



GROUPE LHOTELLIER IKOS ENVIRONNEMENT

Centre de Valorisation de Déchets de
La Ramonière à BIMONT (62)

Dossier n° 8 : Etudes techniques - Etude d'équivalence de la barrière passive

Rapport

Réf : CDMCNO160924 / RDMNO01167-02

GHA / AC





04/11/2016



GROUPE LHOTELLIER IKOS ENVIRONNEMENT

Centre de Valorisation de Déchets de La Ramonière à BIMONT (62)

Dossier n 8 : Etudes techniques - Etude d'équivalence de la barrière passive

Objet de l'indice	Date	Indice	Rédaction		Vérification		Validation	
			Nom	Signature	Nom	Signature	Nom	Signature
Rapport	04/11/2016	00	G. HANIN		A. CHEREL		A. CHEREL	
Reprise suite aux remarques d'IKOS	21/10/2016	01	G. HANIN					
V2-modifications client	04/11/2016	02	S.HAMADANI					

Numéro de contrat / de rapport :	Réf : CDMCNO160924 / RDMNO01167-02
Numéro d'affaire :	A19695
Domaine technique :	SD02
Mots clé du thésaurus	EQUIVALENCE CENTRE DE STOCKAGE HYDROGEOLOGIE

Agence Nord-Ouest – 5, chemin des Filatiers -
62223 Sainte-Catherine-Les-Arras
Tél : 03.21.24.38.00 - Fax : 03.21.24.38.09
agence.arras@burgeap.fr

SOMMAIRE

1.	Objectif et contexte de l'étude	5
2.	Présentation du site et du projet.....	6
2.1	Site d'étude.....	6
2.2	Projet	7
3.	Réglementation applicable au projet	8
4.	Synthèse de la caractérisation du milieu géologique et hydrogéologique	10
4.1	Contexte géologique.....	10
4.1.1	Contexte régional	10
4.1.2	Contexte local	14
4.2	Contexte hydrogéologique	18
4.2.1	L'aquifère de la craie.....	18
4.2.2	La nappe de la craie	19
4.2.3	La qualité de la nappe.....	19
4.3	Contexte hydrologique	21
5.	Inventaire des cibles potentielles	22
5.1	Inventaire des captages d'eau potable	22
5.2	Inventaire des puits.....	23
5.3	Non vulnérabilité de la ressource captée	24
6.	Schéma conceptuel	26
7.	Dispositif de barrière passive proposé	28
7.1	Structure de la barrière passive sur le fond	28
7.2	Structure de la barrière passive sur les flancs.....	28
8.	Aptitude des matériaux	30
8.1	Choix des limons	30
8.1.1	Planches d'essais.....	30
8.1.2	Perméabilité du limon traité à 2%	30
8.2	Choix des argiles marneuses	31
8.2.1	Planche d'essais	31
8.2.2	Perméabilité des argiles mises en œuvre sur le fond	31
8.2.3	Perméabilité des argiles sur les flancs.....	31
8.3	GéoSynthétique Bentonitique (GSB)	31
9.	Prescriptions de mise en œuvre de la barrière passive.....	32
9.1	Mise en œuvre de la couche de limons	32
9.2	Mise en œuvre de la couche d'argile sur le fond	32
9.3	Mise en œuvre d'argile sur les flancs.....	32
9.4	Mise en place du GSB	32
9.4.1	Stockage des matériaux	32
9.4.2	Mise en œuvre	33

10. Programme de contrôle de mise en œuvre	35
11. Evaluation des effets à long terme	36
12. Evaluation de l'impact quantitatif potentiel du projet sur les eaux souterraines	37
12.1 Hypothèses retenues	37
12.2 Scenario 1 : barrière passive réglementaire.....	38
12.3 Scenario 2 : barrière passive équivalente.....	39
12.4 Synthèse	41
12.5 Cas des flancs	41
13. Conclusion.....	42

FIGURES

Figure 1 : Localisation du site d'étude sur fond IGN au 1/25 000	6
Figure 2 : Plan masse du projet	7
Figure 3 : Coupe tectonique (J. Beckelynck, 1981)	11
Figure 4 : Extrait de la carte géologique de Fruges au 1/50000 et localisation des coupes géologiques et hydrogéologiques	12
Figure 5 : Coupe géologique schématique Nord / Sud (source : DDAE 2012)	13
Figure 6 : Localisation des différents sondages réalisés au droit du site	15
Figure 7 : Coupes géologiques du site (Source : DDAE de 2012).....	16
Figure 8 : Localisation du réseau de surveillance des eaux souterraines au droit du site	18
Figure 9 : Carte piézométrique au droit du site en période de très hautes eaux (février 2014) et en période de très basses eaux (septembre 2010).....	20
Figure 10 : Carte de localisation des périmètres de protection des captages AEP dans un rayon de 3 km autour du site (Source : ARS).....	23
Figure 11 : Localisation des puits à proximité du site d'étude (Source : Infoterre).....	24
Figure 12 : Coupes hydrogéologiques (Source : DDAE 2012)	25
Figure 13 : Schéma conceptuel du transfert vertical et de détail de la barrière passive	27
Figure 14 : Coupe schématique de la barrière passive au niveau des flancs	29

TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des captages AEP à proximité du site (Source : ARS)	22
Tableau 2 : Recensement des points BSS eau à proximité du site (Source : Infoterre)	23
Tableau 3 : Scenario 1 – épaisseur des matériaux au droit des casiers (hors barrière active)	38
Tableau 4 : Scenario 2 – épaisseur des matériaux au droit des casiers (hors barrière active)	39
Tableau 5 : Synthèse des calculs de rapports de concentration	41

1. Objectif et contexte de l'étude

Le projet d'extension d'IKOS ENVIRONNEMENT prévoit la création de plusieurs nouveaux casiers de stockage de déchets non dangereux :

- ISDND 1 : nouveau casier 7 en rehausse ;
- ISDND 2 : nouveaux casiers 8 à 17 en extension sur la partie centrale du site ;
- ISDND 3 : nouveaux casiers 18 à 23 en extension sur la partie est du site ;
- nouveaux casiers déchet plâtre P1 et P2 sur la partie ouest du site.

L'étude géologique et hydrogéologique réalisée au droit du site, basée sur 3 campagnes d'investigations réalisées entre 1999 et 2016, a mis en évidence l'absence de la barrière passive naturelle au droit des zones de stockage prévues :

- pour la couche de 5 m d'épaisseur de perméabilité ou égale à 1.10^{-6} m/s,
- pour la couche de 1 m d'épaisseur de perméabilité ou égale à 1.10^{-9} m/s.

Il est donc proposé par IKOS ENVIRONNEMENT la mise en place d'une barrière passive équivalente constituée d'une couche d'argile compactée et de matériaux locaux traités à la bentonite, pour les nouveaux casiers des ISDND 2 et 3.

Une étude de l'équivalence de l'étanchéité de cette barrière doit donc être réalisée afin de vérifier sa compatibilité avec l'article 8 de l'arrêté du 15 février 2016, ce qui est l'objet du présent dossier.

Remarque : ne sont pas concernés par la présente étude,

- le casier 7 en rehausse sur l'ISDND 1, qui ne sera pas pourvu de barrière passive ni active du fait de la présence de ces barrières de protection au niveau du casier sous-jacent, qui ne sera pas séparé hydrauliquement du nouveau casier en rehausse ;
- les nouveaux casiers mono-déchet plâtre, qui fait par ailleurs l'objet d'une évaluation des risques pour l'environnement visant à assouplir les modalités de constitution de sa barrière passive, conformément aux dispositions de l'article 41 de l'AM du 15 février 2016.

2. Présentation du site et du projet

2.1 Site d'étude

Le site IKOS ENVIRONNEMENT est implanté au Lieu-dit « La Ramonière », au Nord- Est de la commune de BIMONT, dans le Pas-de-Calais (62).

BIMONT est une commune rurale située à 13 km au Nord-Est de MONTREUIL. Elle fait partie du Canton d'HUCQUELIERS.

Le site est localisé entre la RD 152, qui relie BIMONT à CLENLEU, à l'Ouest, et la RD 343, qui relie HUCQUELIERS à FRUGES, à l'Est. Le site se trouve à l'emplacement de l'ancienne ferme de la Ramonière, dont la maison d'habitation a été réhabilitée en bureaux.

La carte IGN au 1/25 000 de BIMONT, présentée ci-après, permet de visualiser le site dans son environnement (**Figure 1**).

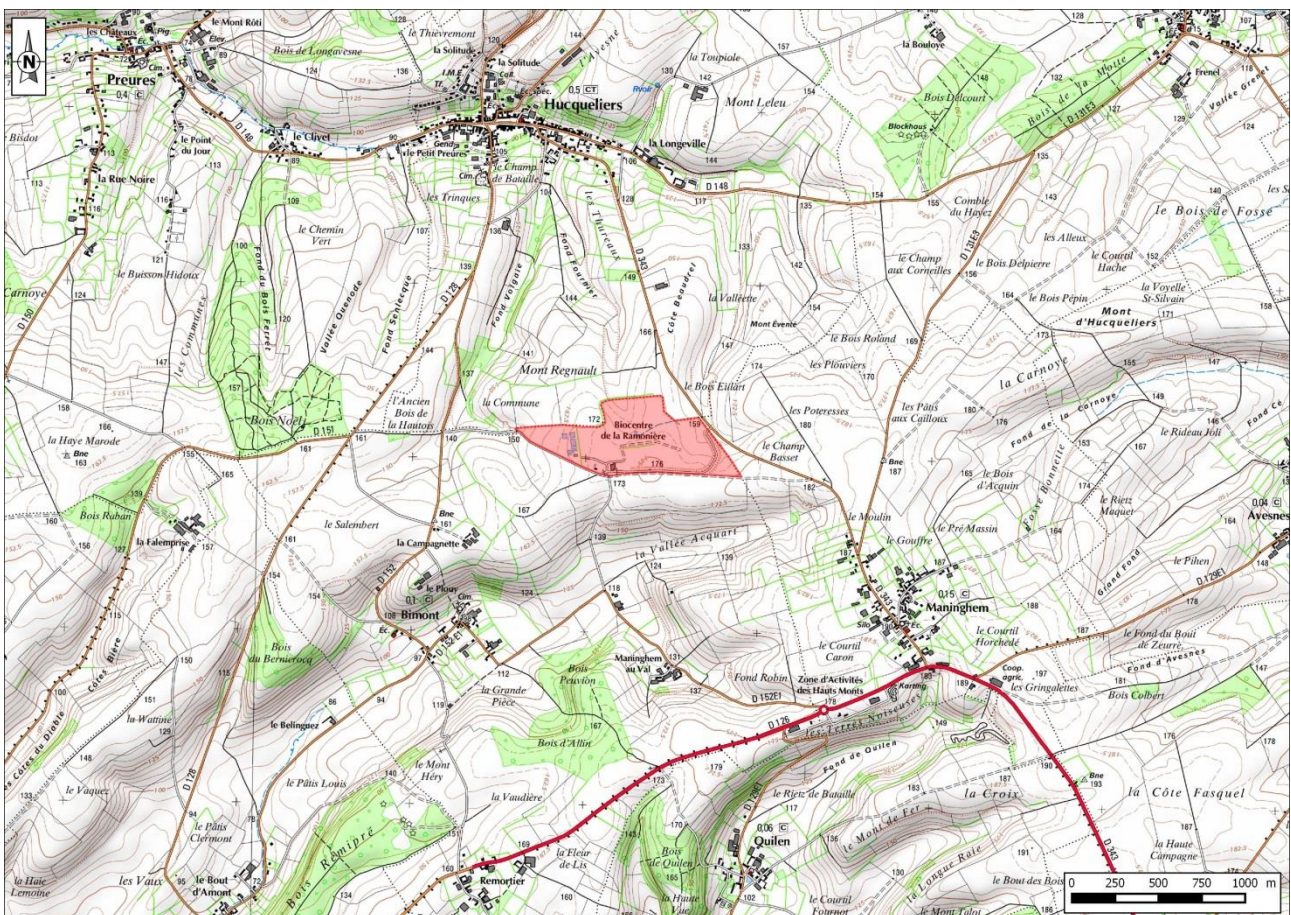


Figure 1 : Localisation du site d'étude sur fond IGN au 1/25 000

2.2 Projet

Afin de pérenniser le CVD de Bimont et ainsi conserver une place essentielle au sein du département, IKOS ENVIRONNEMENT projette de :

- **pérenniser l'activité principale ISDND :**

- sur la zone ISDND 2 de superficie de 58 500 m² (10 casiers de 90 000 tonnes unitaires) pour un vide de fouille estimé à 900 000 m³ ou 900 000 tonnes ;
- sur la zone ISDND 3 de superficie de 37 000 m² (6 casiers de 90 000 tonnes unitaires) pour un vide de fouille estimé à 540 000 m³ ou 540 000 tonnes ;
- sur la zone ISDND 1 via la rehausse du casier 7 dont le vide de fouille est estimé à 37 000 m³ ou 37 000 tonnes ;

- **développer d'autres activités de traitement et de valorisation avec notamment :**

- une plateforme de compostage d'une capacité de 3 000 tonnes/an dont l'objectif est d'anticiper le futur besoin des collectivités inhérent au développement de la gestion séparée des biodéchets à la source ;
- une Installation de Stockage de Déchets de plâtre d'une capacité annuelle projetée de 5 000 tonnes, destinée au traitement séparé desdits déchets, à l'origine en ISDND, de la production d'H₂S et in fine de nuisances olfactives.

Les nouvelles zones (**ISDND 2 et ISDND 3**) ont été dimensionnées selon les caractéristiques suivantes :

- durée d'exploitation : 24 ans,
- tonnage annuel entrant estimé : 60 000 tonnes,
- capacité de stockage : 900 000 m³ pour ISDND 2 et 540 000 m³ pour ISDND 3, soit 1 440 000 m³,
- nombre de casiers : 16.

Figure 2 : Plan masse du projet



Département du Pas-de-Calais
Commune de Bimont

DOSSIER :
DDAE2016_PD

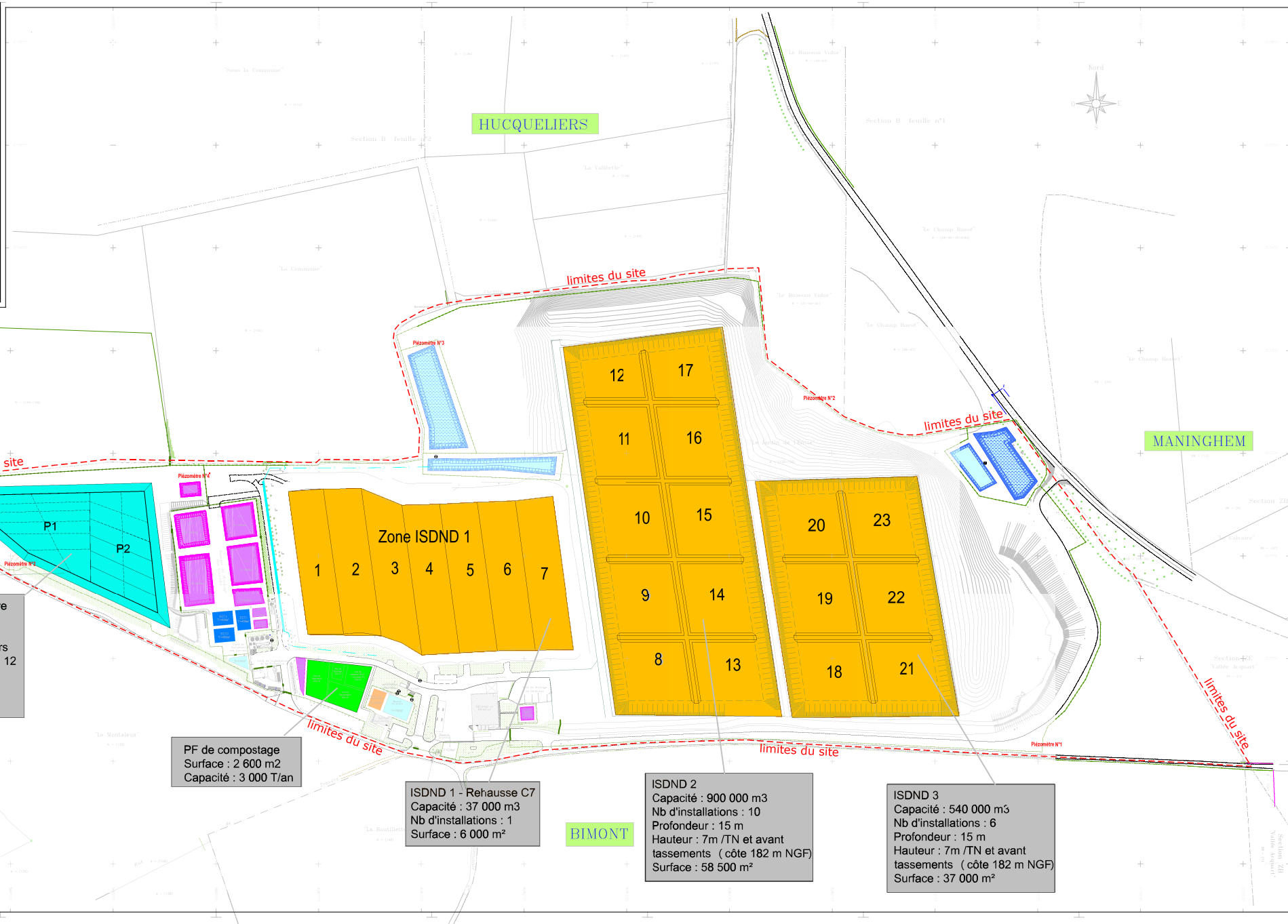
Centre de valorisation des déchets
Plan Projet DDAE 2016

ECHELLE :
1/1000

DATE	INDIC	OBJET / MODIFICATIONS	Établi par
12/02/2016	O	Plan de masse - Octobre 2016	P.D
	A		
	B		
	C		
	D		

Maire d'Charge:	Maire d'Charge:	Autres:

IKOS
ENVIRONNEMENT



ISDND Monodéchets Plâtre
Volume utile : 180 000 m3
Capacité : 125 000 T
Nb d'installations : 2 casiers
Nb d'alvéoles par casiers : 12
Profondeur : 6 m
Hauteur : 5m /TN
Surface : 16 500 m2

PF de compostage
Surface : 2 600 m2
Capacité : 3 000 T/an

ISDND 1 - Rehausse C7
Capacité : 37 000 m3
Nb d'installations : 1
Surface : 6 000 m²

ISDND 2
Capacité : 900 000 m3
Nb d'installations : 10
Profondeur : 15 m
Hauteur : 7m /TN et avant tassements (côte 182 m NGF)
Surface : 58 500 m²

ISDND 3
Capacité : 540 000 m3
Nb d'installations : 6
Profondeur : 15 m
Hauteur : 7m /TN et avant tassements (côte 182 m NGF)
Surface : 37 000 m²

3. Réglementation applicable au projet

Le projet s'inscrit dans un cadre réglementaire général défini par l'arrêté ministériel du **15 février 2016** relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux. Ce texte réglementaire fixe des objectifs et des prescriptions concernant le choix du site, ses aménagements, son exploitation, la fin de son exploitation et sa couverture, sa gestion à long terme et la mise en conformité des installations existantes.

L'arrêté ministériel précise dans son article 8 que « *La protection du sol, des eaux souterraines et de surface est assurée par une barrière géologique dite «barrière de sécurité passive» constituée du terrain naturel en l'état répondant aux critères suivants :*

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

Il est également précisé que « *lorsque la barrière géologique ne répond pas naturellement aux conditions précitées, elle est complétée artificiellement et renforcée par d'autres moyens présentant une protection équivalente. L'épaisseur de la barrière ainsi reconstituée ne doit pas être inférieure à 1 mètre pour le fond de forme et à 0,5 mètre pour les flancs jusqu'à une hauteur de deux mètres par rapport au fond* » (**arrêté ministériel**) car la sécurité passive repose sur l'épaisseur de la formation (**guide de recommandation**).

Le dimensionnement de ce système équivalent est justifié par une étude d'équivalence.

La notion d'équivalence en étanchéité passive apparaît dans les différents textes réglementaires régissant les stockages de déchets. L'évaluation de l'équivalence a fait l'objet d'un guide de recommandations édité par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire « Guide de recommandations pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets », MEEDDAT, version 2, février 2009.

La notion d'équivalence en barrière passive de casier de stockage est définie sur la base d'un impact potentiel équivalent sur une ressource en eau souterraine. Le complexe d'étanchéité passive est considéré comme étant équivalent lorsqu'il assure un même niveau de protection que la barrière passive type en terme d'impact potentiel sur une ressource en eau souterraine.

Il s'agira par conséquent dans le cas présent d'évaluer et de justifier une barrière passive « équivalente » considérant les caractéristiques de la barrière passive projetée.

L'étude d'équivalence vient en complément du DDAE (dossier de demande d'autorisation d'exploiter) afin de répondre point par point aux éléments demandés dans le « Guide de recommandations pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets », version 2 de février 2009, notamment :

- la synthèse de la caractérisation du milieu géologique et hydrogéologique présentant clairement les informations disponibles concernant la piézométrie des nappes d'eau présentes au droit du site et dans le voisinage du projet ;
- l'inventaire des cibles potentielles ;
- le schéma conceptuel du site ;
- la description du projet de dispositif de barrière passive présentant la ou les options équivalentes proposées ;
- la démonstration de l'aptitude du matériau à être utilisé comme composante d'une barrière reconstituée (caractéristiques physiques, chimiques, géotechniques, perméabilité, ...) ;
- les prescriptions de mise en œuvre du matériau ;
- la proposition d'un programme de contrôle de mise en œuvre interne, externe et extérieur ;

- l'évaluation qualitative des effets à long terme de la barrière ;
- les éléments du site pouvant être favorables d'un point de vue de l'équivalence de l'impact potentiel ;
- l'évaluation semi-quantitative de l'impact potentiel sur les eaux souterraines au droit du site, pour la configuration de la barrière proposée et pour la barrière réglementaire.

4. Synthèse de la caractérisation du milieu géologique et hydrogéologique

Le **contexte géologique** doit permettre de justifier la conformité des couches géologiques constituant la barrière passive réglementaire (5 m à $k \leq 1. 10^{-6}$ m/s et 1 m à $k \leq 1. 10^{-9}$ m/s). Ce contexte a été défini aux trois échelles d'investigation, telles que définies par le Guide de Bonnes Pratiques de l'AFNOR X30-438 : le site dans son entier, pour sa qualification, celle du projet (à l'intérieur du site), pour sa faisabilité et celle de la barrière passive pour son étude d'équivalence.

Le **contexte hydrogéologique** doit permettre de caractériser les aquifères en présence (nature, épaisseur, extension et transmissivité) et la nappe qu'il contient (niveau statique, débit, qualité).

4.1 Contexte géologique

Il est important de noter que la présente étude s'appuie et met à jour l'étude d'aptitude régionale et de faisabilité intégrée dans le DDAE précédent rédigé par le bureau d'étude KALIES et déposé en préfecture le 11 décembre 2012 et que cette précédente étude avait fait l'objet avant son dépôt en préfecture et sa recevabilité :

- d'une analyse critique hydrogéologique réalisée par M. MOUTHIER - hydrogéologue agréé (Analyse hydrogéologique documentaire - octobre 2012) ;
- d'une tierce expertise demandée par la préfecture et réalisée par le BRGM dans le cadre de sa mission d'appui technique aux administrations (rapport RP-62031-FR de février 2013 – document à accès différé).

4.1.1 Contexte régional

A l'échelle régionale, la zone étudiée est implantée sur les terrains du Crétacé qui constituent le flanc sud de l'anticlinal de l'Artois, dont la coupe géologique ci-dessous, illustre la présence de failles longitudinales décalant des compartiments en horsts et grabens, dont celui de Fruges (**Figure 3**).

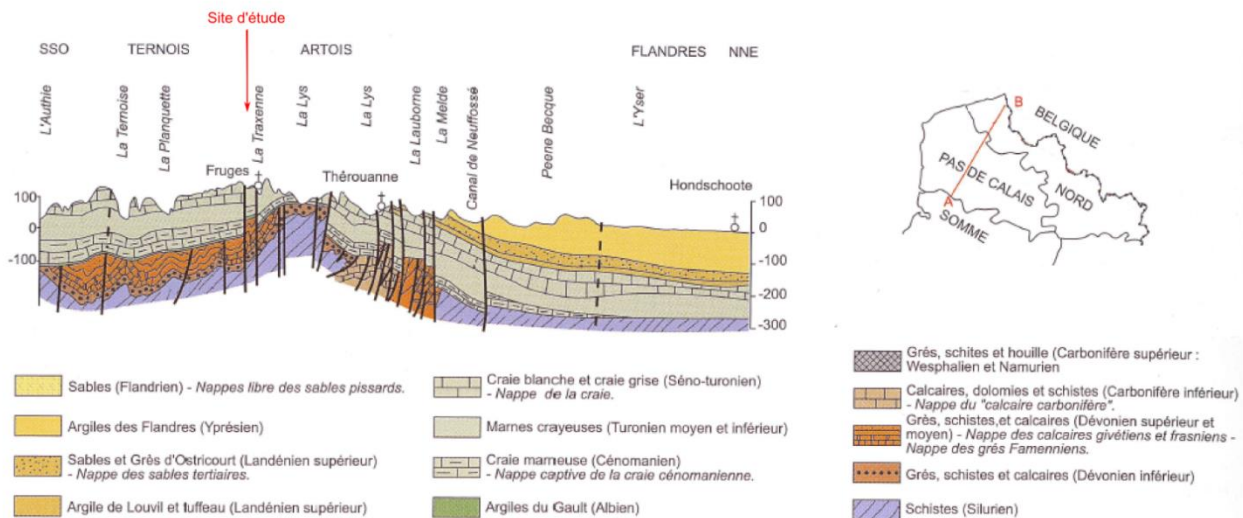


Figure 3 : Coupe tectonique (J. Beckelynck, 1981)

Ce bombement anticlinal est caractérisé par une succession de failles longitudinales et conjuguées transverses, qui correspondent au rejeu post-Crétacé jusqu'à l'actuel de failles hercyniennes. Ces rejeux successifs expliquent les corrélations qu'on observe entre les directions des fractures et celles des vallées empruntées par le réseau hydrographique.

La série stratigraphique correspondant à celle du site, décrite dans la notice de la carte géologique [5], montre la succession du haut en bas :

- Les limons des Plateaux (LP) du Quaternaire, d'épaisseur variable de 0 à 5 m, voire plus, localement ;
- Les argiles à silex rouges au sommet, brunes à la base, passant à grises au contact de la craie, riches en silex, localement sableuses, d'épaisseur variable (0 à 5m, voire plus localement, disposées en couverture d'éluvions, parfois d'alluvions à silex roulés, parfois en remplissage de structures d'érosion de la craie ;
- La craie du Turonien de 60 à 80 m d'épaisseur, qu'on peut découper en 3 unités : le Turonien supérieur (C3c) formé de craie blanc-gris pauvre en silex, d'épaisseur comprise entre 15 et 20 m, le Turonien moyen (C3b) formé de craie marneuse gris bleu de 35 m, enfin le Turonien inférieur (C3a) de 25 m d'épaisseur, constitué de marnes crayeuses vertes (« dièves ») ;
- La craie blanc-gris du Cénomanien (C2) qui forme avec le Turonien moyen la formation aquifère de la région.

Ces couches sont en disposition monoclinale légèrement pentées vers le sud-ouest. La carte géologique ne présente pas de failles cartographiées, mais on sait que la craie est fissurée et localement fracturée, notamment dans les vallées empruntées par les cours d'eau, le long des failles longitudinales Ouest-nord ouest / Est-sud est et transverses nord-est sud-ouest.

Cette tectonique s'accompagne également de mouvements verticaux des compartiments décalés en horsts et grabens.

► Dossier n 8 : Etudes techniques - Etude d'équivalence de la barrière passive
 Synthèse de la caractérisation du milieu géologique et hydrogéologique

Il en résulte de forts dénivellés de plusieurs dizaines de mètres (jusqu'à 80 m aux environs du site) entre le sommet des plateaux crayeux (+ 170 m NGF) et les vallées du Ru des Baillons au nord du site et de la Bimoise au sud.

L'examen de la carte géologique montre que la craie du Coniacien (C5-4) affleure au nord de Hucqueliers. Elle n'affleure pas au sud de cette ville. Par ailleurs, le Turonien supérieur (C3c) affleure dans les vallées sèches qui recoupent le plateau portant le site étudié, mais n'affleure pas sur le flanc nord de la vallée de Bimont (contrairement au flanc sud), ce qui indique une dissymétrie dans la structure monoclinale avec un pendage inverse (vers le nord) du compartiment portant le site.

La coupe géologique à l'échelle locale, tracée selon un profil nord-sud passant par l'ISDND, illustre la structure tectonique en horsts et grabens, qui affecte le flanc sud de l'anticlinal de l'Artois (**Figure 4 et 5**).

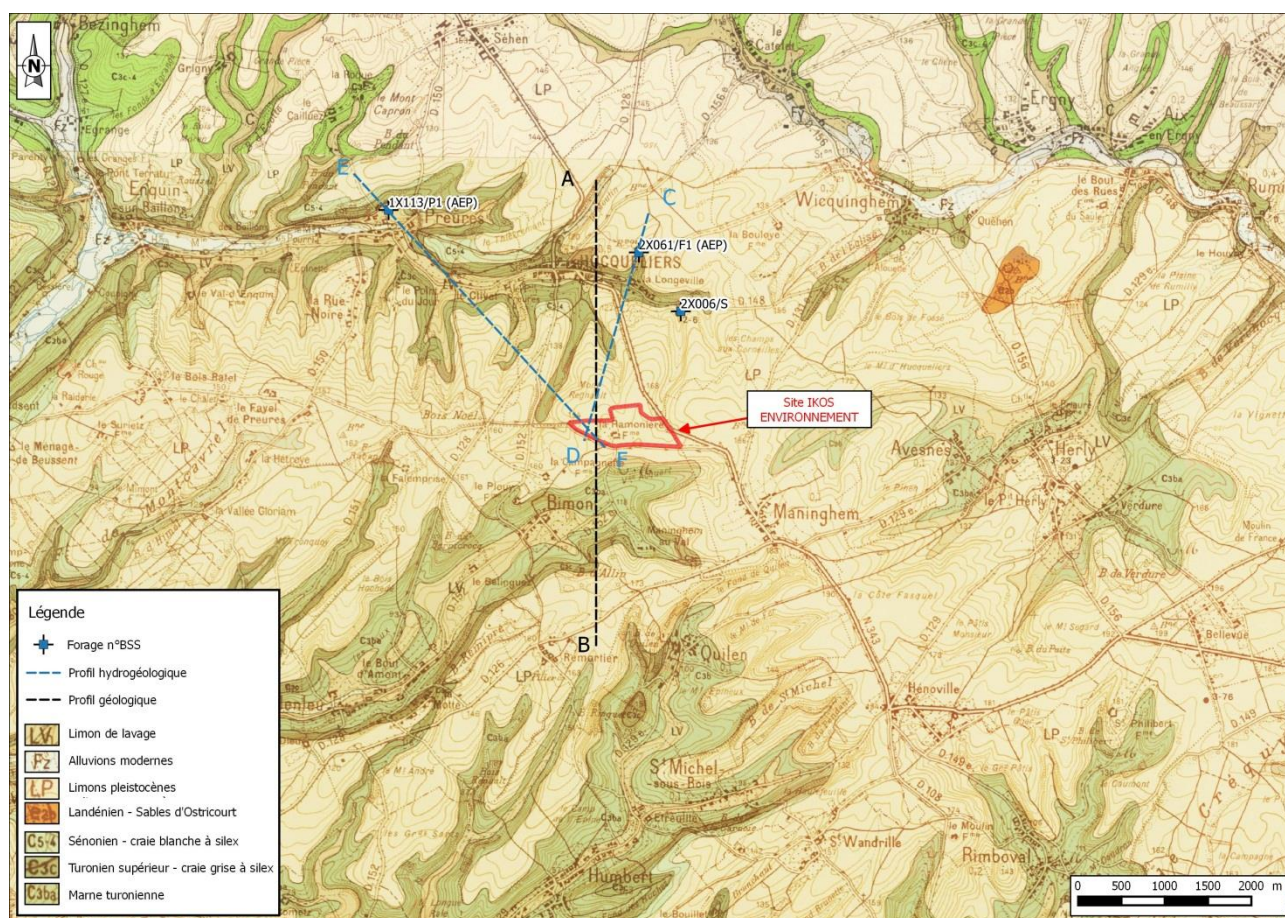


Figure 4 : Extrait de la carte géologique de Fruges au 1/50000 et localisation des coupes géologiques et hydrogéologiques

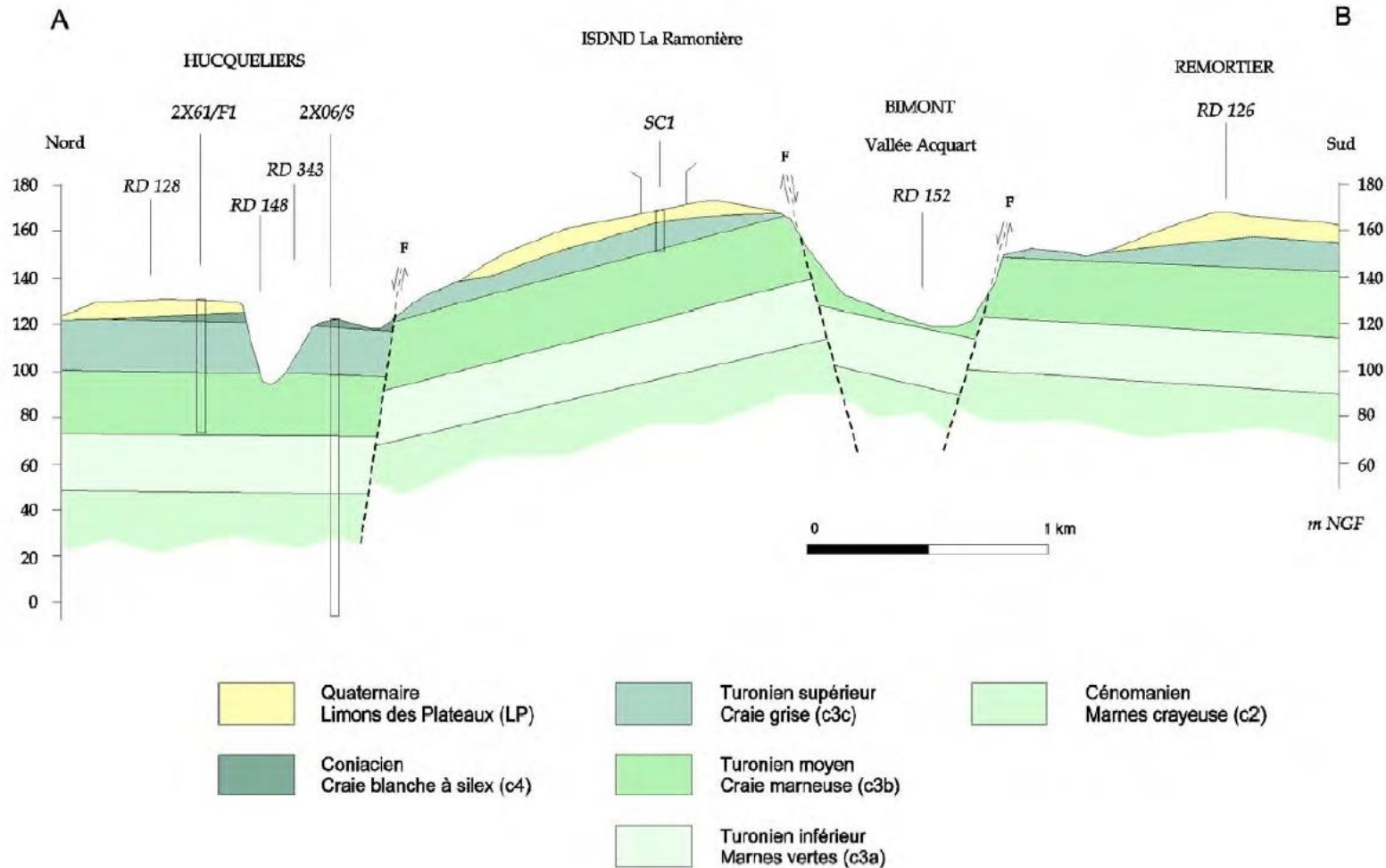


Figure 5 : Coupe géologique schématique Nord / Sud (source : DDAE 2012)

4.1.2 Contexte local

4.1.2.1 Reconnaissance du site par sondages

De nombreux sondages géologiques ont été réalisés dans le cadre de la qualification générale du site, donnant une vision assez précise de la géologie sous l'ISDND (**Figure 6**) :

- 9 sondages à la pelle mécanique par IKOS ENVIRONNEMENT, jusqu'à une profondeur de 4,80 m ;
- 4 sondages à la pelle mécanique par BURGEAP, jusqu'à 6 m ;
- 16 sondages à la tarière par EUROFORAGE, jusqu'au toit de la craie ;
- 3 sondages en rotation-injection et à la tarière par PONTIGNAC, jusqu'à 13 m, réalisés à proximité de 3 des 16 forages précédents ;
- 9 sondages carottés par PONTIGNAC, à des profondeurs de 22,50 à 30 m, dont les sondages SC1 et S4 qui sont les plus proches de l'ISDND.
- 2 sondages à la tarière par PONTIGNAC, à des profondeurs de 10,5 à 20m.

Ces sondages ont permis d'identifier les 3 formations présentes sur le site, du sommet à la base :

- sous la terre végétale, les limons bruns d'environ 2 m d'épaisseur, pouvant atteindre 7 m sur l'ISDND ;
- les argiles à silex rouges, puis brunes, puis gris-vert, au contact de la craie d'une épaisseur variable comprise entre 0 et 9,50 m ;
- la craie blanche tendre à rares silex, fissurée, rencontrée à une profondeur variable comprise entre 2,50 et 13 m. C'est une formation homogène sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur.

La texture des limons est remarquablement fine et homogène sur de grandes épaisseurs. Ces matériaux qui sont des silts légèrement argileux, ont des qualités mécaniques qui se prêtent très bien à un traitement pour les aménagements de l'ISDND (notamment pour le renforcement de la barrière passive).

La texture des argiles à silex est grossière et hétérogène. Malgré leurs caractères argileux, la présence de poches sableuses et l'abondance de caillasses de silex les rendent impropres à un usage de couche peu perméable pour la barrière passive. Elles trouvent un usage en génie civil pour la construction de digues et des voies de transport.

Le contact entre la craie, les argiles à silex et les limons est parfois oblique au droit des structures d'érosion et de chenalisation, qui donne à ce contact une allure en creux et bosses (**Figure 7**).

Pour caractériser ces structures, une reconnaissance géophysique à l'aide de 10 panneaux électriques a été réalisée en 2009 par EDG sur le site, mais à l'extérieur de l'ISDND. Les profils des panneaux électriques, interprétés en termes de données géophysiques, n'ont pas fait l'objet d'une valorisation géologique.

L'examen détaillé des sondages carottés montre que les fissures ne sont observées que sur la partie supérieure de la craie jusqu'à environ 4 à 6 m de hauteur. En profondeur, on note quelques diaclases fermées. Aucune fracture ouverte à hydroxydes de fer ou à remplissage d'argiles n'a été observée sur toute la hauteur des sondages carottés.

Le contact entre le Turonien supérieur et le Turonien moyen est observé sur les piézomètres Pz1, Pz2 et Pz3, à une profondeur voisine de 40 m, ce qui correspond à une altitude de +131 m NGF sous l'ISDND.

La base des piézomètres est arrêtée au contact des « dièves » (sommet du Turonien inférieur), à la cote + 98 m NGF.

La craie du Turonien est l'unique formation géologique de la barrière de sécurité passive de l'ISDND, homogène en grand, continue et développée sur près de 50 m d'épaisseur.

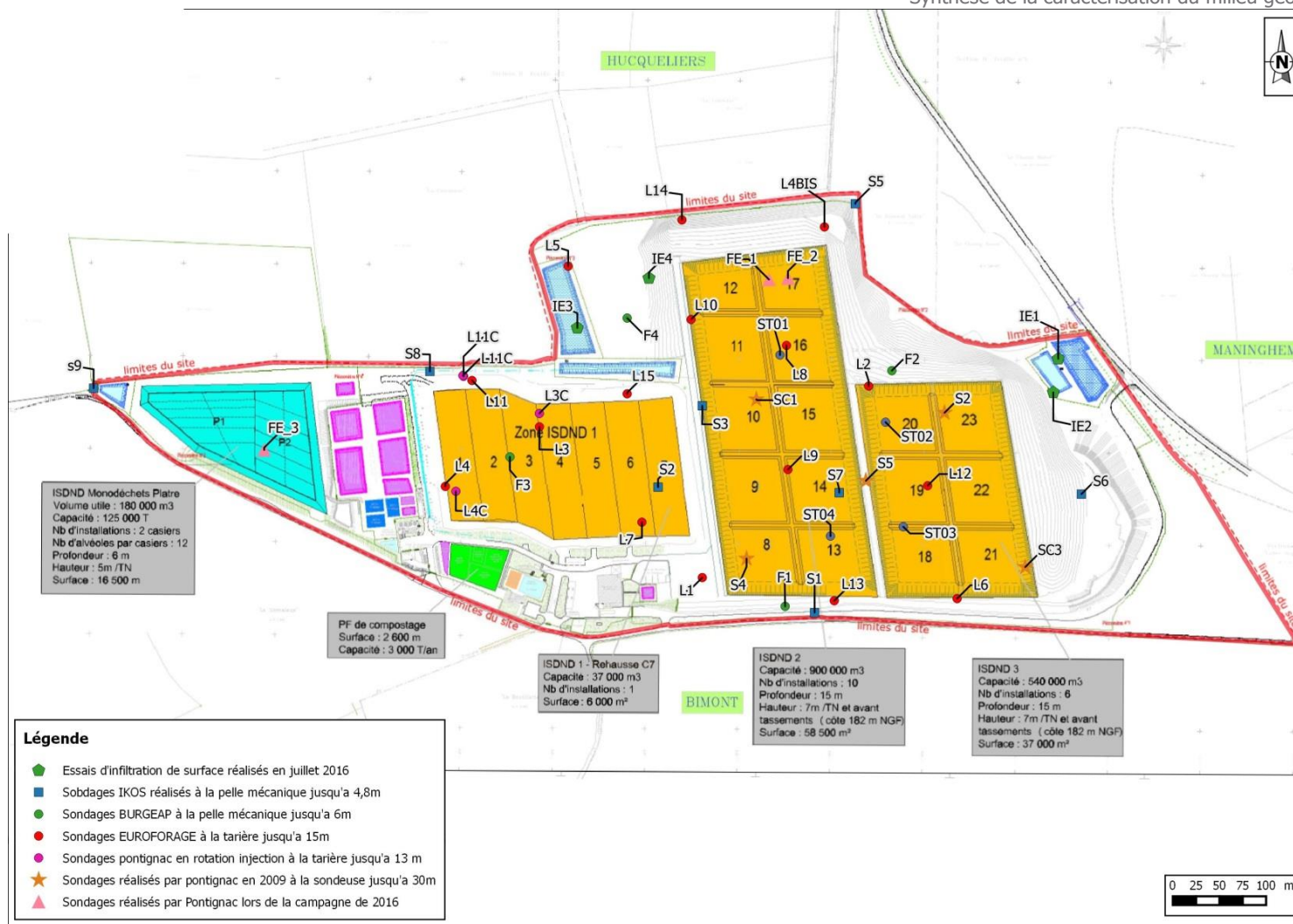


Figure 6 : Localisation des différents sondages réalisés au droit du site

COUPE GEOLOGIQUE DU SITE NORD/SUD

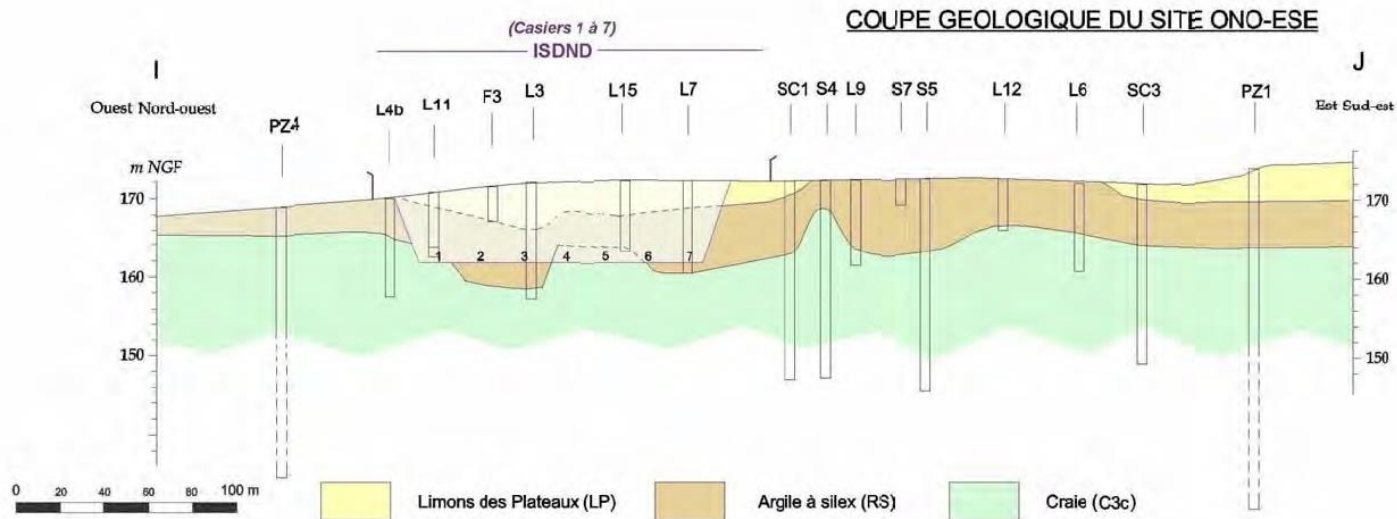
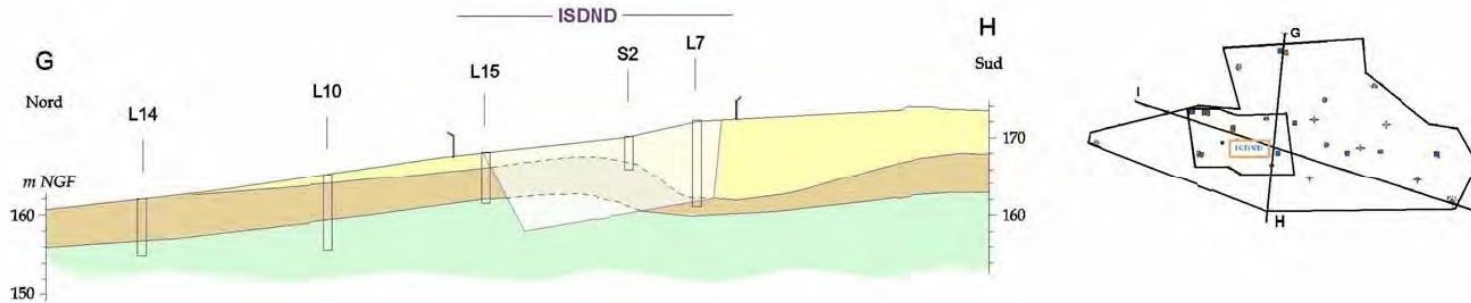


Figure 7 : Coupes géologiques du site (Source : DDAE de 2012)

4.1.2.2 Perméabilités

En 1999 et 2000, 35 essais de perméabilité du substratum naturel ont été réalisés, pour déterminer la faisabilité du projet, lors du premier programme de reconnaissance géologique :

- 8 essais d'infiltration au double anneau ouvert suivant la norme NF X30-418, pour tester les argiles à silex et le toit de la craie altérée ;
- 16 essais d'infiltration par choc hydraulique suivant la norme X30-423 dans des forages à la tarière jusqu'à 15 m, réalisés par PONTIGNAC ;
- 7 essais de perméabilité Lefranc, dont 5 essais dans la craie, au droit de l'ISDND ;
- 4 essais de perméabilité à charge variable réalisés en laboratoire.

En 2009, 40 essais de perméabilité Lefranc ont été réalisés par PONTIGNAC dans la craie entre 16 et 30 m de profondeur, dans le cadre du deuxième programme de reconnaissance géologique. L'objectif étant la craie, la norme NF P 94-132 a été choisie, car la perméabilité attendue est supérieure à 1.10^{-6} m/s.

Les trois formations géologiques du site ont été testées :

- les limons ont une perméabilité comprise entre $2,4.10^{-5}$ m/s et $4,7.10^{-6}$ m/s ;
- les argiles à silex sont comprises entre $9,1.10^{-8}$ m/s et $2,5.10^{-10}$ m/s ;
- la craie altérée en subsurface entre 4,5 et 16 m, a une perméabilité comprise entre $5,7.10^{-5}$ m/s et $1,2.10^{-8}$ m/s ;
- la craie, à partir de 16 m de profondeur présente des perméabilités mesurées comprise entre 6.10^{-5} m/s et 1.10^{-4} m/s.

En 2016, 11 essais de perméabilité de type Lefranc ont été réalisés par PONTIGNAC :

- 5 essais dans le sondage FE_1, à raison d'un essai tous les mètres entre 15 et 20 m de profondeur dans la craie, mettant en évidence des perméabilités comprises entre $1,96.10^{-5}$ et $2,50.10^{-5}$ m/s ;
- 6 essais dans le sondage FE_3, à raison de 1 essai dans les argiles avec une perméabilité mesurée à $3,38.10^{-8}$ m/s, et de 5 essais dans la craie tous les 1,5 m environ entre 3,5 et 10,5 m de profondeur, mettant en évidence des perméabilités comprises entre $7,17.10^{-7}$ et $3,22.10^{-5}$ m/s.

On note que les matériaux du site ne présentent pas le coefficient de perméabilité requis par la réglementation. La faible perméabilité des limons peut être améliorée d'une puissance de 10 par un traitement approprié, compactage ou mélange à la bentonite. Les argiles, bien que peu perméables, sont trop hétérogènes et la craie en sub-surface présente une trop grande variabilité de sa perméabilité.

Les valeurs maxima de la perméabilité des couches constituant la couche inférieure de la barrière passive sont supérieures à la valeur réglementaire de 1.10^{-6} m/s sur 5 m pour la couche inférieure, et à 1.10^{-9} m/s sur 1 m pour la couche supérieure.

Dans ce cas, la réglementation prévoit qu'un dispositif équivalent aux performances hydrauliques réglementaires, peut être proposé. Le calcul d'équivalence qui est effectué sur la solution proposée prend en compte la valeur pénalisante mesurée en forage.

La valeur pénalisante $k = 1.10^{-4}$ m/s est retenue pour la perméabilité de la craie.

4.2 Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique a pour but d'identifier la cible (*les aquifères et les ouvrages de captage de la ressource en eau potable*) vers laquelle un transfert de polluant pourrait s'effectuer, si en cas d'accident, les dispositifs de collecte des lixiviats sur la géomembrane s'avéraient simultanément défectueux pour traverser les écrans d'étanchéité et la barrière passive. L'étude a aussi pour but d'évaluer les caractéristiques de transfert vers une nappe identifiée comme ressource en eau potable.

A l'échelle régionale, la masse d'eau concernée est la nappe de la Craie qui a un usage d'alimentation en eau potable. L'aquifère est la craie du Cénomaniens au Sénonien d'extension régionale couvrant le nord du Bassin Parisien. Le sens d'écoulement de la nappe libre de la Craie du Céno-Turonien, est globalement orienté vers le sud-ouest. Elle est captée pour l'essentiel dans le fond des vallées qui entaillent les plateaux crayeux.

A l'échelle locale, le secteur appartient au grand bassin versant hydrogéologique de la Canche, alimenté pour l'essentiel par la nappe libre de la craie qui s'écoule vers l'ouest, en direction de la Manche. L'aquifère de la craie du Turonien correspond à un réservoir de grande capacité caractérisé par une porosité de fissures et de fractures. Les aquifères des alluvions et des dépôts de subsurface (sables et limons) ont une importance mineure.

Le contexte hydrogéologique est étudié au moyen du réseau de contrôle piézométrique de l'exploitation et des ouvrages de captage dans les vallées qui encadrent le site.

4.2.1 L'aquifère de la craie

Les 5 piézomètres du réseau de contrôle réalisés en 2006 par PICARDIE FORAGES permettent de préciser les caractères de l'aquifère (**Figure 8**).

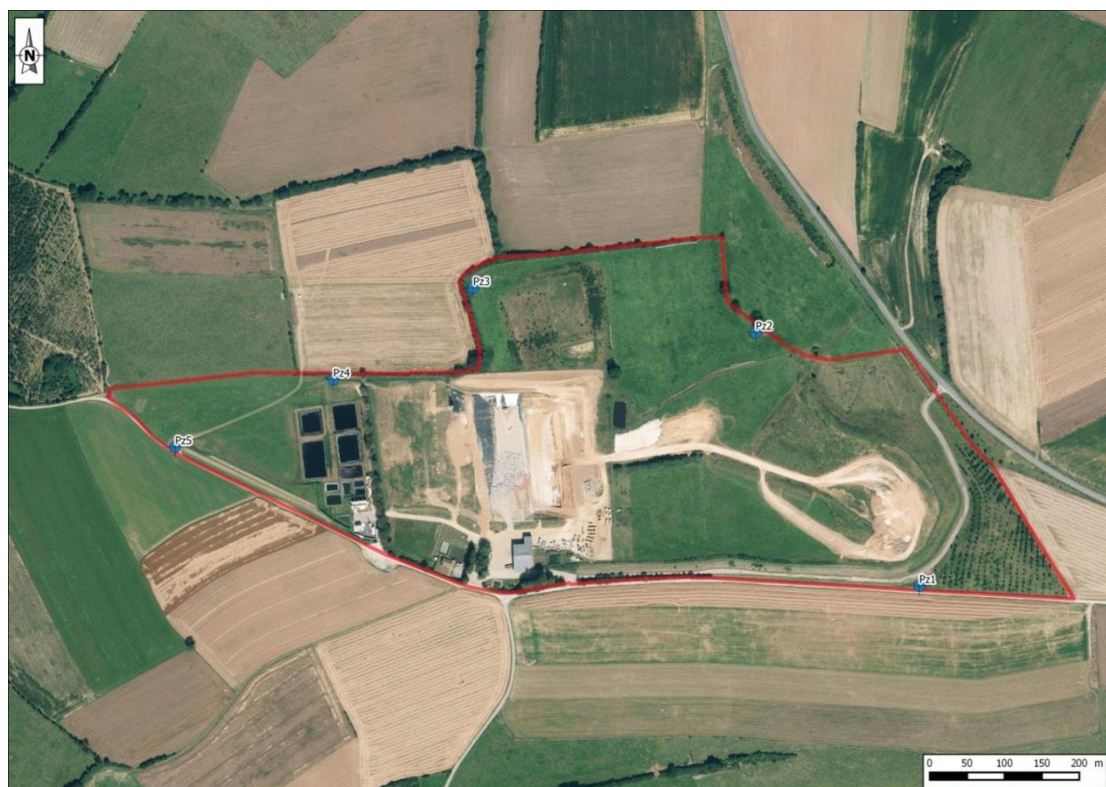


Figure 8 : Localisation du réseau de surveillance des eaux souterraines au droit du site

Une vidéo-inspection en octobre 2012 par GHI a permis de s'assurer que certains ouvrages (Pz4 et Pz1) sont bien fonctionnels et qu'ils ne sont pas colmatés. Le résultat de cette observation confirme la bonne représentativité des ouvrages qui recourent la totalité de l'aquifère productif du Turonien moyen, jusqu'à l'imperméable au contact des « dièves » du Turonien inférieur. Le léger colmatage des fentes des crépines n'empêche pas la circulation de l'eau, même si le débit en est légèrement ralenti. L'un des piézomètres Pz2 est localement bouché à la base par un objet tombé dans le tube, ce qui ne permet pas de mesurer le niveau statique en basses eaux.

En période de hautes eaux, le niveau statique remonte rapidement sur plusieurs mètres (jusqu'à 19 m de remontée sur Pz5 en novembre 2012). Cette caractéristique de l'aquifère de la craie montre une infiltration gravitaire rapide dans les fissures et les joints de stratifications. La fluctuation rapide et ample observée sur le site, traduit une diffusivité élevée de l'aquifère (craie fissurée) et une bonne alimentation naturelle (mise à l'affleurement du toit de la craie).

Les prélèvements d'échantillons d'eau par pompage effectués par AQUAMESURES en octobre 2012, ont permis d'évaluer la transmissivité de l'aquifère. Elle varie de 6.10^{-4} m²/s (Pz5) à 1.10^{-5} m²/s (Pz1). Ces valeurs sont conformes à celles régionales.

La perméabilité générale de la craie du Turonien moyen a pu être approchée, car l'aquifère mouillé est totalement traversé. Elle varie de 3.10^{-5} m/s (Pz5) à 7.10^{-7} m/s (Pz1). Ces données confirment le caractère non karstique et peu fracturé de la craie.

4.2.2 La nappe de la craie

Le réseau de contrôle piézométrique a été mis en place dès août 2006. Les mesures des niveaux statiques sont enregistrées tous les mois, ce qui permet d'analyser les fluctuations du niveau de la nappe.

Le plus haut niveau piézométrique a été mesuré en février 2014 avec un maximum de 123,72 m NGF pour le Pz1 (amont), soit une profondeur de 50,42 m par rapport au sol et 116,19 m NGF pour le Pz5 (aval), soit une profondeur de 45,33 m par rapport au sol

Deux esquisses piézométriques sont tracées au droit du site (**Figure 9**) :

- février 2014 correspondant aux plus hautes eaux mesurées au droit du site. Cette esquisse met en évidence une direction d'écoulement principale vers le nord-ouest, mais également la présence d'un dôme piézométrique au niveau du Pz4 pouvant traduire l'influence du contexte structural (axe du horst de la Ramonière) sur la piézométrie. Le gradient hydraulique est de 1,7% ;
- septembre 2010 correspondant aux plus basses eaux mesurées au droit du site, et confirmant la direction d'écoulement principale vers le nord-ouest, et la présence d'un dôme piézométrique au niveau du Pz4.

La plus cote pénalisante, qui est prise pour le calcul d'équivalence, soit +123,7 m NGF.

4.2.3 La qualité de la nappe

Pour caractériser la qualité de l'eau souterraine au droit du site, des prélèvements périodiques d'échantillons d'eau de la nappe ont été effectués par ASCAL puis actuellement par SOCOR et analysés tous les 3 mois dans un laboratoire accrédité COFRAC.

Pour identifier une éventuelle influence anthropique sur la qualité de l'eau de la nappe et déterminer son origine, des analyses complémentaires à celles de BURGEAP, ont été effectuées par EUROFINs en octobre 2012. Les analyses des anions et des cations dissous dans l'eau (balance ionique), sont comparées à celles des captages AEP de la région. Les résultats montrent que les eaux du site ont les mêmes caractéristiques hydrochimiques que celles des eaux captées. Elles ont une origine identique à celle des eaux de la nappe de la craie et ne montrent pas de signature de mélanges avec d'autres eaux, dont celles d'origine anthropique.

Aucune incidence de l'exploitation actuelle sur la qualité de la nappe de la craie, n'est constatée.



Figure 9 : Carte piézométrique au droit du site en période de très hautes eaux (février 2014) et en période de très basses eaux (septembre 2010)

4.3 Contexte hydrologique

Le site étant construit au sommet du horst de La Ramonière sur la crête topographique, il n'existe aucun réseau hydrographique naturel à proximité immédiate du site.

Le site ne peut pas être inondé.

Toutes les eaux pluviales externes sont déviées par un fossé extérieur à l'ISDND, tandis qu'un réseau des fossés intérieur au site permet aux eaux pluviales internes d'être collectées et conduites dans des bassins de contrôle avant infiltration.

Les lixiviats sont quant à eux collectés séparément et acheminés dans des lagunes pour traitement (notamment les lixiviats dans une station dédiée au site) avant rejet au milieu naturel (rejet superficiel).

5. Inventaire des cibles potentielles

5.1 Inventaire des captages d'eau potable

On observe que tous les captages de cette région sont situés dans les vallées et sont susceptibles d'être concernés par la nappe de la craie.

Les différents captages AEP présents dans les environs sont localisés sur la **Figure 10**, et leurs caractéristiques sont détaillées dans le **Tableau 1** ci-dessous.

Tableau 1 : Caractéristiques des captages AEP à proximité du site (Source : ARS)

N° de référence	Commune	Statut	Distance par rapport au site
00172X0001P1	Hucqueliers	Arrêté de DUP du 06/08/2009	1,8 km au nord en position latérale hydraulique
00171X0113P1	Preures	Arrêté de DUP du 12/05/1986	3,2 km au nord-ouest en aval hydraulique
00164X0059P1	Estrelles	-	9 km au sud-ouest

D'après l'ARS : « Les territoires des communes de Bimont, Alette, Avesnes, Maninghem, Quilen, Wicquinghem et Clenleu ne sont impactés par aucun périmètre de protection de captage AEP. Un captage abandonné pour la production d'EDCH est également recensé sur la commune de Hucqueliers. »

La vulnérabilité des ouvrages de captage AEP a fait l'objet d'une étude par l'hydrogéologue agréé départemental qui définit leur protection par les périmètres immédiats et rapprochés, ainsi que par un périmètre éloigné qui couvre une aire étendue du bassin versant d'infiltration pour l'alimentation de l'ouvrage.

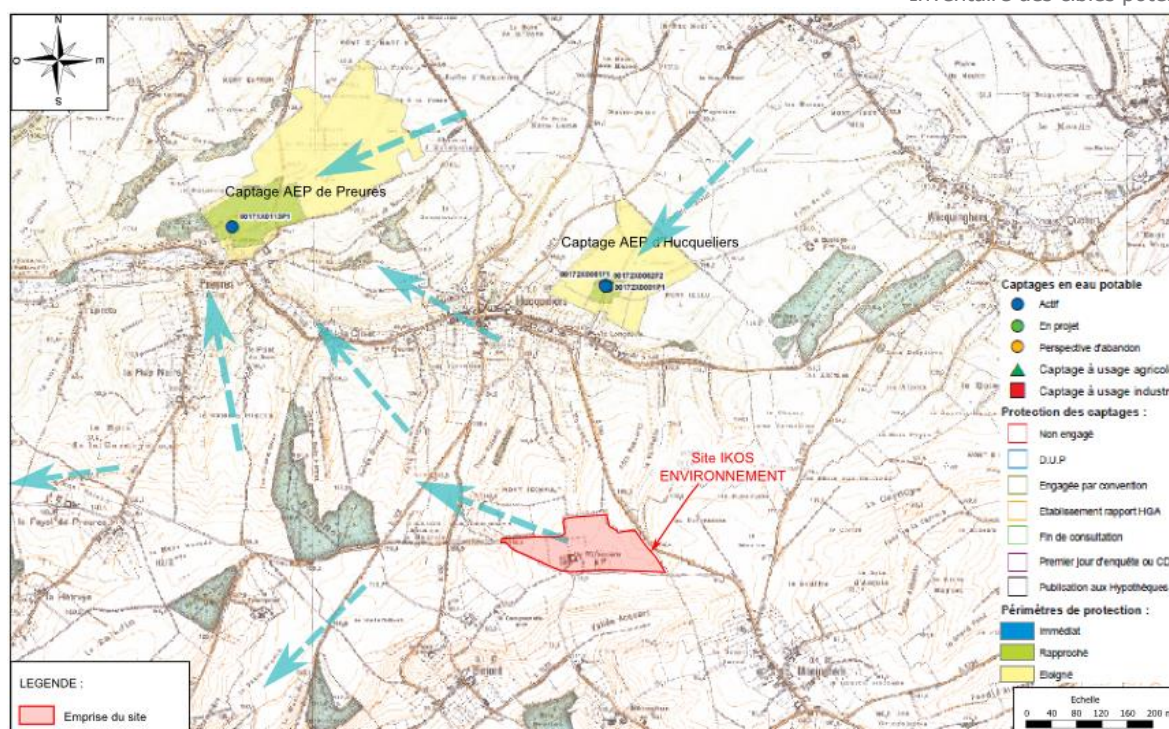


Figure 10 : Carte de localisation des périmètres de protection des captages AEP dans un rayon de 3 km autour du site (Source : ARS)

5.2 Inventaire des puits

D'après le site Infoterre, il existe dans un rayon de 5 km autour du site, 3 points recensés « puits ». Il s'agit de puits, exploités ou non, le long du ru des baillons au nord, de l'Aa au nord-est et de la Bimoise au sud-ouest et ce sont des référentiels points d'eau :

Tableau 2 : Recensement des points BSS eau à proximité du site (Source : Infoterre)

Référence BSS	Distance au site	Altitude en m NGF	Profondeur en m	Formation captée	Exploitation	Référencé comme point d'eau
00172X0037/P1	1,3 km au sud-est	185 m	90 m	Nappe de la craie	Piézomètre	Oui
00115X0011/P1	3,2 km au nord-ouest	103,7 m	27,2 m	-	Piézomètre	Oui
00171X0007/P1	5 km au nord-ouest du site	55 m	5,2 m	-	Piézomètre	Oui

Aucun ouvrage ne se trouve dans un rayon de 500 m du site. Ils sont représentés sur la **Figure 11**.

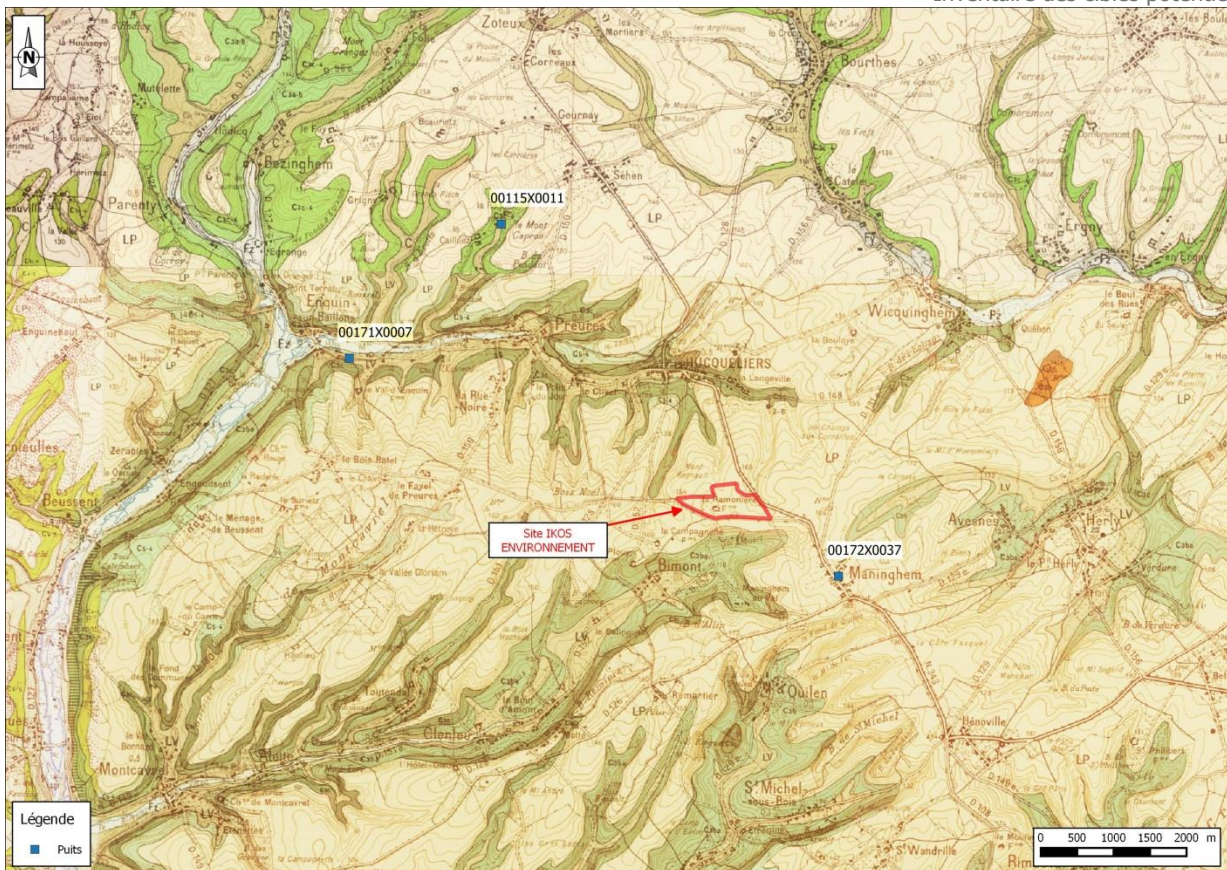


Figure 11 : Localisation des puits à proximité du site d'étude (Source : Infoterre)

5.3 Non vulnérabilité de la ressource captée

Les données sur la ressource sont tirées des rapports d'étude des périmètres de protection par les hydrogéologues agréés, notamment en ce qui concerne les sens d'écoulement de la nappe de la craie.

Elles sont illustrées par celles tirées de deux coupes hydrogéologiques à partir du site (**Figure 12**), localisées sur la carte géologique (**Figure 4**) :

- la nappe de la craie du Turonien qui alimente les captages est située dans un compartiment géologique différent de celui qui concerne le site ;
- la nappe est drainée par la vallée, son émergence en période normale se fait à quelques mètres sous le terrain naturel, vraisemblablement dans les alluvions à une altitude comprise entre + 80 et 90 m NGF ;
- les puits des captages AEP d'Hucqueliers et de Preures sont situés tous deux sur le compartiment nord de la vallée, sur le versant opposé à celui qui porte le site ;
- le niveau statique dans le captage d'Hucqueliers est à la cote + 95 m, au-dessus de son point d'émergence dans le fond de la vallée, ce qui traduit un sens d'écoulement vers le sud-ouest ;
- l'eau du captage de Preures, à la cote + 70 m NGF, est alimentée par un écoulement vers l'ouest sud-ouest, dans le compartiment au nord de la vallée.

Le contexte hydrogéologique local montre que les captages AEP d'Hucqueliers et de Preures qui sont apparemment à l'aval géographique et topographique, ne peuvent pas être impactés par les eaux souterraines du site exploité.

Quant aux autres ouvrages de captage AEP situés au sud-ouest (Estréelles et Neuville sur Montreuil) et au sud (Humbert), dans des vallées adjacentes éloignées du site, leur vulnérabilité ne peut être concernée par l'exploitation du site.

Ces données sur les captages et la ressource naturelle en eau potable, montrent clairement l'absence de vulnérabilité au regard de l'ISDND.

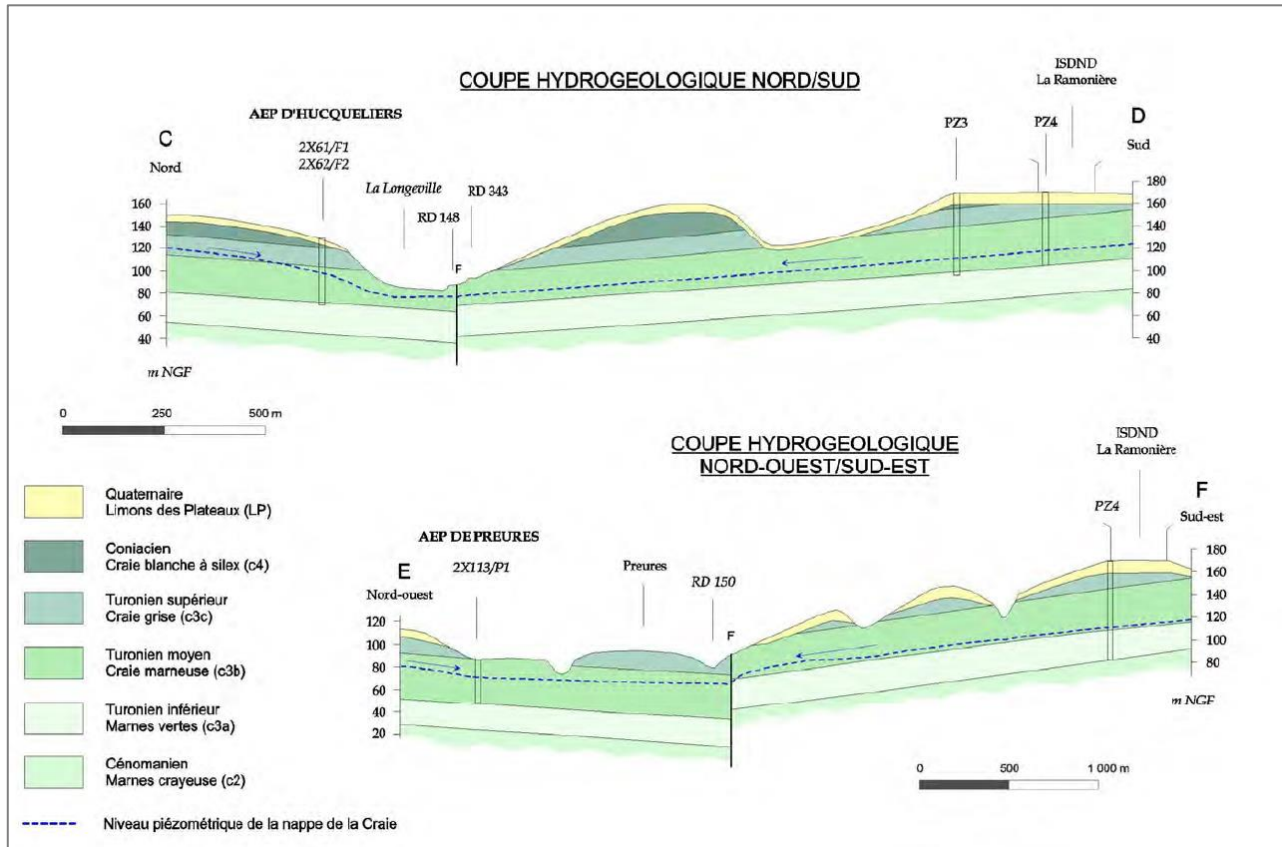


Figure 12 : Coupes hydrogéologiques (Source : DDAE 2012)

6. Schéma conceptuel

Le schéma conceptuel présente les trois composantes de l'évaluation d'un risque de pollution (source, transfert, cible). Le risque est le risque sanitaire, celui qui est lié à l'ingestion par l'homme d'une eau souterraine polluée, captée par un ouvrage (puits, forage).

Dans le cas d'une ISDND, les sources potentielles sont les lixiviats (= *eaux pluviales ayant été au contact des déchets non dangereux*) générés par l'exploitation, collectés en fond de casiers sur une géomembrane étanche, pompés dans un puits au point bas et stockés dans des bassins à l'extérieur des casiers. Le schéma conceptuel ne prend en compte qu'une infiltration permanente au travers de la barrière passive en fond de site.

Le transfert est une migration verticale d'eau par infiltration gravitaire, en application de la loi de Darcy et des paramètres de transfert massique par diffusion-dispersion. Le trajet le plus court, se ferait par le fond du casier, en considérant la situation pénalisante d'absence de géomembrane et de défaillance de la barrière passive.

La cible est la nappe de la craie en période des plus hautes eaux connues sur le site.

Cette hypothèse d'infiltration accidentelle est testée pour apprécier la performance du dispositif équivalent mis en place sur la zone exploitée. Le schéma conceptuel présente l'exemple d'un transfert vertical au travers de la barrière de sécurité passive, jusqu'à la nappe (**Figure 13**), en l'absence totale de la géomembrane de la barrière active.

Les aménagements mis en œuvre pour reconstituer la barrière passive équivalente sont présentés sur ce schéma avec les caractéristiques d'altitude, d'épaisseur et de perméabilité des matériaux qui interviennent dans le calcul de l'équivalence.

Pour tous ces paramètres, ce sont ceux les plus pénalisants qui sont pris.

- Le GéoSynthétique Bentonitique (GSB) est la solution retenue pour l'équivalence en flanc de la barrière passive ;
- La couche supérieure de la barrière passive est représentée par une couche d'argiles d'épaisseur de 1,1 m (1m réglementaire + 0,1 m en supplément) apportée d'un gisement extérieur au site et compactée au voisinage de l'optimum Proctor. La perméabilité retenue est celle pénalisante, c'est-à-dire l'objectif de perméabilité minimum à atteindre, soit 1.10^{-9} m/s (les perméabilités mesurées sur site devront être inférieures ou égales à cette valeur) ;
- Les limons traités à la bentonite sur 0,4 m, correspondent au renforcement des caractéristiques hydrauliques de la couche inférieure de la barrière passive. La perméabilité retenue est celle pénalisante, c'est-à-dire l'objectif de perméabilité minimum à atteindre, soit 1.10^{-7} m/s (les perméabilités mesurées sur site devront être inférieures ou égales à cette valeur) ;
- La craie non saturée du Turonien a une épaisseur minimale de 36,3 m sous le fond projeté des casiers, en période de hautes eaux. La valeur de la perméabilité retenue pour le calcul est la valeur la plus élevée pour la craie (soit 1.10^{-4} m/s), toujours pour se situer en condition pénalisante ;
- La nappe qui est la cible, a une cote d'altitude la plus élevée, à + 123,7 m NGF.

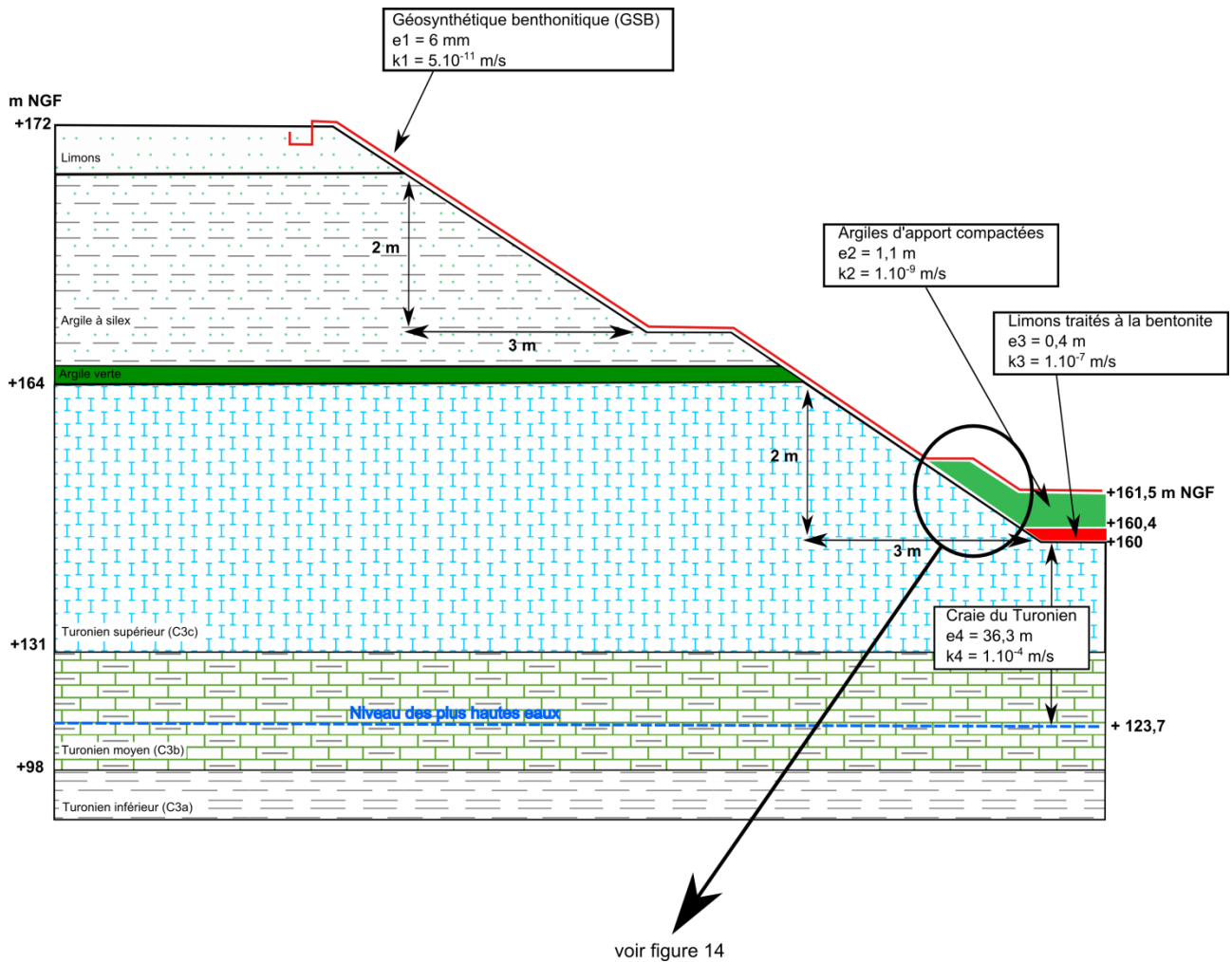


Figure 13 : Schéma conceptuel du transfert vertical et de détail de la barrière passive

7. Dispositif de barrière passive proposé

7.1 Structure de la barrière passive sur le fond

Selon les dispositions de l'article 8 de l'arrêté ministériel du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux, la barrière passive réglementaire des casiers de stockage de déchets de sédiments non dangereux est constituée de haut en bas :

- une couche de perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s sur au moins 1 mètre d'épaisseur sur le fond et les flancs ;
- une couche de perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-6} m/s sur au moins 5 mètres d'épaisseur en fond.

Les investigations géologiques et hydrogéologiques menées au droit du projet ont mis en évidence l'absence de barrière passive à 1.10^{-6} m/s et 1.10^{-9} m/s au droit de l'ensemble du projet. Les mesures effectuées dans la craie indiquent des perméabilités comprises entre $1,54.10^{-4}$ et $1,2.10^{-8}$ m/s ($k_{moy} = 2,3.10^{-5}$ m/s).

Compte-tenu des spécificités du site, dont les caractéristiques ne répondent pas à l'article 8 de l'arrêté ministériel du 15 février 2016, la barrière passive peut être complétée artificiellement et renforcée par d'autres moyens présentant une protection équivalente.

Il est prévu de reconduire pour les casiers ISDND 2 et 3 les prescriptions techniques qui sont définies par l'arrêté préfectoral du 3 juin 2011 d'autorisation d'exploiter l'ISDND 1, qui précise dans son article 22.2.1 la structure de la barrière de sécurité passive, de bas en haut :

- une couche de 0,4 m de terrain naturel remanié, pulvérisé, puis recompacté afin de présenter un coefficient de perméabilité inférieur à 1.10^{-7} m/s. Cette couche sera compactée par sous couche mince de 20 cm maxi à 95% de l'OPM selon la norme NF P 94-093 ;
- une couche d'1,1 m d'argile ou matériau argileux ou matériaux traités du site (après avis de l'inspection des installations classées) compactée présentant après sa mise en place un coefficient de perméabilité inférieur à 1.10^{-9} m/s. Le matériau devra être mis en place par couches successives de 0,2 m d'épaisseur maximum à 95% de l'OPM selon la norme NF P 94-093.

7.2 Structure de la barrière passive sur les flancs

Sur les flancs, la couche supérieure de la barrière passive doit remonter de deux mètres au-dessus du fond du casier, afin de constituer une cuvette très peu perméable.

En prolongement vers le sommet de la cuvette ainsi constituée, il est prévu que le dispositif équivalent soit constitué par un Géosynthétique Bentonitique (GSB) posé sur la surface latérale pentée.

Cette structure équivalente prévue pour les casiers ISDND 2 et 3 sera identique à celle mise en place sur l'ISDND 1, pour laquelle l'arrêté préfectoral dans ses articles 22.2.1 et 22.3.1, prescrit le dispositif suivant :

- pour la surface latérale pentée, la barrière de sécurité passive est constituée par une couche d'une épaisseur de 0,5 m d'argile ou matériau argileux ou matériaux traités du site (après avis de l'inspection des installations classées) compactée présentant après sa mise en place un coefficient de perméabilité inférieur à 1.10^{-9} m/s. Le matériau devra être mis en place par couches successives de 3 m de largeur et de 0,2 m d'épaisseur maximum maxi à 95% de l'OPM selon la norme NF P 94-093 jusqu'à une hauteur minimale de deux mètres par rapport au fond (dessus barrière passive).
- pour la surface latérale pentée, un géocomposite bentonitique (GSB) prolongé d'au moins un mètre sur le fond du casier.

La structure de la barrière passive sur les flancs est illustrée par une coupe schématique (**Figure 14**).

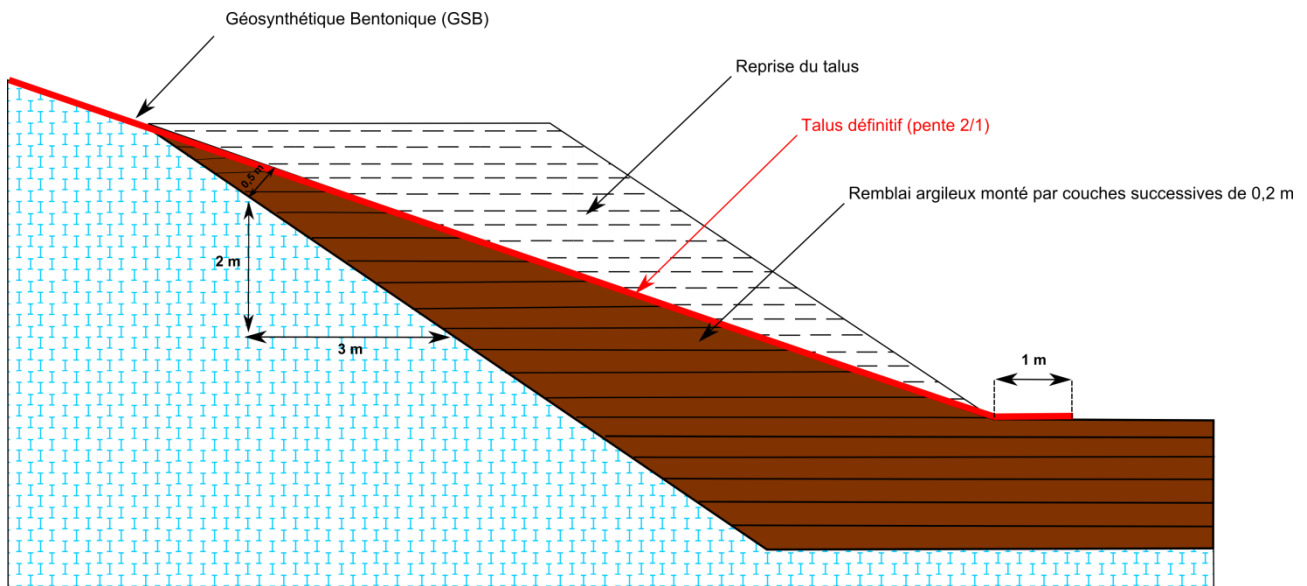


Figure 14 : Coupe schématique de la barrière passive au niveau des flancs

NB : Une configuration en 3/2 est également valable (cf. **Dossier n°8 – Etudes techniques – Note de stabilité**).

8. Aptitude des matériaux

Les reconnaissances géologiques réalisées en juillet 2016 ont confirmé les données lithologiques et les valeurs de perméabilité obtenues lors des 2 précédentes campagnes de reconnaissances géologiques et hydrogéologiques. Sur cette base, nous considérons que **pour la barrière passive des nouveaux casiers, la méthodologie et les principes constructifs de la précédente phase d'extension peuvent être intégralement appliqués.**

Nous rappelons dans les paragraphes ci-dessous les choix retenus dans le cadre de l'extension précédente et ayant fait l'objet d'un DDAE en 2012 rédigé par la société KALIES, qui démontrent l'aptitude des matériaux prévus à reconstituer la barrière passive équivalente.

8.1 Choix des limons

L'arrêté préfectoral dans ses prescriptions de son article 22.2.1 laisse le choix du matériau à mettre en œuvre pour le renforcement de la barrière passive, sous réserve qu'il corresponde aux caractéristiques requises (épaisseur de 0,4 m avec une perméabilité $k < 1.10^{-7}$ m/s).

Etant donné les quantités insuffisantes de craie récupérées lors du terrassement pour la mise en œuvre de la 1^{ère} couche de la barrière passive, il a été décidé d'utiliser un matériau équivalent : le limon.

8.1.1 Planches d'essais

4 planches d'essais ont été réalisées du 14 au 16 septembre 2011 afin de définir le dosage en bentonite permettant d'obtenir la perméabilité requise. Les essais géotechniques en laboratoire (la teneur en eau naturelle $W_{nat.}$, la densité sèche, l'indice portant immédiat IPI, la valeur de bleu spécifique VBS) ont été effectués par le laboratoire JPL sur des échantillons de limons traités à 1%, 2% et 3% de bentonite, ainsi qu'un échantillon de limon naturel.

Les essais in situ de perméabilité k au double anneau ouvert (type CERAS) ont été effectués par GINGER CEBTP SOLEN, suivant la norme NF P X30-418, d'août 2007. La deuxième série d'essais réalisés le 19 septembre 2011, après augmentation de la densité de compactage et du temps de saturation de l'essai k , a montré les valeurs de perméabilité suivante :

- limon traité à 2% : $k = 6,85.10^{-8}$ m/s ;
- limon traité à 3% : $k = 5,09.10^{-8}$ m/s.

A partir des résultats des essais en laboratoire et sur planches, il a été décidé de traiter le limon à 2 % de bentonite.

8.1.2 Perméabilité du limon traité à 2%

Parallèlement à la mise en œuvre sur site, des essais ont été effectués au laboratoire et in situ pour contrôle de la teneur en bentonite, la teneur en eau et la densité sèche. Les résultats indiquent le respect par l'entreprise STPA de la procédure de mise en œuvre de la couche de limon.

La perméabilité a été mesurée sur chacune des deux couches mises en œuvre sur le fond de forme du casier. Au total 8 essais ont été réalisés suivant la norme NF P X30-418 par GINGER, le 22 et 23 /09/2011 pour la première couche et le 28/09/2011 pour la seconde (la même procédure de mesure et de calcul que précédemment a été employée).

Les 8 valeurs sont comprises entre $5,7.10^{-9}$ m/s et $3,4.10^{-8}$ m/s. Elles sont toutes conformes à celle prescrite par l'arrêté et prévue dans le dispositif équivalent ($k < 1.10^{-7}$ m/s).

La valeur pénalisante de $k = 1.10^{-7}$ m/s, a été prise pour le calcul d'équivalence.

8.2 Choix des argiles marneuses

Le matériau employé pour reconstituer la couche supérieure très peu perméable est l'argile provenant de la carrière de la briqueterie de Molinghem, après une visite d'inspection du site, conformément aux prescriptions de l'arrêté préfectoral.

Le gisement est une argile plastique gris-bleu à noire, compacte et homogène, correspondant à l'Argile d'Orchies de l'Yprésien inférieur (e3) qui forme une couverture de quelques mètres d'épaisseur au-dessus d'une épaisse couche (>10 m) de sables fins (Sables d'Ostricourt du Landénien supérieur).

Des échantillons ont été prélevés aux fins d'analyses chimiques (éléments majeurs et soufre sous forme de sulfures) et minéralogiques par diffraction RX au laboratoire de chimie de GINGER CEBTP en août 2011. La diffraction RX n'a pas permis de préciser les proportions respectives des différentes familles (kaolinite, illites, smectites et chlorites). On sait simplement qu'il s'agit d'un mélange d'argiles ferrifères et potassiques au vu des analyses chimiques multi-élémentaires.

8.2.1 Planche d'essais

Les essais géotechniques en laboratoire de GINGER CEBTP sur des échantillons prélevés le 31/08/2011 ont porté sur la VBS, l'IPI, W_{nat} et la densité sèche pour déterminer la courbe Proctor. La planche d'essais réalisée sur deux couches de 0,20 m d'argiles a été réalisée le 19/09/2011, afin de définir les conditions de compactage.

Un essai de perméabilité k à l'infiltromètre simple anneau fermé (à charge variable) a été effectué par GINGER CEBTP SOLEN suivant la norme X30-420. Le coefficient de perméabilité obtenu est $k = 3,4 \cdot 10^{-10}$ m/s.

8.2.2 Perméabilité des argiles mises en œuvre sur le fond

Le contrôle de la perméabilité des argiles s'est fait sur les 6 sous-couches de la barrière passive rapportée, à raison de 4 essais par couche, soit un total de 24 essais.

Les valeurs de k obtenues sont comprises entre $6,5 \cdot 10^{-11}$ m/s et $9,8 \cdot 10^{-10}$ m/s. Elles sont toutes conformes à celle prescrite par l'arrêté et prévue dans le dispositif équivalent ($k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s).

La valeur pénalisante de $k = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s, a été prise pour le calcul d'équivalence.

8.2.3 Perméabilité des argiles sur les flancs

La perméabilité des argiles mises en œuvre sur la remontée de 2 m sur les flancs a été mesurée suivant deux moyens :

- à l'infiltromètre simple anneau fermé (à charge variable) suivant la norme X30-420 sur les deux talus opposés. Les valeurs mesurées de k sont comprises entre $1,0 \cdot 10^{-11}$ m/s et $9,9 \cdot 10^{-10}$ m/s ;
- au perméamètre à charge variable en laboratoire (oedomètre) sur trois niveaux de chacun des deux talus opposés. Les 6 valeurs obtenues de k sont comprises entre $3,4 \cdot 10^{-11}$ m/s et $3,8 \cdot 10^{-10}$ m/s.

8.3 GéoSynthétique Bentonitique (GSB)

Parmi les dispositifs équivalents, le GéoSynthétique Bentonitique (GSB) est retenu, car il satisfait aux performances hydrauliques requises par l'étude d'équivalence.

Il se présente sous la forme d'une nappe épaisse de 8 mm (réduite à 6 mm en conditions de service), constituée d'une âme d'argile en bentonite fortement gonflante en présence d'eau, encapsulée par aiguilletage entre deux géotextiles en polypropylène.

Le GSB mis en œuvre est un GSB de masse surfacique de bentonite sodique égale à 5 kg/m^2 . Sa perméabilité est donnée pour $k = 2 \cdot 10^{-11}$ m/s. Mais en conditions de service, la perméabilité retenue est $k = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s.

9. Prescriptions de mise en œuvre de la barrière passive

9.1 Mise en œuvre de la couche de limons

La barrière passive reconstituée est posée sur une surface support préparée lors du terrassement du fond de forme du casier.

Les opérations suivantes seront effectuées sur chacune des deux couches :

- extraction du matériau limoneux, contrôlé visuellement pour l'homogénéité de sa granulométrie (sans silex ou autres éléments granulaire) ;
- mise en place d'une couche mince de 0,20 m de limon par régilage ;
- épandage et traitement par pulvimixage de bentonite dosée à 2%, au moyen d'un épandeur tracté ;
- compactage du matériau par compacteur à pied dameur, compacteur à bille lisse.

9.2 Mise en œuvre de la couche d'argile sur le fond

- Le matériau argileux extrait de la carrière de Molinghem est chargé après avoir été contrôlé sur la couche d'extraction, pour vérifier l'absence de matériaux granuleux ;
- Le matériau est déchargé à l'entrée du casier, repris et régilé en couche mince de 0,20 m sur l'ensemble de la surface du casier ;
- La mise en œuvre des 6 couches de 0,20 m est faite par deux compacteurs, à pied de mouton et d'un compacteur à bille lisse.

9.3 Mise en œuvre d'argile sur les flancs

- Chargement, transport et stockage sur site de l'argile ;
- Régilage par couches successives de 0,20 m, sur une largeur de 3 m, le long du talus, jusqu'à la cote + 3,6 m au-dessus du sommet de l'argile du fond ;
- Compactage de chaque couche au moyen d'un compacteur à cylindre vibrant ;
- Reprise excédentaire de matériau à la pelle hydraulique, suivant un profil final de 2H/1V ou 3H/2V.

9.4 Mise en place du GSB

9.4.1 Stockage des matériaux

Les fournitures sont approvisionnées jusqu'à l'emprise du chantier où elles sont déchargées soigneusement.

Chaque rouleau est conditionné dans une gaine de polyéthylène ou équivalent le protégeant des intempéries et des diverses contraintes subies dans des conditions normales de transport.

Les GSB sont stockés dans leur conditionnement d'origine. Les rouleaux sont stockés à plat en évitant leur pliage. Le conditionnement usine n'est retiré des rouleaux qu'au moment de l'application.

L'aire prévue dans les installations de chantier, est protégée des irrégularités du terrain et des risques de poinçonnement par la mise en place, préalable au dépôt des fournitures, d'un géotextile anti-poinçonnement.

L'aire de stockage est à l'abri des heurts (matériels de chantier) mais accessible en tout temps par les moyens de manutention.

Les numéros de série et tous les défauts (coupures, déchirures, etc.) des rouleaux sont enregistrés.

9.4.2 Mise en œuvre

9.4.2.1 Plan de calepinage

Avant la mise en place du GSB, un plan de pose indiquant la taille des lés considéré, leur sens de pose, leur mode d'assemblage, le repérage des joints et des découpes particulières est réalisé.

Ces plans sont intégrés à une note méthodologique de mise en œuvre du GSB qui détaille les caractéristiques techniques du produit à mettre en place ainsi que sa procédure de pose et de contrôle.

9.4.2.2 Manutention

Le GSB sont manutentionnés à la main ou à l'aide d'engins mécanisés nécessairement équipés d'un système de levage et déroulage (du type portique ou palonnier).

Le transport entre l'aire de stockage et le pied d'œuvre est effectué avec ce système d'accrochage : en aucun cas, les rouleaux ne seront tractés ou traînés sur le sol ou encore manipulés directement avec les fourches d'un chariot élévateur.

9.4.2.3 Conditions de pose

- Réception du support de pose

La mise en place du GSB dans le casier n'intervient qu'après réception du support de pose.

Le fond et les flancs du casier sont inspectés visuellement. Cette inspection est formalisée par un rapport d'acceptation du support par l'Entreprise. Il peut être défini plusieurs sections acceptées séparément afin d'optimiser le déroulement du chantier.

Le support de pose est ensuite réglé, dépourvu d'ornières et débarrassé de tous débris (pierres, racines, déchets, etc.) conformément aux clauses du terrassement.

Toutes les structures rigides sans exceptions (collecteurs, regards) auxquelles le GSB doit se raccorder, sont préparées et soumises à l'agrément du bureau contrôle extérieur.

- Conditions climatiques

Aucun GSB n'est mis en place lors de conditions climatiques défavorables : sous la pluie (sauf en cas d'une adaptation de la méthode), sous la neige, dans la boue, par vent violent, par températures extrêmes.

9.4.2.4 Mise en place

- Pose et assemblage

Le GSB sont déroulés depuis le haut du talus ou en partie extérieure basse du casier à l'aide d'un engin mécanisé équipé d'un système de levage et déroulage (palonnier ou portique).

Le déroulage est suivi le plus rapidement possible de l'assemblage, en respectant scrupuleusement les dimensions minimales de recouvrement fixées par le fournisseur du GSB. Les surfaces de recouvrement ne doivent pas présenter de plis ni de terre ou de corps étrangers.

La pose spécifique du GSB répond aux prescriptions suivantes :

- les lés sont posés dans le sens de la pente avec des largeurs de recouvrement de 0,2 m dans le sens longitudinal ;
- l'étanchéité de la zone de recouvrement propre et plane est assurée par la présence au sein même du géosynthétique ou l'apport de bentonite en pâte, à raison de 0,5 kg/ml en bentonite ;
- d'une manière générale, la surface du GSB mis en place est immédiatement recouverte par la géomembrane pour éviter l'hydratation de la bentonite en absence de confinement.

Toute utilisation d'engin mécanique lourd sur les géosynthétiques est interdite.

- Ancrage

Une tranchée d'ancrage est réalisée à la mini-pelle en tête de talus périphérique. Les dimensions de la tranchée d'ancrage créée sont préalablement validées par une note de calcul.

Les lés de GSB y sont fichés en fond tous les 2 m minimum, en prenant soin d'éviter toute remontée sur le bord extérieur qui rendrait la tranchée entièrement étanche et sujette aux rétentions d'eau.

La tranchée est ensuite remblayée avec les matériaux du site correctement compactés.

10. Programme de contrôle de mise en œuvre

Le programme de contrôle lors des opérations de mise en œuvre de la barrière passive consistera à déterminer in-situ le respect des conditions de mise en œuvre déterminées à l'issue des planches d'essais (dosage bentonitique, teneur en eau, compacité) ainsi que de la perméabilité verticale de la barrière passive ainsi reconstituée.

Pour ce faire, l'entreprise de terrassement et/ou un bureau de contrôle extérieur contrôlera :

- le dosage bentonitique réellement appliqué (contrôle à la bêche, double pesée de l'épandeur),
- la teneur en eau des matériaux avant et pendant la mise en œuvre,
- la compacité de chaque couche de matériaux traités mise en œuvre au gammadensimètre,
- la perméabilité de chaque couche de matériaux traités mise en œuvre au moyen d'essais de perméabilité avec un infiltromètre de type simple anneau fermé à charge variable ou constante suivant la norme NFX 30-420, qui permet de mesurer de très faibles perméabilités (domaine de mesures de 1.10^{-7} à 1.10^{-10} m/s).

Un dossier de synthèse des opérations de contrôle sera constitué à l'issue de chaque tranche de travaux et transmis à l'inspection des Installations Classées.

11. Evaluation des effets à long terme

Une étude de stabilité des talus constituant les casiers du projet a été réalisée dans le cadre du présent du DDAE (cf **Dossier n°8 – Etudes Techniques / Etude de stabilité**). Celle-ci a permis de valider la bonne tenue géotechnique des talus et de s'assurer ainsi de la pérennité à long terme de la stabilité des casiers.

12. Evaluation de l'impact quantitatif potentiel du projet sur les eaux souterraines

Le guide de recommandation pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets indique que l'évaluation de l'équivalence est effectuée par comparaison de l'ampleur de l'impact potentiel d'une installation de stockage sur son milieu. Il est également précisé qu'« un moyen simple de comparer différents types de barrières passives peut consister à comparer les flux advectifs pour chaque configuration ». Cette même méthodologie est détaillée ci-dessous.

12.1 Hypothèses retenues

Afin d'évaluer la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine (et superficielle) au droit des deux casiers nous considérerons un scénario accidentel consistant en une défaillance d'étanchéité de la géomembrane (barrière active) des casiers soit par déchirure soit par attaque acide des lixiviats, conduisant à l'infiltration des lixiviats vers la nappe souterraine via la barrière passive (transfert vertical de la pollution).

Les hypothèses suivantes seront retenues :

- l'ensemble des lixiviats s'infiltrer dans la barrière passive : il n'y a aucune récupération des effluents liquides par le réseau de drainage (hypothèse majorante en terme d'appréciation du risque induit) ;
- la charge hydraulique (épaisseur de lixiviats dans les casiers) est supposée continûment maximale et égale à 30 cm (valeur réglementaire précisée dans le guide) dans le fond des casiers ;
- concernant les flancs des casiers, du fait qu'aucune charge ne peut s'y appliquer compte-tenu de leur pente, nous considérons qu'il n'y a pas d'infiltration à travers les flancs ;
- aucun abattement de la concentration en substances polluantes du fait de la dispersion ou de l'absorption des lixiviats au cours du transfert au sein de la couche d'argile compactée (hypothèse majorante) ;
- aucun abattement de concentration lors du transfert à travers la couche d'argile saturée ;
- le flux est vertical dans la zone non saturée, il l'est également dans la zone saturée de faible perméabilité puis le flux devient horizontal en profondeur du fait des sens d'écoulement des eaux souterraines.

Sur la base de ces hypothèses, nous étudions ensuite deux scénarii :

- scénario 1 : fond de casiers constitués d'une barrière passive réglementaire ;
- scénario 2 : fond de casiers constitués de la barrière passive équivalente détaillée dans les paragraphes précédents.

12.2 Scenario 1 : barrière passive réglementaire

Les matériaux présents au fond des casiers sont les suivants :

Tableau 3 : Scenario 1 – épaisseur des matériaux au droit des casiers (hors barrière active)

Matériaux	Perméabilité	Epaisseur
Argile compactée	$< 1.10^{-9}$ m/s	1 m
Terrain naturel non saturé	$< 1.10^{-6}$ m/s	5 m

La couche d'argile compacte contrôle l'infiltration verticale. L'infiltration verticale à travers cette couche est calculée de la façon suivante :

$$Inf = K i$$

$$Inf = K \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

avec :

- $\Delta h/\Delta l$: le gradient hydraulique qui s'exerce sur cette couche soit :
- Δh = la différence de charge, soit la hauteur de lixiviat dans le stockage ajoutée de l'épaisseur de la membrane, ici $0,3 + 1 = 1,3$ m ;
- Δl = la longueur de matériau traversé (1 m) ;
- K : perméabilité de la couche concernée (argile compactée : 1.10^{-9} m/s).

soit :

$$Inf = 1,3.10^{-9} \text{ m/s} \quad (\text{ou } 1,3.10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2)$$

La migration du lixiviat des casiers vers les eaux souterraines à travers la barrière passive non saturée est contrôlée par deux phénomènes :

- la diffusion moléculaire, qui est en général considérée comme négligeable dans des terrains perméables où les vitesses d'écoulement et la dispersion qui les accompagnent sont élevées, mais qui doit être prise en compte dans le cas de terrains de faible perméabilité tels que ceux constituant la barrière passive ;
- l'advection liée à la différence de charge et à la conductivité hydraulique des terrains traversés.

L'advection étant le phénomène dominant la répartition des concentrations dans les eaux souterraines, la diffusion moléculaire, qui n'influence que les temps de restitution, est donc négligée (cf. guide de recommandation). La concentration dans l'aquifère sera donc contrôlée par l'infiltration (flux advectif).

En considérant un traceur parfait qui ne réagit pas avec les terrains traversés, une durée d'émission de la source comme infinie, nous calculons la concentration relative de traceur dans la nappe d'eau souterraine :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \frac{qH}{Inf.L}}$$

avec :

- C/C_0 : la concentration relative en lixiviats soit :
 - C la concentration du traceur dans la nappe d'eau souterraine ;
 - C_0 la concentration source du traceur dans les casiers ;
- q : le débit unitaire de l'aquifère présent au droit des casiers soit :
 - $q = K_{nappe} * i_{nappe}$
 - nous considérons la perméabilité de la craie la plus forte mesurée lors des essais de caractérisation soit 1.10^{-4} m/s ;
 - nous considérons le gradient d'écoulement de la nappe de 1,7%.
- H : l'épaisseur de la couche de mélange dans la nappe de la craie, estimée à 25 m environ ;
- Inf : l'infiltration à travers la couche d'argile compacte contrôlant les échanges verticaux, soit $1,3.10^{-9}$ m/s
- L : la longueur du fond des casiers dans le sens de l'écoulement de la nappe, soit 245 m pour les casiers ISDND 2 et 3.

soit :

$$\frac{C}{C_0} = 7,44.10^{-3}$$

12.3 Scenario 2 : barrière passive équivalente

Les matériaux présents au fond des casiers sont les suivants :

Tableau 4 : Scenario 2 – épaisseur des matériaux au droit des casiers (hors barrière active)

Matériaux	Perméabilité	Epaisseur
Argile compactée	1.10^{-9} m/s	1,1 m
Limons traités à 2% de la bentonite	1.10^{-7} m/s	0,4 m
Terrain naturel non saturé	1.10^{-4} m/s	36,3 m

La couche d'argile compacte contrôle l'infiltration verticale. L'infiltration verticale à travers cette couche est calculée de la façon suivante :

$$Inf = K i$$

$$Inf = K \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

avec :

- $\Delta h/\Delta l$: le gradient hydraulique qui s'exerce sur cette couche soit :
- Δh = la différence de charge, soit la hauteur de lixiviat dans le stockage ajoutée de l'épaisseur de la membrane, ici $0,3 + 1,1 = 1,4$ m ;
- Δl = la longueur de matériau traversé (1,1 m) ;
- K : perméabilité de la couche concernée (argile compactée : 1.10^{-9} m/s).

soit :

$$\text{Inf} = 1,27 \cdot 10^{-9} \text{ m/s} \quad (\text{ou } 1,21 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2)$$

La migration du lixiviat des casiers vers les eaux souterraines à travers la barrière passive non saturée est contrôlée par deux phénomènes :

- la diffusion moléculaire, qui est en général considérée comme négligeable dans des terrains perméables où les vitesses d'écoulement et la dispersion qui les accompagnent sont élevées, mais qui doit être prise en compte dans le cas de terrains de faible perméabilité tels que ceux constituant la barrière passive ;
- l'advection liée à la différence de charge et à la conductivité hydraulique des terrains traversés.

L'advection étant le phénomène dominant la répartition des concentrations dans les eaux souterraines, la diffusion moléculaire, qui n'influence que les temps de restitution, est donc négligée (cf. guide de recommandation). La concentration dans l'aquifère sera donc contrôlée par l'infiltration (flux advectif).

En considérant un traceur parfait qui ne réagit pas avec les terrains traversés, une durée d'émission de la source comme infinie, nous calculons la concentration relative de traceur dans la nappe d'eau souterraine :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \frac{qH}{\text{Inf} \cdot L}}$$

avec :

- C/C_0 : la concentration relative en lixiviats soit :
 - C la concentration du traceur dans la nappe d'eau souterraine ;
 - C_0 la concentration source du traceur dans les casiers ;
- q : le débit unitaire de l'aquifère présent au droit des casiers soit :
 - $q = K_{\text{nappe}} \cdot i_{\text{nappe}}$
 - nous considérons la perméabilité de la craie la plus forte mesurée lors des essais de caractérisation soit $1 \cdot 10^{-4}$ m/s ;
 - nous considérons le gradient d'écoulement de la nappe de 1,7%.
- H : l'épaisseur de la couche de mélange dans la nappe de la craie, estimée à 25 m environ ;
- Inf : l'infiltration à travers la couche d'argile compacte contrôlant les échanges verticaux, soit $1,27 \cdot 10^{-9}$ m/s ;
- L : la longueur du fond des casiers dans le sens de l'écoulement de la nappe, soit 245 m pour les casiers ISDND 2 et 3.

soit :

$$\frac{C}{C_0} = 7,28 \cdot 10^{-3}$$

12.4 Synthèse

Les résultats obtenus précédemment sont les suivants :

Tableau 5 : Synthèse des calculs de rapports de concentration

Scenario	Caractéristiques	C/C ₀
1 – Barrière passive réglementaire	1 m à 1.10^{-9} m/s 5 m à 1.10^{-6} m/s	$7,44.10^{-3}$
2- Barrière passive équivalente	1,1 m d'argile compactée à $k \leq 1.10^{-9}$ m/s 0,4 m de limons traités à 2% de bentonite à $k \leq 1.10^{-7}$ m/s	$7,28.10^{-3}$

La barrière passive équivalente prévue présente des caractéristiques théoriques plus intéressantes que la barrière réglementaire et montre donc que le principe d'équivalence est respecté.

Remarque : Précisons qu'en outre, la barrière de perméabilité inférieure à 1.10^{-9} m/s, présente une épaisseur majorée par rapport aux préconisations du guide méthodologique (1,1 m au lieu de 1 m). Le guide rappelle que l'épaisseur demeure un atout et une garantie de sécurité indépendamment des considérations théoriques sur les transferts.

12.5 Cas des flancs

Comme indiqué dans le « Guide de recommandations pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive d'installations de stockage de déchets », *l'utilité du calcul d'équivalence proprement dit est très sujet à caution. En effet, la problématique des flancs est autrement plus complexe que celle des fonds car la composante « stabilité mécanique » y est prépondérante. Dans ces conditions, il vaut mieux réserver le calcul à celui de la stabilité.*

Du fait de la pente des talus sur les flancs, nous considérons qu'aucune zone saturée ne peut être présente : en effet, les lixiviats qui se présentent sur les talus sont drainés grâce à la gravité vers le fond des casiers. Les talus favorisent donc le drainage des lixiviats vers le fond des casiers.

Rappelons en outre que les casiers seront terrassés au sein des horizons non saturés du terrain naturel encaissant.

Aucune charge pérenne n'étant présente, l'infiltration verticale à travers une couche limitant l'infiltration ne peut être calculée.

C'est donc bien **la notion de stabilité mécanique qui est prépondérante** dans le cas des flancs des casiers du projet.

La stabilité mécanique des flancs du stockage a été vérifiée par des calculs géotechniques dans le cadre du présent Dossier de Demande d'Autorisation d'Exploiter. Cette étude est jointe dans le **Dossier 8 – Etudes Techniques**. Ces calculs sont vérifiés par la pratique du fait que le site est actuellement en cours d'exploitation et que les flancs sont stables, aucune anomalie n'ayant été observée jusqu'à présent.

13. Conclusion

Considérant :

1. l'ensemble des documents mis à notre disposition pour cette étude ;
2. le type de déchets mis en œuvre (déchets classés comme non dangereux) ;
3. que le terrain naturel montre des perméabilités supérieures aux objectifs réglementaires au droit de l'essentiel des formations en place ;
4. que la nappe se trouve à une profondeur de l'ordre de 36,3 m par rapport au fond des casiers en projet et que l'aquifère non saturé présente des perméabilités moyenne de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-5}$ m/s sur cette épaisseur, donc que la nappe semble protégée ;
5. que l'usage de la nappe de la craie est sensible du fait de la présence de forages de production d'eau potable à environ 2000 m à l'aval du site, mais que l'étude du contexte hydrogéologique met en évidence non vulnérabilité de ces captages ;
6. que la barrière d'étanchéité passive équivalente constitue une barrière suffisante au transfert des lixiviats vers les eaux souterraines dans l'éventualité d'une défaillance de la géomembrane (barrière active).

La barrière de sécurité passive proposée garantira une protection efficace du milieu naturel contre les percolations de lixiviats. La protection proposée est conforme par le biais du principe d'équivalence aux textes en vigueur.