc. source (1/an) (OPTION_S = 3)
0.00     Parametre CA (kg/m3 an-0.5) (OPTION_S = 4)
2.00E-09  Coefficient de diffusion du solute dans l'eau pure (m2/s)
***** PARAMETRES DE LA COUCHE *****
1.29E-09  Vitesse d'infiltration (Darcy) verticale (m/s)
26.00     Epaisseur (m)
0.25     Teneur en eau ( )
0.30     Tortuosite ( )
2.60E-01  Dispersivite (m)
1.00     Coefficient de retard ( )
0.00E+00  Constante de degradation (1/an)
***** PARAMETRES DE L'AQUIFERE *****
7.00E-05  Flux de Darcy en limite amont de la zone source (m/s)
7.00E-05  Flux de Darcy en limite aval de la zone source (m/s)
0.30     Porosite ( )
30.00     Epaisseur (m)
1.00E+00  Dispersivite en X (m)
1.00E-01  Dispersivite en Y (m)
1.00E-01  Dispersivite en Z (m)
0.30     Tortuosite ( )
0.00E-00  Cnte de degradation (1/an)
1.00     Facteur Retard ( )
***** PARAMETRES DE RESTITUTION *****
*** PARAMETRES pour la sortie des flux
0.10     Premier temps de calcul du flux (an)
4        Nombre de cycles log temps
10       Nombre de points par cycle log
*** PARAMETRES pour les concentrations dans la nappe
2        *** OPTION_A pour le type de concentration
         (1 : Concentrations a profondeur(s) ponctuelle(s))
         (2 : Concentrations moyennes sur un intervalle de profondeur)
0.00     Prof. par rapport a la nappe de la limite sup de l'intervalle (m)
10.00    Prof. par rapport a la nappe de la limite inf de l'intervalle (m)
10       Nombre de subdivisions de l'intervalle
2        *** OPTION_B pour le type de restitution
         (1 : Repartition spatiale a temps fixe)
0.00     Temps (an) pour le calcul
0.00     Premier point X des profils de concentration (m)
0        Nombre de cycle log
0        Nombre de points par cycle log
         (2 : Evolution dans le temps a point fixe)
100.00   Coordonnee X (m) du point
0.00     Coordonnee Y (m) du point
0.00     Coordonnee Z (m) du point
0.10     Premier temps de calcul (an)
4        Nombre de cycles log
10       Nombre de points par cycle log
1        *** OPTION_C pour la representation spatiale (si OPTION_B = 1)
         (1 : repartition spatiale en plan: profils en X a differents Y)
0.00     Valeur max de Y (m)
0.00     Increment de Y (m)
0.00     Valeur de Z (m) si OPTION_A = 1
         (2 : repartition spatiale en coupe: profils en X a differents Z)
0.00     Profondeur max (m)
0.00     Increment de profondeur (m) (zero si profondeur unique)
0.00     Valeur de Y (m)
1        *** OPTION_D pour un changement de repere (1: NON, 2: OUI)
0.00     Coordonnee Xs de l'origine du repere 1 dans le repere 2
0.00     Coordonnee Ys de l'origine du repere 1 dans le repere 2
0.00     Angle (degres) entre les axes des X des reperes 1 et 2
         (rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre)
*****

```



## CAS 2 :

```

***** CAS 2 Fond AP Equivalent *****
*****
***** PARAMETRES DE LA SOURCE *****
1          OPTION_S pour le type de terme source
50.00     Longueur de la source dans la direction d'ecoulement des eaux (m)
50.00     Largeur de la source dans la direction perpendiculaire (m)
1.00E+00  Concentration source (mg/l) pour OPTION_S = 1, 2 ou 3
0.00     Duree de la concentration constante (an) (OPTION_S = 2)
0.00E-00  Constante de degradation de la conc. source (1/an) (OPTION_S = 3)
0.00     Parametre CA (kg/m3 an-0.5) (OPTION_S = 4)
2.00E-09  Coefficient de diffusion du solute dans l'eau pure (m2/s)
***** PARAMETRES DE LA COUCHE *****
1.16E-09  Vitesse d'infiltration (Darcy) verticale (m/s)
26.00    Epaisseur (m)
0.25     Teneur en eau ( )
0.30     Tortuosite ( )
2.60E-01  Dispersivite (m)
1.00     Coefficient de retard ( )
0.00E+00  Constante de degradation (1/an)
***** PARAMETRES DE L'AQUIFERE *****
7.00E-05  Flux de Darcy en limite amont de la zone source (m/s)
7.00E-05  Flux de Darcy en limite aval de la zone source (m/s)
0.30     Porosite ( )
30.00    Epaisseur (m)
1.00E+00  Dispersivite en X (m)
1.00E-01  Dispersivite en Y (m)
1.00E-01  Dispersivite en Z (m)
0.30     Tortuosite ( )
0.00E-00  Cnte de degradation (1/an)
1.00     Facteur Retard ( )
***** PARAMETRES DE RESTITUTION *****
*** PARAMETRES pour la sortie des flux
0.10     Premier temps de calcul du flux (an)
4        Nombre de cycles log temps
10       Nombre de points par cycle log
*** PARAMETRES pour les concentrations dans la nappe
2        *** OPTION_A pour le type de concentration
          (1 : Concentrations a profondeur(s) ponctuelle(s))
          (2 : Concentrations moyennes sur un intervalle de profondeur)
0.00     Prof. par rapport a la nappe de la limite sup de l'intervalle (m)
10.00    Prof. par rapport a la nappe de la limite inf de l'intervalle (m)
10       Nombre de subdivisions de l'intervalle
2        *** OPTION_B pour le type de restitution
          (1 : Repartition spatiale a temps fixe)
0.00     Temps (an) pour le calcul
0.00     Premier point X des profils de concentration (m)
0        Nombre de cycle log
0        Nombre de points par cycle log
          (2 : Evolution dans le temps a point fixe)
100.00   Coordonnee X (m) du point
0.00     Coordonnee Y (m) du point
0.00     Coordonnee Z (m) du point
0.10     Premier temps de calcul (an)
4        Nombre de cycles log
10       Nombre de points par cycle log
1        *** OPTION_C pour la representation spatiale (si OPTION_B = 1)
          (1 : repartition spatiale en plan: profils en X a differents Y)
0.00     Valeur max de Y (m)
0.00     Increment de Y (m)
0.00     Valeur de Z (m) si OPTION_A = 1
          (2 : repartition spatiale en coupe: profils en X a differents Z)
0.00     Profondeur max (m)
0.00     Increment de profondeur (m) (zero si profondeur unique)
0.00     Valeur de Y (m)
1        *** OPTION_D pour un changement de repere (1: NON, 2: OUI)
0.00     Coordonnee Xs de l'origine du repere 1 dans le repere 2
0.00     Coordonnee Ys de l'origine du repere 1 dans le repere 2
0.00     Angle (degres) entre les axes des X des reperes 1 et 2
          (rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre)
*****

```



## CAS 3:

```

***** CAS 3 Flanc réglementaire *****
*****
***** PARAMETRES DE LA SOURCE *****
1          OPTION_S pour le type de terme source
50.00     Longueur de la source dans la direction d'écoulement des eaux (m)
50.00     Largeur de la source dans la direction perpendiculaire (m)
1.00E+00  Concentration source (mg/l) pour OPTION_S = 1, 2 ou 3
0.00     Durée de la concentration constante (an) (OPTION_S = 2)
0.00E-00 Constante de dégradation de la conc. source (1/an) (OPTION_S = 3)
0.00     Paramètre CA (kg/m3 an-0.5) (OPTION_S = 4)
2.00E-09 Coefficient de diffusion du solute dans l'eau pure (m2/s)
***** PARAMETRES DE LA COUCHE *****
1.01E-09  Vitesse d'infiltration (Darcy) verticale (m/s)
28.00    Epaisseur (m)
0.25     Teneur en eau ( )
0.30     Tortuosité ( )
2.80E-01 Dispersivité (m)
1.00     Coefficient de retard ( )
0.00E+00 Constante de dégradation (1/an)
***** PARAMETRES DE L'AQUIFERE *****
7.00E-05 Flux de Darcy en limite amont de la zone source (m/s)
7.00E-05 Flux de Darcy en limite aval de la zone source (m/s)
0.30     Porosité ( )
30.00    Epaisseur (m)
1.00E+00 Dispersivité en X (m)
1.00E-01 Dispersivité en Y (m)
1.00E-01 Dispersivité en Z (m)
0.30     Tortuosité ( )
0.00E-00 Cnté de dégradation (1/an)
1.00     Facteur Retard ( )
***** PARAMETRES DE RESTITUTION *****
*** PARAMETRES pour la sortie des flux
0.10     Premier temps de calcul du flux (an)
4        Nombre de cycles log temps
10       Nombre de points par cycle log
*** PARAMETRES pour les concentrations dans la nappe
2        *** OPTION_A pour le type de concentration
(1 : Concentrations a profondeur(s) ponctuelle(s))
(2 : Concentrations moyennes sur un intervalle de profondeur)
0.00     Prof. par rapport a la nappe de la limite sup de l'intervalle (m)
10.00    Prof. par rapport a la nappe de la limite inf de l'intervalle (m)
10       Nombre de subdivisions de l'intervalle
2        *** OPTION_B pour le type de restitution
(1 : Repartition spatiale a temps fixe)
0.00     Temps (an) pour le calcul
0.00     Premier point X des profils de concentration (m)
0        Nombre de cycle log
0        Nombre de points par cycle log
(2 : Evolution dans le temps a point fixe)
100.00   Coordonnée X (m) du point
0.00     Coordonnée Y (m) du point
0.00     Coordonnée Z (m) du point
0.10     Premier temps de calcul (an)
4        Nombre de cycles log
10       Nombre de points par cycle log
1        *** OPTION_C pour la representation spatiale (si OPTION_B = 1)
(1 : repartition spatiale en plan: profils en X a differents Y)
0.00     Valeur max de Y (m)
0.00     Increment de Y (m)
0.00     Valeur de Z (m) si OPTION_A = 1
(2 : repartition spatiale en coupe: profils en X a differents Z)
0.00     Profondeur max (m)
0.00     Increment de profondeur (m) (zero si profondeur unique)
0.00     Valeur de Y (m)
1        *** OPTION_D pour un changement de repere (1: NON, 2: OUI)
0.00     Coordonnée Xs de l'origine du repere 1 dans le repere 2
0.00     Coordonnée Ys de l'origine du repere 1 dans le repere 2
0.00     Angle (degrés) entre les axes des X des reperes 1 et 2
(rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre)
*****

```



## CAS 4 :

```

***** CAS 3 Flanc AP equivalent *****
*****
***** PARAMETRES DE LA SOURCE *****
1          OPTION_S pour le type de terme source
50.00     Longueur de la source dans la direction d'ecoulement des eaux (m)
50.00     Largeur de la source dans la direction perpendiculaire (m)
1.00E+00  Concentration source (mg/l) pour OPTION_S = 1, 2 ou 3
0.00     Duree de la concentration constante (an) (OPTION_S = 2)
0.00E-00  Constante de degradation de la conc. source (1/an) (OPTION_S = 3)
0.00     Parametre CA (kg/m3 an-0.5) (OPTION_S = 4)
2.00E-09  Coefficient de diffusion du solute dans l'eau pure (m2/s)
***** PARAMETRES DE LA COUCHE *****
1.05E-10  Vitesse d'infiltration (Darcy) verticale (m/s)
28.00     Epaisseur (m)
0.25     Teneur en eau ( )
0.30     Tortuosite ( )
2.80E-01  Dispersivite (m)
1.00     Coefficient de retard ( )
0.00E+00  Constante de degradation (1/an)
***** PARAMETRES DE L'AQUIFERE *****
7.00E-05  Flux de Darcy en limite amont de la zone source (m/s)
7.00E-05  Flux de Darcy en limite aval de la zone source (m/s)
0.30     Porosite ( )
30.00     Epaisseur (m)
1.00E+00  Dispersivite en X (m)
1.00E-01  Dispersivite en Y (m)
1.00E-01  Dispersivite en Z (m)
0.30     Tortuosite ( )
0.00E-00  Cnte de degradation (1/an)
1.00     Facteur Retard ( )
***** PARAMETRES DE RESTITUTION *****
*** PARAMETRES pour la sortie des flux
0.10     Premier temps de calcul du flux (an)
4        Nombre de cycles log temps
10       Nombre de points par cycle log
*** PARAMETRES pour les concentrations dans la nappe
2        *** OPTION_A pour le type de concentration
         (1 : Concentrations a profondeur(s) ponctuelle(s))
         (2 : Concentrations moyennes sur un intervalle de profondeur)
0.00     Prof. par rapport a la nappe de la limite sup de l'intervalle (m)
10.00    Prof. par rapport a la nappe de la limite inf de l'intervalle (m)
10       Nombre de subdivisions de l'intervalle
2        *** OPTION_B pour le type de restitution
         (1 : Repartition spatiale a temps fixe)
0.00     Temps (an) pour le calcul
0.00     Premier point X des profils de concentration (m)
0        Nombre de cycle log
0        Nombre de points par cycle log
         (2 : Evolution dans le temps a point fixe)
100.00   Coordonnee X (m) du point
0.00     Coordonnee Y (m) du point
0.00     Coordonnee Z (m) du point
0.10     Premier temps de calcul (an)
4        Nombre de cycles log
10       Nombre de points par cycle log
1        *** OPTION_C pour la representation spatiale (si OPTION_B = 1)
         (1 : repartition spatiale en plan: profils en X a differents Y)
0.00     Valeur max de Y (m)
0.00     Increment de Y (m)
0.00     Valeur de Z (m) si OPTION_A = 1
         (2 : repartition spatiale en coupe: profils en X a differents Z)
0.00     Profondeur max (m)
0.00     Increment de profondeur (m) (zero si profondeur unique)
0.00     Valeur de Y (m)
1        *** OPTION_D pour un changement de repere (1: NON, 2: OUI)
0.00     Coordonnee Xs de l'origine du repere 1 dans le repere 2
0.00     Coordonnee Ys de l'origine du repere 1 dans le repere 2
0.00     Angle (degres) entre les axes des X des reperes 1 et 2
         (rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre)
*****

```

