

TIERCE EXPERTISE VALIDANT LA NOTE D'EQUIVALENCE – BARRIERE PASSIVE CASIER ISDND

---

Mots clés : Equivalence, barrière de sécurité passive, GSB

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

**COURADIN, A.** (2019) « ISDND des Vaugarniers (Montmirail, 72) : Analyse critique en tierce expertise, Etude de l'équivalence en étanchéité passive. ISS Environnement, janvier 2009. Note de calcul en mode hydro-dispersif ». Affaire 24 19 3. Rapport **MeTeD\_k** pour NCI ENVIRONNEMENT (72) en date du mois de novembre 2019.

Ce rapport comporte 24 pages dont 7 figures et 3 annexes.

## SOMMAIRE

<b>1. Introduction</b>	<b>4</b>
1.1. CONTEXTE DE LA MISSION	4
1.2. OBJECTIF DE LA MISSION	4
1.3. AVERTISSEMENT	4
1.4. DEFINITIONS	5
<b>2. Analyse critique</b>	<b>7</b>
2.1. DOCUMENTATION	7
2.2. BIBLIOGRAPHIE	7
2.3. REFERENCES NORMATIVES	10
2.4. DEMARCHE METHODOLOGIQUE	11
2.5. RAPPEL DES DONNEES DE L'ETUDE	12
2.6. ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX	13
2.7. NOUVELLE SIMULATION	14
2.8. RECOMMANDATIONS	17
2.9. AVIS MOTIVE	19
<b>3. Conclusion</b>	<b>20</b>
<b>4. Annexes</b>	<b>21</b>
4.1. SITES D'ETUDES DU STRATOTYPE CENOMANIEN	21
4.2. COUPE GEOLOGIQUE DU STRATOTYPE ET LES SITES PARASTRATOTYPIQUES	22
4.3. SIMULATION D'UNE EQUIVALENCE STRICTE	24

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Dispositif en fond de la barrière au sens de l'arrêté ministériel (am, à gauche), Dispositif équivalent proposé en solution alternative (sa, à droite)	14
Figure 2 : Courbes de restitution en sortie des barrières de sécurité passive (en bleu, le scénario réglementaire, en rouge, le scénario alternatif)	17
Figure 3 : Exemple de configuration en flancs avec des risbermes pour couper les pentes (source : guide MEEDDAT, 2009)	18
Figure 4 : Le Cénomaniens en Sarthe et les principaux sites d'études du Stratotype (Morel, 2015)	21
Figure 5 : Le Cénomaniens en Sarthe et les quatorze (14) sites parastratotypiques retenus dans le cadre des travaux de l'IRPG/INPG (Morel, 2015, Mary in GFC, 2016)	22
Figure 6 : Situation de la carrière du Tramway, Montmirail (IPG72 FA043)	23

Figure 7 : Courbes de restitution en sortie des barrières de sécurité passive (en bleu, le scénario réglementaire, en rouge, le scénario alternatif) – Cas d’une stricte équivalence entre les deux barrières ..... 24

## 1. Introduction

### 1.1. Contexte de la mission

La société NCI ENVIRONNEMENT (Le Mans, 72) exploite une installation de stockage de déchets non dangereux située sur la commune de Montmirail (72), au lieu-dit « Les Vaugarniers ». Dans le cadre de cette exploitation, il convient de s'assurer que la barrière de sécurité passive respecte les exigences réglementaires de l'arrêté ministériel du 15 février 2016 « relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux ». En conséquence, l'équivalence en étanchéité passive de la future barrière doit être démontrée et fait appel à un dossier technique composé d'une note de calcul. Pour ce faire, une étude de l'équivalence en étanchéité passive a été produite (IIS Environnement, 2009).

Cette étude a suscité de la part la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement des Pays de la Loire et de son Unité Départementale de la Sarthe une demande d'expertise et le recours à un tiers expert. Le tout a été notifié au pétitionnaire par courrier en date du 23 juillet 2019. C'est dans ce contexte que la société NCI ENVIRONNEMENT (Le Mans, 72) sollicite le laboratoire de géotechnique environnementale **MeTeD\_k** (La Chapelle de Surieu, 38).

### 1.2. Objectif de la mission

Cette analyse critique porte sur le contenu de l'étude de l'équivalence en étanchéité passive et les données qui amènent au dimensionnement de la barrière de sécurité passive du projet (ISS Environnement, 2009). En effet, la demande de l'Unité Départementale de la Sarthe (DREAL Pays de la Loire, 2019) porte sur l'analyse critique de l'équivalence de la barrière reconstituée par rapport aux exigences de l'arrêté ministériel précité. Le texte réglementaire de référence est l'arrêté ministériel du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux et notamment les articles 5, 8 et 18 du titre II « Conception et construction de l'installation », chapitre I<sup>er</sup> « Localisation de l'installation et maîtrise foncière », chapitre II « Exigences relatives à l'étanchéité, au drainage et à la stabilité » et du titre III « Exploitation de l'installation », chapitre I<sup>er</sup> « Etat initial ».

### 1.3. Avertissement

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à **METED\_K** (38) par NCI ENVIRONNEMENT (72), des données scientifiques et techniques disponibles ou objectives et de la réglementation en vigueur. La responsabilité de **METED\_K** ne pourra pas être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes, obsolètes ou erronées. Ce rapport (texte, figures, tableaux et pièces versées en annexes) constitue un ensemble

inséparable dont l'usage exclusif est réservé à l'entreprise NCI ENVIRONNEMENT (72) vis-à-vis de l'installation des Vaugarniers située sur la commune de Montmirail (72).

## 1.4. Définitions

### Barrière de sécurité passive

Elle est constituée par le milieu géologique naturellement présent tant sur le fond que sur les flancs des casiers. Elle doit assurer à long terme la prévention de la pollution des sols, des eaux souterraines et de surface par les déchets et les lixiviats et pallier la défaillance éventuelle de la barrière de sécurité active.

### Dispersion

La dispersion est liée à l'hétérogénéité du milieu poreux à petite et grande échelle. Elle est à l'origine de l'étalement d'un panache de pollution et contribue à diluer les concentrations. La dispersion conjugue les phénomènes d'advection et de diffusion.

### Homogénéité

En géologie, un milieu homogène se définit par rapport à une échelle d'observation. L'homogénéité de la barrière passive se définit à l'échelle de l'installation de stockage de déchets par la continuité latérale et verticale des formations géologiques et de leurs propriétés, notamment hydrauliques.

### Installation de stockage de déchets non dangereux

Selon la réglementation, elle est définie comme étant une installation d'élimination de déchets par dépôt ou enfouissement sur ou dans la terre.

### Période d'exploitation

Au sens réglementaire, il s'agit d'une période couvrant les périodes d'admission et de stockage des déchets.

### Perméabilité

Aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique. Cette propriété se quantifie par son coefficient de perméabilité (au sens de Darcy) et se détermine au moyen d'essais de perméabilité. Dans le cas des installations de stockage de déchets, ces essais de perméabilité font références à des textes normatifs.

### Niveau de protection équivalent

La notion « d'équivalence » fait explicitement référence au dimensionnement des barrières de sécurité passive pour la création ou l'extension d'installations de stockage de déchets non dangereux. Ainsi, « Deux barrières d'étanchéité passive seront considérées comme « équivalentes » lorsqu'elles assurent un même niveau de protection en terme d'impact potentiel d'une installation de stockage sur une ressource en eau souterraine ».

## Ressource en eau

Eau disponible ou potentiellement accessible pour couvrir des besoins d'alimentation en eau potable en terme de qualité, de quantité et de conditions de mobilisation.

## Schéma conceptuel

Schéma qui permet de traduire en termes de source, transfert et cible, le risque sanitaire liée à une installation classée.

## 2. Analyse critique

### 2.1. Documentation

Les pièces (par ordre chronologique) analysées dans le cadre de la rédaction de cette note sont les suivantes.

NCI Environnement (2019) Courrier de l'Unité départementale de la Sarthe, Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement des Pays de la Loire, courrier du 23 juillet 2019, référence ES/GL/MLM n° 836-19, 2 pages

NCI Environnement (2014) ISDND de Montmirail, Vue en plan fond de casiers. Plan réalisé par Alpes Ingé, en date du 20/05/2014, échelle 1/1000<sup>ème</sup>, plan n°3, indice A, phase AVP

NCI Environnement (2014) ISDND de Montmirail, Vue en plan fond de fouille. Plan réalisé par Alpes Ingé, en date du 29/04/2014, échelle 1/1000<sup>ème</sup>, plan n°1, indice A, phase AVP

NCI Environnement (2009) Dossier de demande d'autorisation d'exploiter une installation de stockage de déchets non dangereux, Les Vaugarniers, Commune de Montmirail, département de la Sarthe, Etude d'impact. Dossier réalisé par ISS Environnement, Label environnement, 2009, pages 130 à 212

NCI Environnement (2009) Etude liée à la reconstitution de la barrière de sécurité passive, extension de l'ISDnD de Montmirail (72). Dossier réalisé par ISS Environnement, Label environnement, janvier 2009, 14 pages

NCI Environnement (2007) Compte rendu de sondages et essais, extension d'un CET à Montmirail (72). Rapport réalisé par Label Environnement, Saunier et Associés, octobre 2007, 8 pages

### 2.2. Bibliographie

Les documents (par ordre chronologique) consultés dans le cadre de la rédaction de cette analyse sont les suivants.

**COURADIN, A.** (2018) ISDND de Vaugarniers (Montmirail, 72). Contrôle extérieur : Détermination de la perméabilité sur site – Niveau de faible perméabilité reconstitué. Barrière de sécurité passive : Casier 12 SE. Affaire **MeTeD\_k** 15 18 2 pour le compte de l'entreprise NCI ENVIRONNEMENT (72). Rapport 2 en date du mois de mai 2018.

**COURADIN, A.** (2018) ISDND de Vaugarniers (Montmirail, 72). Contrôle extérieur :

Détermination de la perméabilité sur site – Niveau de faible perméabilité reconstitué. Barrière de sécurité passive : Casier 12 SE – Planche d’essais. Affaire **MeTeD\_k** 15 18 2 pour le compte de l’entreprise NCI ENVIRONNEMENT (72). Rapport en date du mois d’avril 2018.

**COURADIN, A., POTHIER, C., VACHERIE, S., QUEHEILLE, E.,** (2016) « Echange cationique par transfert hydrique entre un GSB et un sol à forte teneur en carbonate de calcium. » Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l’Ingénieur, JNGG 2016, Nancy, du 6 au 8 juillet, pp 510-518

**GROUPE FRANÇAIS DU CRETACE** (2016) « Colloque Cénomaniens », Le Mans, 27-29 avril 2016, Musée Vert, Volume des Résumés, 96 pages

**JORF,** (2016) « Arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux ». JORF n° 00069, 22 mars 2016

**MOREL, N., (COORD.)** (2015) « Stratotype Cénomaniens ». Muséum national d’Histoire naturelle, Paris ; Biotope, Mèze, 384 p. (Patrimoine géologique ; 6)

**AERTGEETS, G.,** (2011) « Identification et diagnostic du patrimoine géologique en Pays de la Loire. Inventaire des sites géologiques remarquables ». Rapport final. Annexe 6 : tableau récapitulatif des 396 sites géologiques présélectionnés pour l’inventaire du Patrimoine Géologique en Pays de la Loire, BRGM/RP-60129-FR, 61 pages

**CFG,** (2010), « Recommandations pour l’utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets ». Mars 2010, version 2, 66 pages

**MEEDDAT,** (2009) « Guide de recommandations pour l’évaluation de l’équivalence en étanchéité passive d’installation de stockage ». Version 2, février 2009, 50 pages

**GUYONNET, D., ET AL,** (2008) « Projet LIXAR 2 – Indicateurs de performance pour les géosynthétiques bentonitiques ». Rapport final. BRGM/RP-56356-FR, mai 2008, 166 pages

**GUYONNET, D.,** (2008) « MISP\_v1 : Un modèle analytique pour estimer l’impact de sources de pollution sur les eaux souterraines ». Guide d’utilisation. Rapport final. BRGM/RP-56152-FR, février 2008, 79 pages

**MEDAD,** (2008) « Recommandations relatives au choix entre modèle analytique et numérique dans le cadre de l’étude du transfert de polluants dans les sols et les eaux souterraines – Guide méthodologique. ». Rapport d’étude réalisé par INERIS sous référence INERIS – DRC –08-86031-00620A, janvier 2008, 67 pages

**NOROTTE, V., POTHIER, C., COURADIN, A., DIDIER G.,** (2006) « Apport de la norme XP P 84-705 pour la réalisation d’essais de performance sur les géosynthétiques bentonitiques ». CFG, Rencontres Géosynthétiques 2006, Montpellier, 12 et 14 juin 2006, pp 231-237

**CAZAUX, D.,** (2005) « Recommandations pour la caractérisation de la perméabilité des barrières d'étanchéité des installations de stockage de déchets ». Rapport final. Rapport BRGM-RP-53721-FR, 57 pages

**VERNHET, Y.,** (2004) « Carte géologique harmonisée du parc régional du Perche ». Rapport BRGM-52855-FR, 90 pages

**GUYONNET, D., ET AL,** (2003) « LIXAR – Interactions lixiviats-argiles ». Rapport final. BRGM/RP-52449-FR, juillet 2003, 148 pages

**CALLIER, L.,** (2003) « Protection des eaux souterraines au droit des sites industriels ». Rapport final BRGM-53011-FR, 49 pages

**COURME, M.-D.,** (2003) « Notice explicative, carte géol. France (1/50 000), feuille Authon du perche (324) ». Orléans, BRGM, 193 pages

**ROQUE, A., J., P.-M.,** (2001) : « Transfert advectif et diffusif de polluants inorganiques dans les barrières d'étanchéité minérales présentes dans les centres de stockage de déchets ». Thèse de l'INSA de Lyon

**LEMIERE, B., ET AL,** (2001) « Guide sur le comportement des polluants dans les sols et nappes. Application dans un contexte d'Evaluation Détaillée des Risques pour les ressources en eau ». Rapport BRGM-50662-FR, 103 pages

**GUYONNET, D., ET AL.** (2001) On the hydro-dispersive equivalence of multi-layered mineral barriers. Journal of Contaminant Hydrology, n° 51, pp.215-231.

**ADEME,** (1999) « Les installations de stockage de déchets ménagers et assimilés – Techniques et recommandations ». Connaître et agir, ISBN 2-86817-395-0, 105 pages et 2 annexes

**GUYONNET, D.,** (1998) « Approche mathématique de l'impact des sites contaminés sur les eaux souterraines dans un contexte d'analyse de risque ». Thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse

**CAVELIER, C., LORENTZ, J.,** (1987) « Aspect et évolution géologique du Bassin Parisien ». Bull. Inf. Géol. Bass. Paris, Mém. H.s., n°6, 271 pages

**MEGNIEN, C.,** (1980) « Synthèse géologique du Bassin de Paris ». N° 101, 102 et 103. Stratigraphie et paléogéographie.

**JUIGNET, P.,** (1974) « La transgression crétacée sur la bordure orientale du massif armoricain. Aptien, Albien, Cénomaniens de Normandie et du Maine. Thèse Université de Caen

**MARSILY DE, G.**, (1981) « Hydrogéologie quantitative ». Collection Sciences de la Terre, 215 pages

**VAN GENUCHTEN, T.** (1980) - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.

**ABRAMOWITZ, M., STEGUN, I.**, (1972) Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables, dixième édition. John Wiley and Sons (eds), New York.

**OGATA, A., BANKS, R.**, (1961) A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 411-A., pp. A1-A9

**LAPIDUS, L., AMUNDSON N.R.**, (1952) « Mathematics of adsorption in beds » J. Phys. Chem. 56:584

**DARCY, H.** (1856) Les fontaines publiques de la ville de Dijon, Paris : Victor Valmont Ed, pp. 590-594

**FICK, A.** (1855) « Über diffusion ». Annalen der Physik und Chemie, vol. 94, 1855, p. 59-86

**ORBIGNY, A., D'** (1847) Paléontologie française. Description zoologique et géologique de tous les animaux mollusques et rayonnés fossiles de France. Terrains crétacés. Tome IV: contenant les Brachiopodes. Texte Arthus Bertrand, Paris : 1-157. Atlas Victor Masson, Paris: pl. 497-525

### 2.3. Références normatives

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

**NF P 84-705** Géosynthétiques bentonitiques – Détermination à l'oedoperméamètre des caractéristiques de gonflement, flux et perméabilité des géosynthétiques bentonitiques (GSB) – Essai de caractérisation et essai de performance, AFNOR, avril 2019

**FD P 11-302** Fascicule de documentation – Exécution des terrassements - Réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté - AFNOR, avril 2018

**FD X 30-438** Fascicule de documentation - Installations de stockage de déchets – Guide de bonnes pratiques pour les caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques – AFNOR, juillet 2017

**NF X 30-420** Déchets - Détermination de la perméabilité d'une formation géologique en place, de matériaux rapportés, ou artificiellement reconstitués – Infiltromètres à simple

- anneau, de type fermé – Essai à charge constante et essai à charge variable, AFNOR, septembre 2012
- NF X 30-424** Détermination du coefficient de perméabilité d'un terrain par essai d'infiltration à charge constante en forage. AFNOR, juin 2013
- NF EN 14196** Géosynthétiques – Méthodes d'essai pour la détermination de la masse surfacique des barrières géosynthétiques argileuses, AFNOR, juillet 2004
- NF P 84-703** Géosynthétiques bentonitiques – Détermination de la capacité de gonflement de l'argile dans les géosynthétiques bentonitiques, AFNOR, août 2002
- NF P 94-048** Sols : Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en carbonate – Méthode du calcimètre, AFNOR, octobre 1996
- NF X 31-130** Méthodes chimiques – Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles, AFNOR, mai 1993
- NF P 11-300** Exécution des terrassements – Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, AFNOR, septembre 1992

## **2.4. Démarche méthodologique**

La démarche méthodologique de cette analyse se réfère au contenu mentionné dans le guide du MEEDDAT (2009), à savoir :

1. Synthèse des contextes géologique et hydrogéologique
2. Inventaire des cibles potentielles
3. Représentation d'un schéma conceptuel du projet dans son environnement
4. Projet de dispositif de barrière passive
5. Aptitude des géomatériaux comme composante d'une barrière reconstituée
6. Evaluation de la stabilité mécanique des flancs de l'installation
7. Evaluation semi-quantitative en termes d'impact sur la ressource en eau

Les cinq (5) premiers points permettent d'apprécier globalement le site et le projet de la barrière de sécurité dans leur environnement proche et lointain. Il s'agit là d'une approche qualitative au sens d'une évaluation du risque liée à une installation classée.

Le dernier point (7) représente l'approche quantitative puisqu'elle permet de répondre à la question suivante : « Toutes choses étant égales par ailleurs, est-ce que la configuration proposée pour la barrière de sécurité passive procure un niveau de protection équivalent à

celui que procure la configuration de base prévue par la réglementation en vigueur ? » (MEEDDAT, 2009).

Les données qui permettent le dimensionnement de la barrière de sécurité passive du projet sont les éléments suivants (AFNOR, 2017), avec notamment :

1. Cote NGF projetée du fond de forme des casiers
2. Niveau statique des plus hautes eaux
3. Perméabilité et épaisseur de la barrière
4. Disposition constructive équivalente

Enfin, l'analyse critique est assortie d'un avis motivé.

## **2.5. Rappel des données de l'étude**

Le contenu de l'étude (ISS Environnement, 2009) comporte en partie les différents points nécessaires à l'établissement d'une note pour l'évaluation en étanchéité passive d'une installation de stockage.

Ces différents points reprennent en partie le formalisme des éléments du rendu mentionnés dans le guide (MEEDDAT, 2009) et sont présentés en paragraphes distincts, avec :

1. Géologie de l'extension
2. Contexte hydrogéologique
3. Perméabilité du substratum
4. Reconstitution de la barrière passive

De ce point de vue, le contenu général de l'étude peut être conforme aux attentes. Dans le détail, si certains points sont documentés, en revanche, d'autres le sont moins, voire sont absents de toute documentation. A ce sujet, il est utile de rappeler que l'étude d'équivalence est un document auto-porteur qui se suffit à lui-même afin d'apprécier le contexte environnemental vis-à-vis de l'ouvrage projeté.

Quels sont les éléments d'appréciation qui manquent au dossier (ISS Environnement, 2009) ?

- Une esquisse piézométrique déduite des observations saisonnières et pluriannuelles permettant de connaître la fluctuation annuelle et inter-annuelle de la nappe phréatique (celle contenue dans les formations superficielles)
- Le renseignement de l'utilisation ou non de la ressource en eau pour un usage industriel, agricole voire domestique
- Le schéma conceptuel détaillé du projet dans son environnement avec les termes source, transfert et cible
- Le renseignement des cotes altimétriques en NGF au droit des différents matériaux représentant le scénario réglementaire et alternatif et la mention à une ressource en eau avec son niveau des plus hautes eaux
- La stabilité géomécanique des flancs des casiers

- La référence à un contrôle qualité de mise en œuvre des différents géomatériaux constituant la barrière de sécurité passive et notamment les essais qui y sont associés (notamment dans le cas des flancs avec la présence d'un géosynthétique bentonitique).

Toutefois, ces différents éléments de l'approche qualitative du projet dans son environnement proche et lointain sont présents ici et là dans les différentes pièces accompagnant la demande d'autorisation d'exploiter l'installation.

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, d'un milieu saturé et d'un domaine à une dimension (1D). Le choix du mode de calcul fait référence à un type d'écoulement à travers la barrière passive en mode hydro-dispersif (convection et diffusion), dont le terme source se place verticalement au-dessus d'un terme cible, si bien que le transport s'effectue du haut vers le bas. La résolution de l'écoulement et du transport de masse de solutés (fluide miscible) à travers la barrière est évaluée dans l'aquifère est réalisée grâce au développement mathématique de la relation de Darcy (1856) et de la loi de Fick (1855).

Les calculs permettent de comparer les performances de plusieurs systèmes de barrières de conceptions différentes en terme de temps de transfert d'un soluté non retardé, non dégradé à travers les différentes barrières de sécurité passive. Autrement dit, « deux barrières d'étanchéité passive seront considérées comme étant équivalentes, lorsqu'elles assurent un même niveau de protection en termes d'impact potentiel du site de stockage sur une ressource en eau souterraine » (MEEDDAT, 2009).

Quels sont les éléments du dimensionnement (ISS Environnement, 2009) qui nous paraissent peu clairs ?

- La résolution de l'équation de Darcy et de celle de Fick est seulement attribuée au niveau semi-perméable de la barrière de sécurité passive
- Le niveau de faible perméabilité de la barrière de sécurité passive ne bénéficie pas de la loi de Fick afin d'évaluer le temps de transfert
- Le cas des flancs des casiers n'est pas abordé

## **2.6. Enjeux environnementaux**

L'absence des différents points listés dans le paragraphe ci-dessus et faisant référence à l'approche qualitative n'est pas pour autant rédhibitoire à l'acceptation de l'étude (ISS Environnement, 2009).

En effet, ces différents éléments sont en majorité versés dans l'étude géologique et hydrogéologique du site (ISS Environnement, 2007, 2009) et de son aménagement en vue d'y créer de nouveaux casiers (Alpes Ingé, 2014).

En mettant en regard la chronique des données piézométriques mesurées au droit du site puis l'esquisse piézométrique qui en découle avec le plan « Vue en plan fond de fouille », (Alpes

Ingé, 2014), il est constaté qu'il existe un niveau non saturé en place au droit des différents casiers égal à au moins deux (2) mètres d'épaisseur. En effet, la cote altimétrique d'arase la plus basse est située au droit du casier E3 avec une cote d'arase égale à + 137 m NGF. Au droit de ce point bas, la surface piézométrique de la nappe contenue dans la formation géologique des Sables et Grès de Lamnay du Cénomanien inférieur est égale à +135 m NGF.

Note : La formation des Sables et Grès de Lamnay est une formation géologique inscrite à la définition de l'étage géologique du Cénomanien. Elle est donc constitutive du stratotype défini par d'Orbigny (1847) puis Juignet (1974). En effet, le secteur de Montmirail et plus largement la partie septentrionale et orientale du département de la Sarthe possède un intérêt géologique car de nombreux sites y sont référencés comme sites d'étude du stratotype, voire comme sites appartenant au Cénomanien stratotypique (Juignet, 1974, Morel, 2015, Mary in GFC, 2016).

La définition de ces enjeux environnementaux aboutit à une nouvelle représentation du schéma conceptuel de la barrière de sécurité passive.

Ce schéma descriptif fait apparaître les différents niveaux des dispositifs réglementaire et alternatif avec respectivement « am » (celui de l'arrêté ministériel) et « sa » (celui de du scénario alternatif) en figure ci-dessous. Il donne pour chacune des couches constituant la barrière de sécurité passive, leur épaisseur et perméabilité respectives.

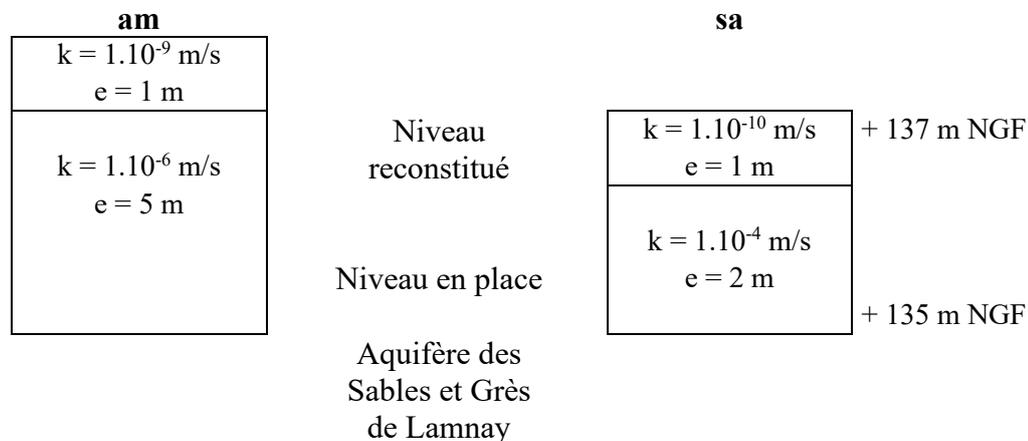


Figure 1 : Dispositif en fond de la barrière au sens de l'arrêté ministériel (am, à gauche), Dispositif équivalent proposé en solution alternative (sa, à droite)

Légende :

**k, e :** Coefficient de perméabilité (k), épaisseur (e)

## 2.7. Nouvelle simulation

L'impact de sources de pollution sur les eaux souterraines est un problème important pour plusieurs domaines d'activité. Etablir le risque de pollution des eaux souterraines est devenu un aspect essentiel de la gestion des sites et sols potentiellement pollués, ou pour le

dimensionnement des sites de stockage de déchets. Par rapport aux modèles numériques, les modèles analytiques sont généralement utiles à un stade amont d'un projet, notamment pour du dimensionnement, lorsque l'information concernant la complexité du milieu naturel est peu disponible. Un des principaux atouts des modèles numériques est leur capacité à prendre en compte cette complexité, et notamment l'hétérogénéité du sous-sol ou des conditions aux limites complexes. Les solutions analytiques, par contre, supposent que la géométrie du domaine simulé soit relativement simple.

Malgré leurs limites, les modèles analytiques peuvent être très utiles pour des analyses simplifiées, et sont de ce fait très utilisés. C'est pourquoi nous optons pour le recours à un modèle analytique (MEDAD, 2008, BRGM, 2008). Dans notre cas, le recours à un régime transitoire n'est pas indispensable dans le sens où la concentration initiale du soluté traceur ne varie pas dans le temps, elle demeure constante et égale à 1. En revanche, il permet de connaître à quel moment telle ou telle concentration apparaît en sortie de barrières.

La résolution de l'écoulement et du transport de masse de solutés (fluide miscible) est réalisée grâce à la relation mathématique de Lapidus et Amundson (1952) suivante :

$$\frac{\delta(c)}{\delta(t)} = \frac{\delta(c)}{\delta(z)} \left( D \frac{\delta(c)}{\delta(z)} \right) - u \frac{\delta(c)}{\delta(z)} \quad (1)$$

La résolution de l'équation de dispersion aux dérivées partielles (1) en une solution analytique (2) demande la définition de conditions aux limites et initiales. Dans notre cas, ces conditions portent sur la concentration et à son évolution dans l'espace ( $z$ ) et le temps ( $t$ ) en considérant la superposition des phénomènes de diffusion ( $D$ ) et d'advection ( $u$ ). Ainsi, pour une concentration source constante ( $c(0, t) = c_0$ ) et pour une injection à l'instant zéro de solutés dans un milieu de concentration initiale nulle ( $c(z, 0) = 0$ ), la dérivée de l'équation de dispersion (1) aboutit à la solution analytique (2) d'Ogata et Banks (1961) :

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{z-ut}{\sqrt{4Dt}} \right) + \exp \left( \frac{uz}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{z+ut}{\sqrt{4Dt}} \right) \right] \quad (2)$$

Où :

$$\operatorname{erfc}(\beta) = 1 - \operatorname{erf}(\beta)$$

$$\exp(x) = e^{(x)}$$

$\operatorname{erfc}$  est la fonction erreur complémentaire de  $\beta$

$\exp$  est la fonction exponentielle de  $x$

Le deuxième terme de cette expression analytique est généralement très petit par rapport au premier, si bien qu'il pourra être négligé (Marsilly de, 1981), pour donner :

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{z-ut}{\sqrt{4Dt}} \right) \right] \quad (3)$$

Où :  $u = \frac{q}{w}$  et  $q = K \left( \frac{h+z}{z} \right)$  (4 et 5)

$$D = \alpha_L u + D_0 \tau \quad (6)$$

Avec :

$c/c_0$  est le rapport des concentrations initiales (avec  $c_0 = 1$ ) et d'arrivée (L/T)

$u$  est la vitesse moyenne de la solution (L/T)

$D$  est la composante dispersive-diffusive dans la direction longitudinale (parallèle à l'écoulement) ( $L^2T^{-1}$ )

$z$  est l'épaisseur totale de la barrière de sécurité passive (L)

$t$  est le temps (T)

$q$  est le flux de Darcy ( $L^3/L^2T^{-1}$ )

$k$  est le coefficient de perméabilité ( $LT^{-1}$ )

$h$  est la charge hydraulique (L)

$w$  est la porosité cinématique

$\alpha_L$  est le coefficient de dispersivité longitudinale (L)

$D_0$  est le coefficient de diffusion dans l'eau pure du traceur ( $L^2T^{-1}$ )

$\tau$  est le facteur de tortuosité

Ce mode de calcul permet de comparer les performances hydrauliques de plusieurs systèmes de barrières de conceptions différentes en terme de temps d'arrivée en bas de barrières d'un soluté-traceur (les ions chlorures). A concentration relative égale (exprimée par le rapport  $c/c_0$ ), plus le temps de restitution est court et moins la barrière est performante.

Dans notre cas, les hypothèses de calcul peuvent se résumer aux conditions suivantes :

- 1) Le milieu est considéré comme étant poreux, homogène, isotrope, indéformable et saturé en eau (pour la couche « limitante »),
- 2) Le calcul du transfert massique des solutés en mode diffusif nécessite la sélection d'un traceur, en l'occurrence les chlorures ( $R = 1$ )
- 3) Le calcul du flux de Darcy à travers la barrière de sécurité passive est conduit en considérant un écoulement de l'eau uniforme et unidirectionnel dans le plan par advection
- 4) La recharge en soluté (terme source) est supposée infinie dans le temps ( $\lambda = 0$ )
- 5) La concentration initiale du terme source est supposée unitaire dans le temps
- 6) L'interaction de la phase liquide interstitielle avec la phase solide de la barrière géologique est considérée comme nulle

Pour toutes ces raisons, nous pouvons considérer que le calcul sera mené en considérant un ensemble d'hypothèses maximalistes (majorant le risque). Le choix d'un traceur parfait, non retardé, non dégradé avec une concentration unitaire constante est sécuritaire. En choisissant par exemple, une concentration relative égale au  $1/100^{\text{ème}}$  de la concentration du terme source ( $c/c_0 = 1,0E-02$ ), le temps d'arrivée à la base de la barrière est plus important dans le cas du scénario alternatif que dans le cas du scénario réglementaire (se référer à la figure ci-dessous).

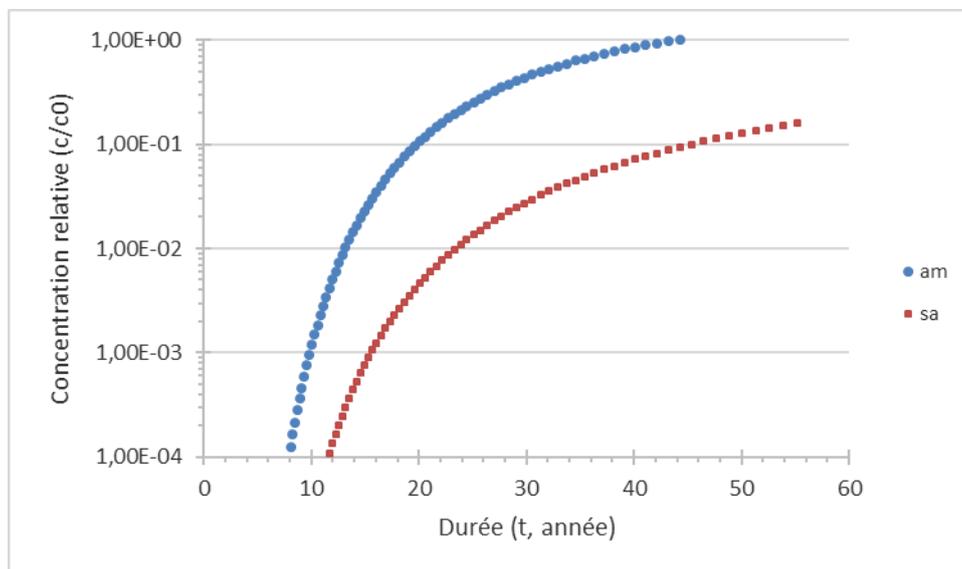


Figure 2 : Courbes de restitution en sortie des barrières de sécurité passive (en bleu, le scénario réglementaire, en rouge, le scénario alternatif)

## 2.8. Recommandations

Il est recommandé de procéder à une étude géotechnique en laboratoire visant à qualifier le matériau susceptible d'être candidat à la reconstitution du niveau de faible perméabilité. Cette étude en laboratoire a pour objectif d'identifier le gisement de matériaux, de définir les caractéristiques de compactage du matériau et sa formulation s'il y a lieu d'en améliorer le potentiel d'étanchéité par apport d'adjuvant (AFNOR, 2017, 2018). Cette étude géotechnique devra faire l'objet d'une expertise par un laboratoire de géotechnique environnementale indépendant (MEEDDAT, 2009) de manière à valider le ou les scénario(s) retenu(s). Dans tous les cas, la mise en œuvre du matériau nécessitera au préalable la réalisation d'une planche d'essais avant sa généralisation à l'échelle du casier. Cette planche permettra de définir pour les engins disponibles la méthodologie de mise en œuvre du matériau et sera instrumentée par des essais de perméabilité (AFNOR 2017, 2018, BRGM 2005) afin de contrôler ses caractéristiques hydrauliques (NF X 30-420 et NF X 30-424).

Dans le cas du géosynthétique bentonitique nous retiendrons les caractéristiques minimales suivantes avec une bentonite sodique encapsulée par aiguilletage entre deux nappes de géotextiles et dont i) la masse surfacique en bentonite (à teneur en eau sèche) est égale à au moins  $5 \text{ kg/m}^2$  (NF EN 14 196), ii) la proportion en carbonate de calcium reste inférieure à 5 % (NF P 94-048), iii) la capacité d'échange cationique est au moins égale à 75 milliéquivalents par 100 g, ou  $75 \text{ meq/100g}$ , (NF X 31 130).

Ces différentes grandeurs seront validées en laboratoire par des essais de caractérisation, avec en plus, l'indice de gonflement libre de la bentonite contenue dans la nappe du géosynthétique

(NF XP P 84-703). Sa mise en œuvre devra également faire l'objet d'un suivi par un organisme tiers (notamment lors des opérations de réception du fond de forme et lors de son application). En tout état de cause, l'entreprise d'application se rapprochera des prescriptions de mise en œuvre du fournisseur et fera référence à l'état de l'art en la matière (CFG, 2010, MEEDDAT, 2009).

Les flancs périmétriques du casier peuvent se décliner en deux configurations (de bas en haut). La première (en bas de talus) fait référence à l'apport d'un géomatériau de façon à créer une forme en cuvette « étanche » en pied de talus conformément aux prescriptions de la réglementation (JORF, 2016). Au-delà de cette cuvette étanche et jusqu'en tête de flancs périmétriques, une nappe de géosynthétique bentonitique sodique viendra garantir la performance hydraulique de la barrière. (se reporter à la figure ci-dessous).

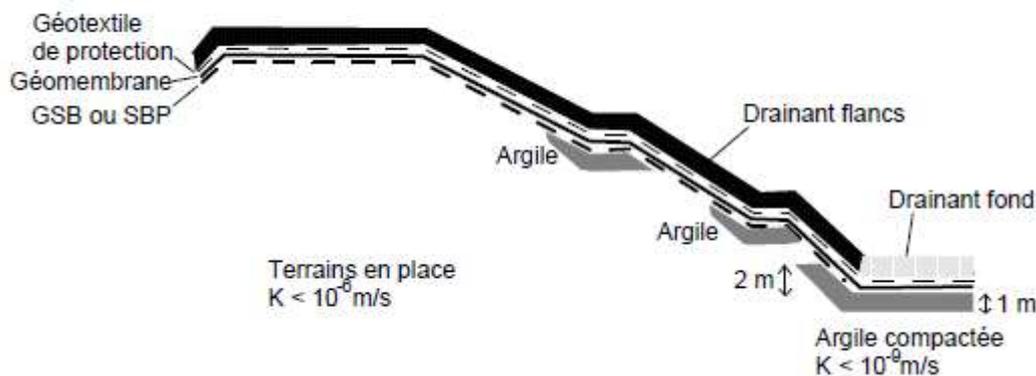


Figure 3 : Exemple de configuration en flancs avec des risbermes pour couper les pentes (source : guide MEEDDAT, 2009)

La largeur des recouvrements des lés de la nappe de GSB sera déterminée en fonction de la longueur des rampants en talus (CFG, 2010), avec :

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

Dans le cas des flancs des installations de stockage de déchets, un calcul d'équivalence est toujours possible mais sa réalité physique sera toujours délicate à concevoir et sa validité difficile à démontrer. Aussi, il est préférable de réserver le calcul à la vérification de leur stabilité au glissement car la composante mécanique y est essentielle (sans cette condition, le DEDG ne fonctionne plus).

## 2.9. Avis motivé

L'examen des pièces et leur analyse ainsi que la consultation des données scientifiques et techniques ont permis de répondre à la demande de l'unité Départementale de la Sarthe (courrier DREAL, juillet 2019).

La réponse à la question de l'équivalence a nécessité une nouvelle simulation prenant en compte le contexte hydrogéologique et les enjeux environnementaux du site. Ainsi, cette tierce expertise s'appuie sur la méthodologie développée par le guide du MEEDDAT (2009), à savoir une approche qualitative et quantitative. L'approche quantitative a permis de démontrer l'équivalence en étanchéité passive du fond de casier de l'installation de Vaugarniers située à Montmirail (72).

Cet avis est assorti d'un ensemble de préconisations portant à la fois sur la barrière de sécurité passive tant en fond, qu'en flancs.

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

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

En conséquence, il est approprié de donner au dispositif du casier un **avis favorable** (sous réserve que les préconisations soient suivies d'effet).

### 3. Conclusion

La solution d'équivalence proposée est démontrée par une méthodologie, (évaluation qualitative du risque en scénario semi-générique) et des calculs en mode hydro-dispersif (MEEDDAT, 2009). Cette méthodologie permet de comparer les performances de plusieurs systèmes de barrières de conceptions différentes, et ce avec des hypothèses de calcul maximaliste.

Les calculs permettent de démontrer que le scénario proposé par le pétitionnaire est au moins équivalent à celui préconisé par l'arrêté ministériel (JORF, 2016).



Alain Couradin

**METED\_K**

Laboratoire de géotechnique environnementale

## 4. Annexes

### 4.1. Sites d'études du stratotype Cénomaniens

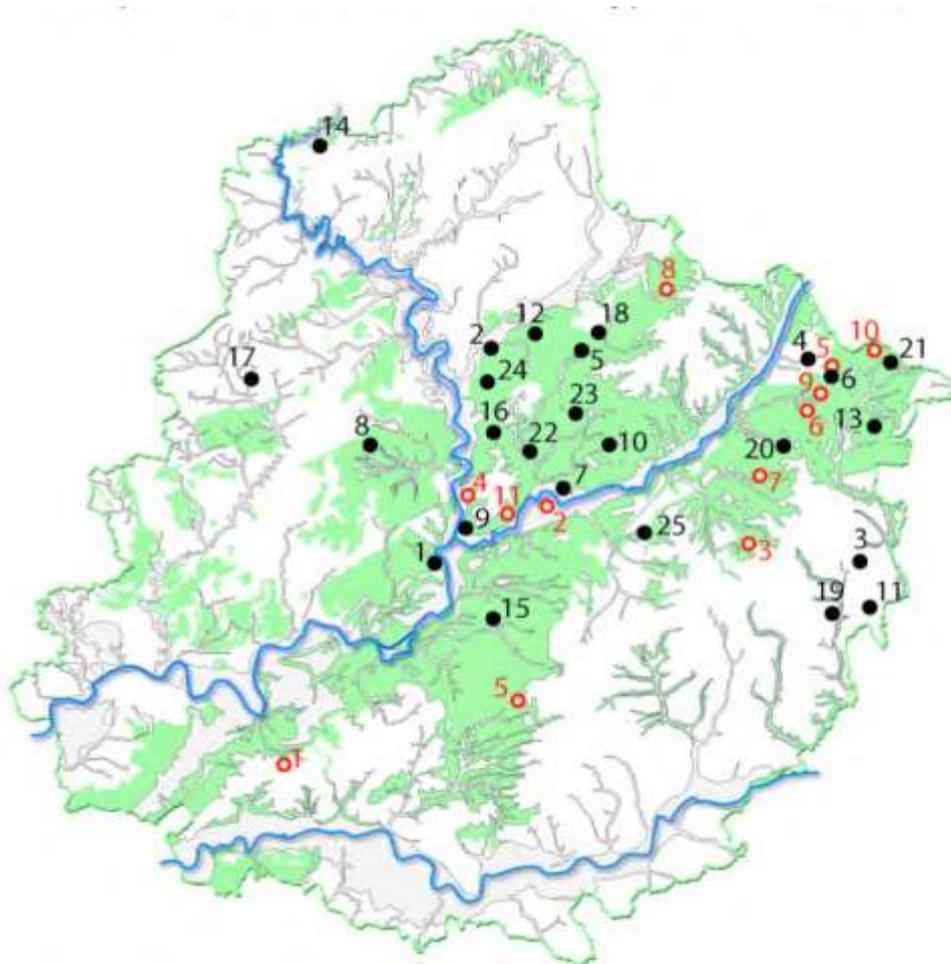


Figure 4 : Le Cénomaniens en Sarthe et les principaux sites d'études du Stratotype (Morel, 2015)

#### Affleurements encore existants :

- |                               |                         |
|-------------------------------|-------------------------|
| 1- Allonnes                   | 14- Moulin-le-Carbonnel |
| 2- Ballon                     | 15- Mulsanne            |
| 3- Conflans-sur-Anille        | 16- Neuville-sur-Sarthe |
| 4- Cormes                     | 17- Rouez               |
| 5- Courcemont                 | 18- Sables              |
| 6- Courgenard                 | 19- Saint-Calais        |
| 7- Fatines                    | 20- Saint-Maixent       |
| 8- Lavardin                   | 21- Saint-Ulphace       |
| 9- Le Mans                    | 22- Savigné-l'Évêque    |
| 10- Lombron                   | 23- Sillé-le-Philippe   |
| 11- Marolles-lès-Saint-Calais | 24- Souigné-sous-Ballon |
| 12- Mézières-sur-Ponthouin    | 25- Soultré             |
| 13- Montmirail                |                         |

#### Affleurements disparus :

- 1- Bousse
- 2- Champagné
- 3- Coudrecieux
- 4- Coulaines
- 5- Écommoy
- 6- Lamnay
- 7- Lavaré
- 8- Nogent-le-Bernard
- 9- Saint-Jean-des-Échelles
- 10- Théligny
- 11- Yvré-l'Évêque

## 4.2. Coupe géologique du stratotype et les sites parastratotypiques

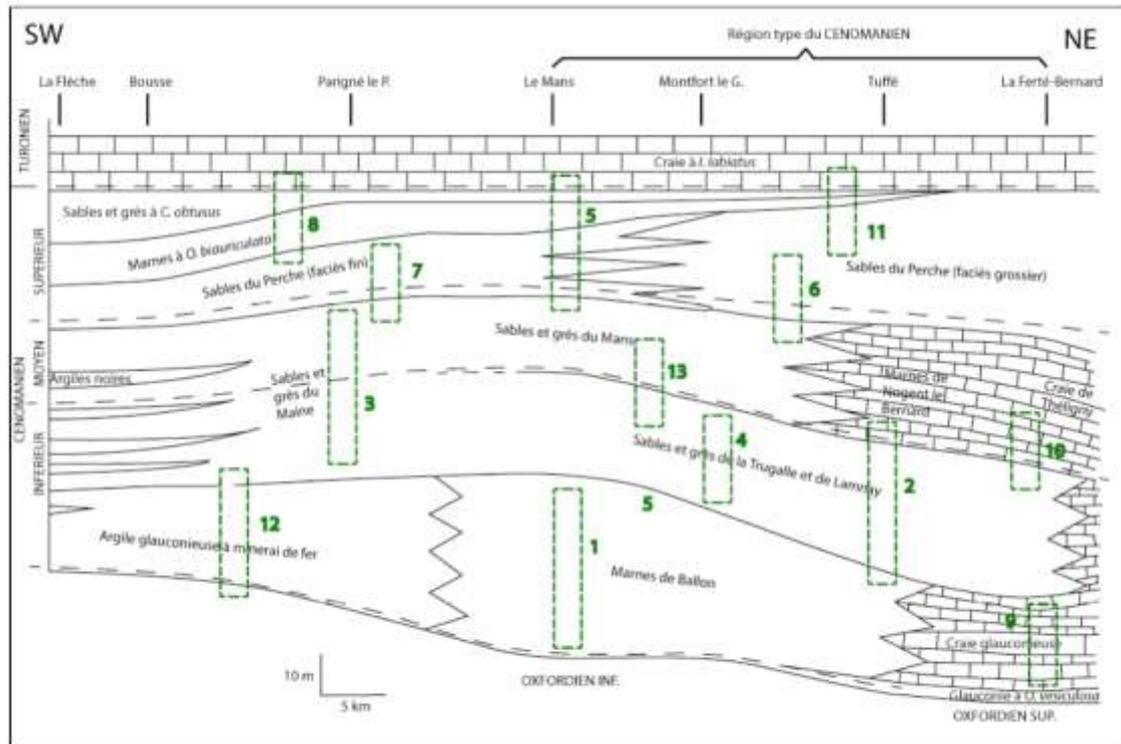


Figure 5 : Le Cénomaniens en Sarthe et les quatorze (14) sites parastratotypiques retenus dans le cadre des travaux de l'IRPG/INPG (Morel, 2015, Mary in GFC, 2016)

IRPG : Inventaire Régionale du Patrimoine Géologique

INPG : Inventaire National du Patrimoine Géologique

- |   |   |
|---|---|
| 1. Coteau du château de Ballon (Ballon)     | 8. La Crêle (Mézières-sur-Ponthouin)      |
| 2. Sables (Briosne-lès-Sables)              | 9. Le Cormier (Cormes)                    |
| 3. La Croix Malingre (Souligné-sous-Ballon) | 10. La Garenne (Saint-Ulphace)            |
| 4. La Petite Touche (Neuville-sur-Sarthe)   | 11. Les Frépinières (Conflans-sur-Anille) |
| 5. Coteau de Gazonfier (Le Mans)            | 12. La Pouplinière (Moulins-le-Carbonnel) |
| 6. Parc du Rocher (Allonnes)                | 13. Le Sablon (Mulsanne)                  |
| 7. Thuaudières (Soulltré)                   |   |

Note : S'il fallait situer le site des Vaugarniers à l'intérieur de la figure ci-dessus, il serait positionné entre les sites 2 et 10 au sein de la formation des Sables et Grès de Lamnay. Le site 2 (coupe du chemin de Sables, Briosne-lès-Sables) permet l'observation successive des formations géologiques des Marnes de Ballon, des Sables et Grès de la Trugalle puis des Marnes de Nogent le Bernard. Le site 10 (carrière de la Garenne, Saint Ulphace) permet l'observation successive des formations géologiques des Sables et Grès de Lamnay puis de la Craie de Théligny. Une autre carrière permet d'observer ce passage de faciès entre le Cénomaniens inférieur et moyen, il s'agit de celle dite du Tramway (Juignet, 1974) située sur la commune de Montmirail (IPG72\_FA043).

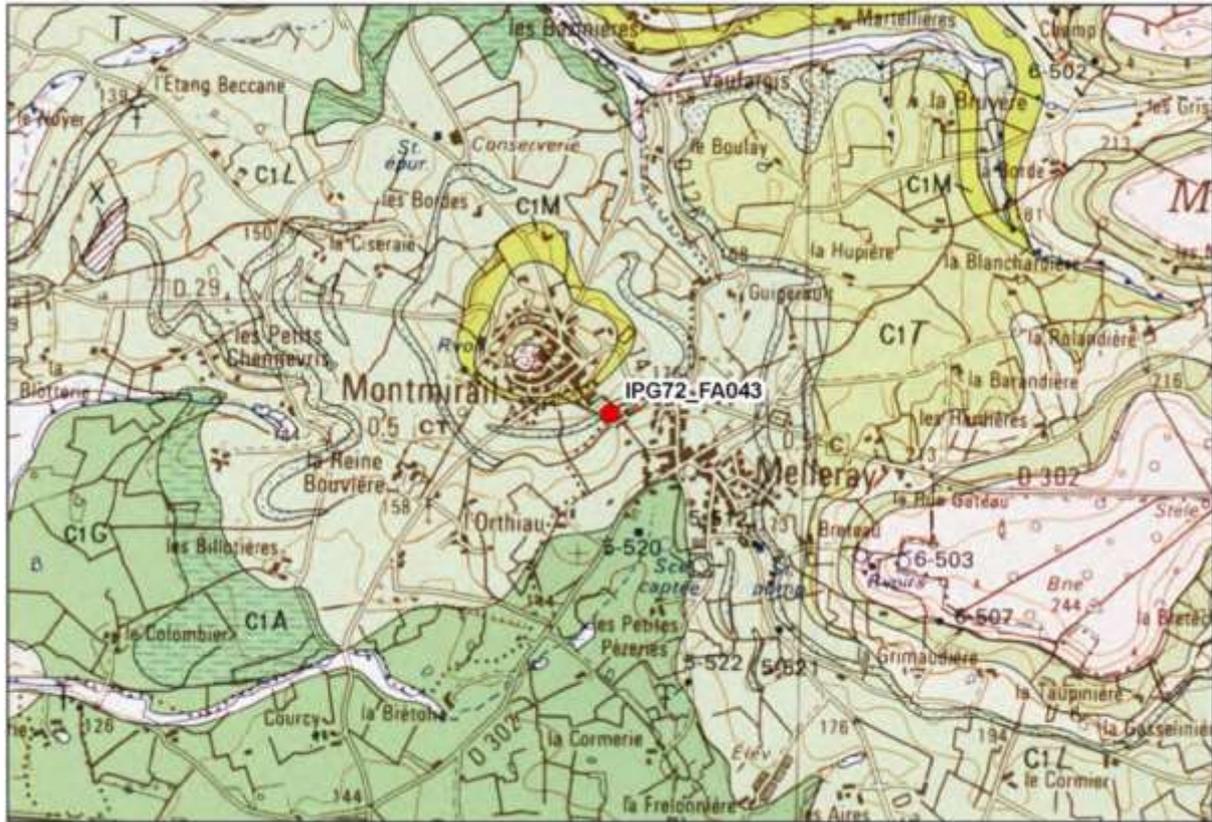


Figure 6 : Situation de la carrière du Tramway, Montmirail (IPG72 FA043)

Le site des Vaugarniers permet l'observation des Sables et Grès de Lamnay et plus particulièrement les faciès géologiques situés à la base de la formation ou tout du moins à sa proximité. Ces faciès sont livrés en affleurement grâce aux travaux d'excavation réalisés par l'entreprise NCI ENVIRONNEMENT alors que Juignet (1974) a plus particulièrement décrit les faciès géologiques sommitaux de la formation. D'autre part, il est utile de signaler la présence d'une formation marneuse et glauconieuse en lieu et place aux Sables et Grès de Lamnay (casier 12 SE, Couradin, 2018). Il est difficile de se prononcer sur l'attribution de ce faciès étant donné qu'il n'a pas été observé ni décrit dans le passé au droit du site des Vaugarniers (72). Il s'agirait soit d'un passage latéral de faciès contenu dans les Sables et Grès de Lamnay, soit d'un contact anormal à la faveur d'un décrochement mettant alors à la même côte altimétrique les Sables et Grès de Lamnay avec les faciès de la formation géologique de la Craie Glauconieuse voire celle des Marnes de Ballon.

### 4.3. Simulation d'une équivalence stricte

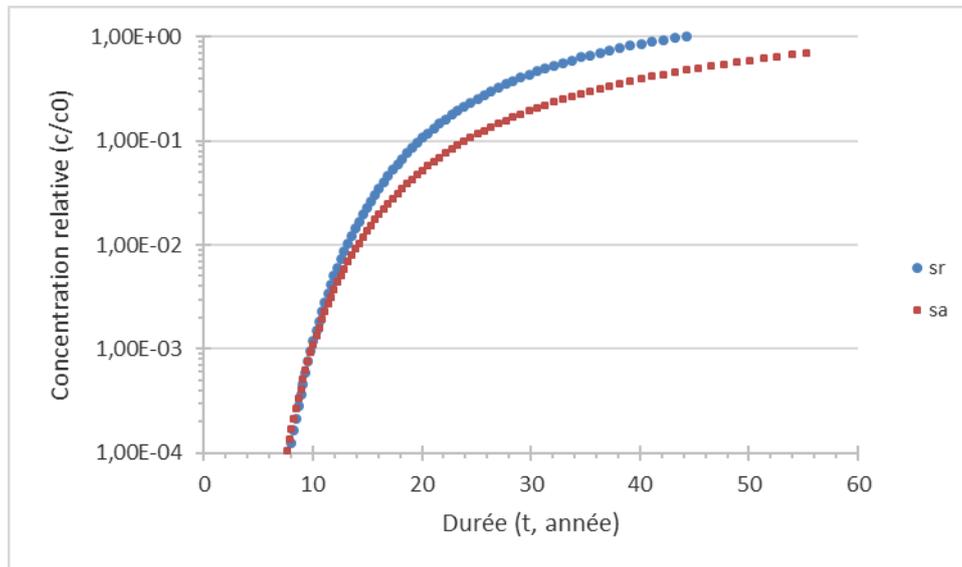


Figure 7 : Courbes de restitution en sortie des barrières de sécurité passive (en bleu, le scénario réglementaire, en rouge, le scénario alternatif) – Cas d'une stricte équivalence entre les deux barrières

Dans ce cas, le niveau de faible perméabilité reconstitué avec une épaisseur au moins égale à 1 mètre possède une perméabilité au moins égale à  $3.10^{-10}$  m/s.