

CONCEPTION DE LA COUVERTURE D'UN ENTREPOSAGE DE RÉSIDUS RADIOACTIFS DE PROCÉDÉ

DESIGN OF AN ENGINEERED COVER FOR THE INTERIM STORAGE OF RADIOACTIVE PROCESS WASTE

François CAZEAUX¹, Thierry GISBERT², Jean-Sébastien FLINOIS³

¹ Arcadis, Labège, France

² Arcadis, Le Plessis Robinson, France

³ Areva, Narbonne, France

RÉSUMÉ – Cet article présente l'étude de conception de la couverture d'un entreposage de résidus radioactifs de procédé issus d'une installation de conversion d'uranium, dont la durée de vie prévisionnelle est d'une quarantaine d'années. Une solution de couverture par géomembrane exposée a été retenue et sa performance évaluée compte tenu des contraintes du site. Les objectifs de cette couverture sont : isoler les déchets, limiter l'émission de poussières et les infiltrations, maintenir les conditions physico-chimiques initiales. Le choix s'est porté sur une géomembrane bitumineuse modifiée par un élastomère. Sur la base de retours d'expérience et d'expérimentations récentes, nous avons évalué les flux attendus, à terme, au travers de cette couverture.

Mots-clés : couverture, géomembrane bitumineuse, vieillissement, flux, radioactif

ABSTRACT This paper presents the design of an engineered cover which has been selected for the capping of a storage dedicated to radioactive processing waste of a uranium conversion facility for an expected lifetime of 40 years. A solution with exposed geomembrane has been selected and its performances evaluated, to take into account the specific constraints of the site. The aims of this capping system are: barrier behavior, limitation of dust and infiltrations, and conservation of the initial physico-chemical conditions of the residues. An elastomeric bituminous geomembrane has been selected. Based on experience, case studies and recent experimentations, we evaluated the forecasted hydraulic behavior of this future cover.

Keywords: cover, bituminous geomembrane, aging, flow, radioactive

1. Introduction

Le procédé de conversion d'uranium exploité par l'usine Comurhex de Malvézi conduit à la production d'effluents de procédé, qui sont décantés puis évaporés dans différents bassins. Jusqu'en 2004, la séparation solide/liquide s'est effectuée dans les bassins de décantation B1 et B2, qui se sont remplis au fur et à mesure de la fraction solide des effluents, le surnageant étant transféré vers d'autres bassins pour concentration par évaporation naturelle.

Les anciens bassins B1 et B2, aujourd'hui asséchés, représentent une superficie de l'ordre de 6 ha. Ils ont été exploités dans les stériles miniers d'une ancienne mine de soufre, formant un tumulus surplombant les terrains avoisinants d'une vingtaine de mètres. Le contenu de ces bassins est à l'état solide. Il est constitué de boues radioactives de consistance plastique et recouvertes d'une épaisseur décimétrique à métrique de terre argilo-caillouteuse.

Le projet de couverture de ces bassins, objet du présent article, s'inscrit dans le cadre de la révision de l'ensemble du système de gestion des effluents de procédé de l'usine. L'objectif est de maîtriser l'impact environnemental de l'entreposage actuel.

Pour Comurhex, la mise en sécurité de ces déchets pour une durée d'une quarantaine d'années permettra l'attente nécessaire pour la définition et la mise en place d'une solution de gestion définitive.

Après avoir exposé les contraintes de conception propres au site, les fonctions requises, les objectifs assignés à cette couverture et les raisons de choix du système de couverture par géomembrane bitumineuse exposée, l'étude présente l'évaluation des flux attendus au terme de la durée de vie de l'ouvrage en prenant en compte le vieillissement de la géomembrane.

Cette évaluation s'appuie sur les retours d'expérience et sur des mesures de flux récemment réalisées sur géomembranes bitumineuses exposées (Touze-Foltz et al., 2011, 2013).

2. Bases de conception de la couverture

2.1. Objectifs de la couverture

Les objectifs de la couverture d'étanchéité des bassins B1 et B2 du site Comurhex Malvesi sont :

- la prévention des envols de poussières,
- la limitation des entrées d'eaux météoriques, susceptibles d'entraîner des matières radioactives et des substances chimiques à l'extérieur de l'installation, par lixiviation,
- le maintien de conditions physico-chimiques réductrices dans l'entreposage (favorables à la stabilité chimique des résidus).

2.1.1. Prévention des envols de poussières

La couverture doit résister aux agressions climatiques (UV, températures), aux efforts de soulèvement dus au vent, aux agressions chimiques et aux contraintes mécaniques.

2.1.2. Limitation des infiltrations d'eaux météoriques

L'imperméabilité de la couverture est recherchée. La mise en œuvre d'une géomembrane permettra de remplir ce rôle sur le long terme dès lors que son intégrité physique sera maintenue et que les effets du vieillissement ne conduiront pas à une augmentation significative de sa perméabilité.

L'objectif assigné à la couverture est de garantir, pendant la durée de vie de l'ouvrage (environ 40 ans), un flux d'eau inférieur à $10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$ (objectif de performance) permettant de garantir un flux acceptable, de l'ordre de $1300 \text{ m}^3/\text{an}$ pour une durée cumulée annuelle de précipitation de l'ordre de 500 h et 6,2 ha de surface couverte.

2.1.3. Maintien des conditions physico-chimiques réductrices

Le maintien des conditions réductrices au sein du massif de stériles miniers est recherché afin de limiter la mobilisation des contaminants vers les résidus miniers sous-jacents.

L'étanchéité de la couverture aura pour effet de limiter les entrées d'eaux météoriques et d'air dans les déchets ce qui génèrera une diminution du flux d'oxygène et favorisera l'établissement pérenne d'un milieu réducteur.

2.2. Contraintes du site

2.1.1. Contraintes climatiques

Le climat dominant de la région de Narbonne est de type méditerranéen. Il présente un ensoleillement exceptionnel, des vents fréquents et violents, de faibles précipitations moyennes, avec une hauteur de l'ordre de 600 mm par an, peu de conditions climatiques extrêmes de type brouillard, gel ou enneigement.

Les UV constituant l'un des principaux facteurs de vieillissement des géomembranes, la résistance aux UV constitue un critère de conception important.

Les risques d'endommagement de la géomembrane par soulèvement liés aux vents constituent également un critère important de choix du matériau sur le site de Malvés.

2.1.2. Contraintes mécaniques (efforts en traction)

La couverture doit être conçue pour résister dans le temps aux sollicitations mécaniques provenant des phénomènes suivants :

- poinçonnement par effet de matériaux durs et saillants du sol support ou par chutes d'objets,
- tassements différentiels induits par le tassement des boues et des résidus miniers,
- efforts de traction sous l'effet de la pente (faibles dans le cas présent puisque les pentes de remodelage seront de 4 à 6° et ponctuellement de l'ordre de 12°).

Les tassements différentiels seront occasionnés par la consolidation des boues sous leur propre poids et celui des matériaux de remblaiement. La conception géométrique en forme de dôme, après remodelage, prend en compte ces tassements différentiels pour éviter la formation de dépressions.

2.1.3. Exposition chimique

Compte tenu des caractéristiques du site et des matériaux à confiner, ce critère de résistance chimique n'a pas été déterminant dans le cas présent.

2.1.4. Intégration paysagère

Compte tenu du caractère industriel de la zone, l'impact paysager lié à la couleur de la géomembrane a été pris en compte pour être réduit autant que possible, mais n'a pas constitué un critère de choix rédhibitoire.

2.1.5. Contraintes d'exploitation

Afin d'en assurer aisément l'entretien et la surveillance par ses propres moyens, Comurhex a souhaité un système de couverture facilement réparable. Cette facilité de réparation se décline en avantages d'exploitation et comprend :

- la simplicité de mise en œuvre,
- la fiabilité des soudures,
- la facilité de contrôle au cours de son exploitation,
- la facilité de réparation en cas d'endommagement.

Les géomembranes bitumineuses sont denses et donc peu faciles à manœuvrer. En revanche, elles se soudent facilement, au chalumeau, en général. Un des grands avantages des géomembranes bitumineuses est la facilité de réalisation des réparations par ajout de « patch » et soudage au chalumeau (figure 2). Les contrôles de soudures s'opèrent visuellement, à la pointe sèche, à la cloche à vide ou par ultrasons.



Figure 2. Exemple de réparation de géomembrane bitumineuse par ajout de patch (photo : Gisbert, 2011)

2.3. Raisons du choix d'une couverture par géomembrane bitumineuse exposée

Le recouvrement de la géomembrane d'étanchéité par des matériaux d'apport a été écarté afin de minimiser l'apport de matériaux extérieurs au site qui devraient ensuite être gérés lors du démantèlement des installations et de la reprise du contenu des bassins dans la filière de gestion définitive. Etant exposée aux agressions climatiques (UV, vents, précipitations), la géomembrane non recouverte va subir un vieillissement plus rapide qu'une géomembrane non exposée. Cependant, ce choix présente l'avantage d'une facilité de contrôle et de réparation, aussi bien lors de la mise en œuvre que durant toute la période d'exploitation. L'auscultation et la reprise des déchets entreposés sont également facilitées par ce système de couverture.

Parmi les matériaux de couverture envisageables :

- l'utilisation d'une géomembrane en PEHD a été écartée en raison des conditions météorologiques locales qui rendent difficiles leur mise en œuvre et leur tenue sur de grandes surfaces par vents forts ;
- l'utilisation d'un géosynthétique bentonitique a été écartée car il nécessite un recouvrement significatif par des matériaux d'apport extérieurs afin d'en garantir le confinement et donc, l'étanchéité.

Le choix du type de géomembrane s'est ainsi porté sur une géomembrane bitumineuse élastomère en raison notamment (Tableau 1):

- de sa masse surfacique (aux alentours de 5 kg/m²) qui s'opposera au soulèvement par le vent ;
- de sa résistance aux poinçonnements et aux déchirures ;

- de son faible coefficient de dilatation thermique, qui permet de garantir un bon contact avec le sol support même en cas de variations importantes de température ;
- de ses propriétés de déformabilité entraînant étirements et/ou déformations sans rupture jusqu'à 45 % de déformation environ ;
- de sa résistance au vieillissement climatique selon les producteurs et les observations (UV, gel, précipitations, chaleur) ;
- des facilités de mise en œuvre et de réparation ;
- des retours d'expérience favorables en conditions exposées et pour des durées de vie comparables à celle envisagée sur Malvesi (une quarantaine d'années).

Les caractéristiques minimales retenues pour cette géomembrane bitumineuse sont reportées dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques minimales de la géomembrane bitumineuse retenue pour la couverture de l'entreposage de résidus de procédé

Caractéristique	Unité	Norme d'essai	Gamme de valeurs type
Nature du liant			Bitume modifié par un élastomère (SBS)
Masse surfacique	kg/m ²	NF EN 1849-2	> 4,5
Épaisseur moyenne	mm	NF EN 1849-2	> 4
Étanchéité à l'eau	m ³ /m ² /j	NF EN 14150	< 10 ⁻⁵ sous 100kPa
Résistance à la rupture en traction	kN/m	NF EN 12311-1	> 15
Allongement à la rupture	%	NF EN 12311-1	> 40
Résistance au poinçonnement statique	kN	NF P 84-507	> 2
Pliabilité à froid	°C	NF EN 1109	< -10
Durabilité		NF EN 12224	Conformité à la Norme NF EN 12224

3. Vieillissement attendu – retours d'expérience

3.1. Retour d'expérience n°1 : Rencontres Géosynthétiques 1999-Durabilité des géomembranes bitumineuses : analyses de prélèvements sur bassins de 10 ans et 20 ans (Potié et al., 1999)

Cet article présente les observations visuelles et des analyses physico-chimiques effectuées sur des prélèvements de deux bassins étanchés par géomembranes en bitume élastomère type SBS (Styrène-Butadiène-Styrène).

Les mesures physico-chimiques des échantillons de géomembrane exposée prélevés sur le premier bassin de 10 ans, avaient montré les résultats suivant :

- pas de variation significative de l'épaisseur,
- pas de variation significative de la résistance en traction - NFP 84-501 (entre 800 et 1000 N/5cm) et de l'allongement à la rupture (40 à 50 %),
- une légère augmentation de la température de pliabilité à froid - mode opératoire UEATc (-10 à -20 °C),
- une légère diminution en surface de la géomembrane du taux de polymère SBS.

L'article conclut « que la géomembrane bitumineuse élastomère du bassin de l'A40 demeure dans un état tout à fait satisfaisant sur le plan du vieillissement chimique et ne s'est pas dégradée » au bout de 10 ans de service.

Le deuxième bassin examiné correspond à un bassin de décantation d'usine réalisé en 1977. L'article indique que « le vieillissement s'est essentiellement produit sur la partie exposée et uniquement en surface, mais sans atteindre une baisse de caractéristiques préjudiciable à l'ouvrage ». La diminution du taux de polymère SBS sur la partie exposée atteint -23 % par rapport au taux initial.

3.2. Retour d'expérience n°2 : Rencontres géosynthétiques 2011 - Performance hydraulique à long terme des géomembranes en bitume oxydé exposées et recouvertes. (Touze-Foltz et al, 2011).

L'étude est destinée à quantifier l'évolution du flux d'eau à travers des géomembranes en bitume oxydé vieilles, exposées ou recouvertes. Les échantillons testés proviennent de six ouvrages distincts, bassins et barrages.

Selon cette publication, toutes les géomembranes neuves présentent des caractéristiques d'étanchéité comparables : flux inférieur à 10^{-6} m³/m²/j pour une charge de 100 kPa (équivalent à une charge d'environ 10 m d'eau). L'échantillon du site 6 (barrage), dont la géomembrane est protégée, présente une valeur de flux équivalente à celle d'une géomembrane neuve, 30 ans après mise en service.

Compte tenu du vieillissement significatif (micro-craquelures) de la géomembrane des sites 1 à 5 (bassins ou barrages de 19 à 26 ans d'âge avec géomembrane non recouverte), le protocole d'essai a dû être adapté par rapport à la norme d'essai NF EN 14150 appliquée sur les géomembranes neuves. La mesure du flux a été effectuée sous des charges hydrauliques moins importantes (charges comprises entre 0,1 et 2 m d'eau) que ce que préconise la norme afin de permettre la mesure avec l'appareillage utilisé (NF EN 14150). Les valeurs de flux obtenus sont reportées sur le graphe de la figure 3.

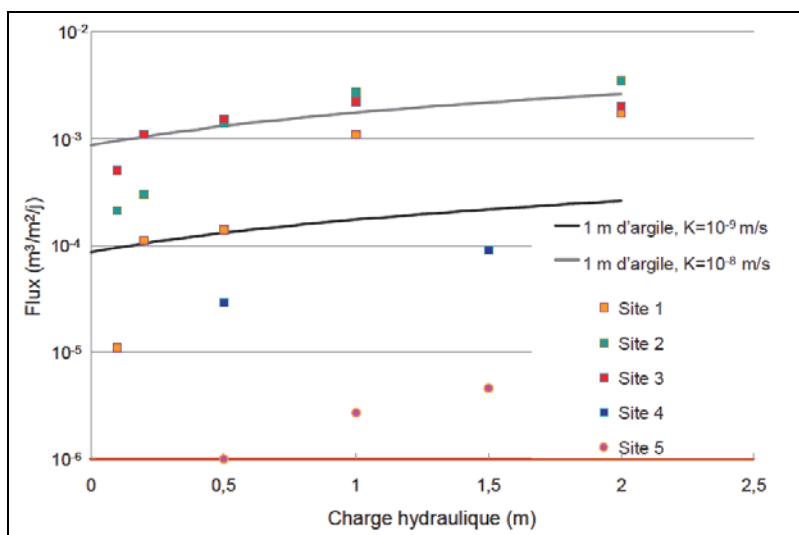


Figure 3. Comparaison des flux obtenus sur échantillons de géomembranes en bitume oxydé, exposées, et vieilles, avec ceux d'une couche d'argile soumise à la même charge hydraulique (Touze-Foltz, 2011)

Cette étude ne concernait que des géomembranes en bitume oxydé. Elle montre qu'après un vieillissement compris entre 19 et 30 ans selon les sites :

- les géomembranes exposées présentent des micro-craquelures de surface non traversantes, tandis que celles qui sont immergées en ont moins et celles qui sont recouvertes n'en ont pas,
- le point de ramollissement bille-anneau (TBA selon NF EN 1427) a augmenté pour toutes les géomembranes testées, ce qui traduit un durcissement du matériau, phénomène général lors du vieillissement de toutes les familles de géomembranes,
- le flux passant à travers une géomembrane vieillie et exposée a augmenté (NF EN 14150). Il est équivalent au flux traversant une couche d'argile de 1 m d'épaisseur et de perméabilité 10^{-8} à 10^{-9} m/s.

3.3. Retour d'expérience n°3 : Rencontres géosynthétiques 2013 – Evaluation de la performance d'une géomembrane bitumineuse après 26 ans en service. (Touze-Foltz et al., 2013)

Dans le cadre de la surveillance environnementale du terril de Watrelos, des prélèvements ont été effectués sur la géomembrane exposée du terril de charrées de chrome de Watrelos, afin de réaliser des essais de flux. Il s'agit d'une géomembrane en bitume oxydé de 3,9 mm d'épaisseur, installée en 1986, sur une surface de 4 ha.

L'inspection visuelle récente montre des craquelures de la surface de la géomembrane, mais sans que celles-ci ne concernent toute l'épaisseur de la géomembrane (figure 4).



Figure 4. Détail des craquelures de la géomembrane bitumineuse du terril de Watrelos - effet peau de Lézard (Photo : Gisbert, 2008)

Les résultats des essais de flux (laboratoire Irstea d'Antony) sur les échantillons de cette géomembrane exposée depuis 25 ans, montrent des valeurs de flux comprises entre $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$ sous 20 cm de charge hydraulique et $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$ sous 1,5 m de charge, ce qui équivaut aux flux de couches d'argile de 1 m d'épaisseur de conductivités hydrauliques comprises entre $5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ et $8 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$.

3.4. Retour d'expérience n°4 : exemple de vieillissement d'une géomembrane bitumineuse élastomère exposée en service depuis 1997

La photo ci-dessous montre les figures de vieillissement d'une géomembrane bitumineuse élastomère exposée aux intempéries depuis 1997 dans un bassin de rétention (figure 5).

Lors de la rédaction de cette publication, cette géomembrane n'avait pas encore fait l'objet d'essais en laboratoire. Cependant, l'exploitant a pu constater que sa fonction étanchéité est conservée 15 ans après la mise en service de l'ouvrage.



Figure 5. Figure de vieillissement d'une géomembrane bitumineuse élastomère, © TERANAP331TP SIPLAST (Photo : Gisbert)

4. Évaluation de la performance hydraulique à long terme de la couverture

La méthode utilisée pour l'étude de la performance prévisionnelle de la couverture de l'entreposage des résidus de procédé du site de Malvesi repose sur l'addition de deux types de flux :

- les flux attendus à terme, en partie courante de la géomembrane, après vieillissement dans les conditions d'exposition du site,
- les flux attendus à terme, du fait de défauts (perforations, soudures défectueuses) non détectables par les moyens de surveillance envisagés (contrôles visuels, contrôles électriques par la méthode du jet d'eau).

4.1. Flux attendu en partie courante de la géomembrane vieillie

Sachant que les géomembranes en bitume élastomère offrent, selon les retours d'expérience présentés précédemment, une résistance au vieillissement climatique supérieure à celle des géomembranes en bitume oxydé utilisées par le passé, nous avons retenu, par précaution, une valeur médiane de flux de 10^{-4} m³/m²/j sous 10 cm de charge (flux équivalent à celui d'une couche d'argile de 1 m d'épaisseur de perméabilité 10^{-9} m/s).

Les géomembranes, dont la fonction est l'étanchéité, ne sont pas des matériaux poreux. Cependant, les gaz et les liquides peuvent migrer à travers une géomembrane intacte par un processus de diffusion, différent du processus advectif (déplacement des particules d'eau dans le milieu sous l'effet de la gravité) régi par la loi de Darcy qui se produit dans les pores d'un matériau. Afin d'évaluer le volume annuel infiltré à travers la géomembrane vieillie, dans les conditions d'exposition du site (durée des intempéries, charge appliquée sur la géomembrane), nous avons d'abord estimé la conductivité hydraulique équivalente à cette valeur de flux, pour un analogue milieu poreux, de même épaisseur, auquel nous pouvons appliquer la loi de Darcy. Nous considérons ainsi la géomembrane vieillie comme un matériau poreux de très faible perméabilité (approximation scientifique peu significative compte tenu du flux retenu au travers de la géomembrane vieillie, compatible avec les gammes de perméabilité d'une argile naturelle). Cette démarche permet ainsi l'estimation du volume annuel infiltré par une méthode de calcul simple.

4.1.1. Calcul de la conductivité hydraulique équivalente pour un analogue matériau poreux de 4 mm d'épaisseur, dont le flux de 10^{-4} m³/m²/j est obtenu pour 10 cm de charge.

Par application de la formule de Darcy décrit dans l'équation 1 :

$$K = \frac{Q_f}{S \times i \times 86400} \quad (1)$$

avec K : conductivité hydraulique équivalente pour un analogue milieu poreux (en m/s), $Q_f = 10^{-4}$ m³/m²/j : débit de fuite intrinsèque pour la géomembrane exposée vieillie, $S = 1$ m² : surface d'infiltration unitaire, i : gradient hydraulique sans dimension où $i = (h+e)/e$, $h = 100$ mm : charge hydraulique, $e = 4$ mm : épaisseur de la géomembrane,

Selon l'équation (1) : $K_{\text{analogue poreux}} = 4,5 \cdot 10^{-11}$ m/s.

4.1.2. Estimation du flux annuel infiltré en partie courante de la géomembrane après vieillissement à partir de l'analogue milieu poreux.

Les conditions d'exposition pluviométriques locales sont d'environ 500 heures de précipitations par an. La couverture présentera une pente suffisante pour permettre un bon écoulement des eaux, l'infiltration se produisant uniquement lors des épisodes pluvieux. La charge hydraulique sera limitée à la lame d'eau de ruissellement, prise de façon majorante à 10 mm.

Par application de la formule de Darcy, comme détaillé dans l'équation 2 :

$$Q = K \times S \times i \times t \times 3600 \quad (2)$$

avec Q : volume annuel infiltré en partie courante de la géomembrane (en m³/an), $K = 4,5 \cdot 10^{-11}$ m/s : conductivité hydraulique équivalente d'un analogue milieu poreux, $S = 62\ 000$ m² : surface de la couverture, i : gradient hydraulique sans dimension où $i = (h+e)/e$, $h = 10$ mm : charge hydraulique, $e = 4$ mm : épaisseur de la géomembrane, $t = 500$ h/an : durée annuelle des précipitations.

Selon l'équation (2) : $Q_{\text{gmb partie courante}} = 17$ m³/an.

4.1.3. Estimation majorante sans prise en compte de la charge hydraulique réelle

Hypothèse : la valeur du flux infiltré in-situ sera équivalente à celle mesurée en laboratoire, soit $10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$ sous 10 cm de charge, sans prendre en compte les bonnes conditions de ruissellement (équation 3).

$$Q = Q_f \times S \times \frac{t}{24} \quad (3)$$

avec Q : volume annuel infiltré en partie courante de la géomembrane (en m^3/an), $Q_f = 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$: débit de fuite intrinsèque, $S = 62\,000 \text{ m}^2$: surface de la couverture, $t = 500 \text{ h/an}$: durée annuelle des précipitations.

Selon l'équation (3) : $Q_{\text{gmb partie courante majorant}} = 129 \text{ m}^3/\text{an}$.

4.2. Flux attendu au droit des perforations et défauts

4.2.1. Débit de fuite au droit d'un défaut

Différentes publications ont été analysées afin d'estimer le nombre et la taille prévisionnels des défauts qui pourraient exister à terme au sein de la couverture. Les données utilisées sont les suivantes :

- densité de défauts dans les géomembranes après mise en œuvre (Barroso et al., 2007),
- causes de défauts dans les géomembranes après mise en œuvre (Nosko, Touze-Foltz, 2000),
- densité de fuites détectées par méthodes électriques sur géomembranes PEHD (Marcotte et al., 2006),
- détection de fuite sur géomembrane bitumineuse par méthode du jet d'eau (Caquel et al., 2006).

À partir de ces retours d'expérience sur installations de stockage de déchets, en tenant compte d'un programme d'assurance qualité rigoureux lors de la mise en œuvre, et de l'absence de recouvrement de la géomembrane par une couche de sol, nous avons retenu un taux prévisionnel majorant de 3 défauts/ha à la mise en œuvre de la géomembrane, et des tailles maximales des défauts de l'ordre de 10 mm (les défauts > 10 mm pouvant être détectés par la méthode du jet d'eau, puis réparés).

La qualité du contact entre la géomembrane et le sol support joue également un rôle important pour limiter l'infiltration au travers des défauts potentiels (le faible coefficient de dilatation thermique de la géomembrane bitumineuse facilite ce contact). Ainsi, le débit de fuite peut être calculé (équation 4) pour une barrière composite simple, à l'aide de l'équation empirique définie pour un défaut circulaire (2 mm < diamètre du défaut < 20 mm) et pour de bonnes conditions de contact entre la géomembrane et la couche minérale faiblement perméable (Giroud, 1997 ; Barroso et al., 2007) :

$$Q_{\text{unit}} = 0,21 h_w^{0,9} a^{0,1} K_s^{0,74} \left[1 + 0,1 (h_w / H_s)^{0,95} \right] \quad (4)$$

avec Q_{unit} : débit de fuite d'un défaut (m^3/s), $h_w = 0,01 \text{ m}$: charge hydraulique au-dessus de la géomembrane, $a = 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$: superficie du défaut circulaire de 1 cm de diamètre, $K_s = 10^{-6} \text{ m/s}$: conductivité hydraulique de la couche support (m/s), $H_s = 0,3 \text{ m}$: épaisseur de la couche support.

Cette équation empirique montre l'importance de la conductivité hydraulique, de la couche support et de la charge hydraulique au-dessus de la géomembrane. La géomembrane étant située en dôme et en contact avec l'atmosphère, la charge hydraulique sera quasi-nulle (nous avons retenu l'hypothèse majorante d'une charge de 10 mm, 500 heures par an, comme pour le calcul du débit de fuite en partie courante). La couche support de la géomembrane sera constituée de matériaux à dominante argilo-limoneuse et pouvant présenter une matrice sableuse. Nous avons retenu, pour cette couche, une conductivité hydraulique de type semi-perméable à 10^{-6} m/s .

Selon l'équation (4) : $Q_{\text{unit}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{j}$

4.2.2. Flux annuel au droit des défauts à la mise en service

Pour 500 heures de précipitations par an et un total de 18 défauts (3 défauts/ha sur 6 ha de couverture), le débit de fuite lié aux défauts non détectables par contrôles est estimé selon l'équation 5 :

$$Q_{\text{annuel-gmb-neuve}} = Q_{\text{unit}} \times N \times \frac{t}{24} \quad (5)$$

avec $Q_{\text{annuel-gmb-neuve}}$: flux annuel au droit des défauts lors de la mise en service (m^3/an), $Q_{\text{unit}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{j}$: débit de fuite unitaire au droit d'un défaut de 1 cm de diamètre, $N = 18$: nombre de défauts sur la surface de couverture, $t = 500 \text{ h/an}$: durée annuelle des précipitations.

Selon l'équation (5) : $Q_{\text{annuel-gmb-neuve}} = 1,5 \text{ m}^3/\text{an}$.

4.2.3. Débit de fuite à terme au droit des défauts de la géomembrane exposée

La géomembrane de la couverture des anciens bassins B1/B2 du site de Malvesi fera l'objet d'un plan de surveillance sur sa durée de vie. Il est cependant apparu judicieux de prendre en compte les risques d'endommagement par chutes d'objets lors des opérations de surveillance et d'entretien. Il a été ainsi considéré l'addition d'une dizaine de défauts de petites dimensions supplémentaires par an (les défauts de plus de 1 cm de diamètre étant repérés et réparés au fur et à mesure des opérations régulières de contrôle et d'entretien). À terme, le nombre de défauts de petites dimensions non détectables serait ainsi de l'ordre de 300, soit environ 50 défauts/ha, générant un débit de fuite de l'ordre de :

$$Q_{\text{annuel-gmb-vieille}} = 25 \text{ m}^3/\text{an}.$$

4.3. Synthèse de l'évaluation de la performance hydraulique à long terme

Le tableau 2 dresse la synthèse de l'estimation prévisionnelle des flux annuels infiltrés au travers de la couverture en géomembrane bitumineuse exposée après environ 30 ans de service (durée de service des retours d'expérience les plus anciens pris en compte dans cette étude). Les flux infiltrés sont également évalués pour la géomembrane neuve immédiatement après mise en service de la couverture, ce qui permet d'évaluer la performance à long terme du dispositif d'étanchéité retenu. Les résultats de cette évaluation conduisent à retenir que la plus grande part du débit de fuite en fin de vie de la couverture est due aux flux infiltrés en partie courante de la géomembrane. Ceci est dû au vieillissement climatique en conditions exposées, et tient compte du programme d'entretien de la couverture qui permettra de limiter les flux infiltrés au droit des défauts de type perforation et déchirure. À l'inverse, les flux infiltrés au travers de la géomembrane neuve le seront essentiellement au droit des défauts potentiels.

Tableau 2. Synthèse des débits de fuite attendus au droit de la couverture bitumineuse de l'entreposage des résidus de procédé

	géomembrane bitumineuse neuve	géomembrane bitumineuse vieillie après environ 30 ans d'exposition
flux infiltré en partie courante de la géomembrane	< 0,1 m ³ /an	17 à 129 m ³ /an
flux infiltré au droit des défauts potentiels	1,5 m ³ /an	25 m ³ /an
<i>Total débit de fuite estimatif</i>	<i>1,5 m³/an</i>	<i>42 à 154 m³/an</i>

5. Conclusion

L'objectif de performance pour la limitation des infiltrations dans l'entreposage de résidus de procédé du site Comurhex de Malvesi a été fixé à un volume annuel maximal de 1300 m³, pour la totalité de la surface. L'estimation des flux annuels, réalisée dans le cadre de l'étude de conception de cette couverture, conduit à un volume croissant au cours du vieillissement de la géomembrane avec au terme de la durée de vie envisagée pour cet ouvrage (une quarantaine d'années), un débit de fuite de l'ordre de 154 m³/an. Ce débit de fuite estimé, rapporté à l'objectif assigné à cette couverture, représente un facteur de sécurité de l'ordre de 10, qui permet de valider la conception de couverture retenue, par géomembrane bitumineuse élastomère exposée, avec mise en place d'un plan de surveillance et d'entretien sur la durée de vie considérée.

Cette évaluation a notamment été réalisée sur la base de retours d'expériences d'utilisation de géomembranes bitumineuses en conditions d'exposition atmosphérique sur des durées supérieures à 20 ans. Les mesures de flux réalisées en laboratoire sur géomembranes vieillies concernent essentiellement des géomembranes en bitume oxydé qui présentent, selon les retours d'expérience publiés, une moindre résistance au vieillissement climatique que les géomembranes en bitume modifié aux élastomères.

La principale difficulté rencontrée pour cette étude concerne le manque de publications de données quantifiées sur le vieillissement en conditions exposées des géomembranes bitumineuses élastomères. La prise en compte des résultats d'essais sur échantillons de géomembranes bitumineuses oxydées constitue donc une approximation volontairement sécuritaire.

6. Références bibliographiques

- Caquel F., Villon G., Florin J.P., Marcotte M. (2006). Évaluation des performances réelles d'un appareil de détection de fuites sur géomembranes. *Actes, Rencontres Géosynthétiques*, pp. 171-176.
- Giroud, J.P. (1997). Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to geomembrane defects. *Geosynthetics International*, 4 (3-4), pp. 335-348.
- Lambert S. (1997) Les géomembranes. *Ingénieries-EAT* 11, 27-40.
- Marcotte M., Rollin A.L., Jacquelin T., Forget B. (2006) Optimisation de l'intégrité globale d'une géomembrane à l'aide de la détection géoélectrique de fuites. *Actes, Rencontres Géosynthétiques*, pp. 223-229.
- Nosko V., Touze-Foltz, N. (2000). Geomembrane liner failure: modelling of its influence on contaminant transfer. *Proc. EuroGeo 2. 2, Bologna, Italy*, pp. 557-560.
- Potie G., Herisson C., Remoulif A. (1999). Durabilité des géomembranes bitumineuses : analyses de prélèvements sur bassin de 10 ans et de 20 ans. *Actes Rencontres Géosynthétiques*, pp. 277-284.
- Barroso, M.; Touze-Foltz, N. Lopes, M.G. (2007). Rate of liquid flow through composite liners due to defects in the geomembrane: recent advances, *Proc. 2^o Seminário Português sobre Geossintéticos, Lisboa, Portugal*, 21 pages. (CD-ROM).
- Touze-Foltz N., Croissant D., Farcas F., Royet P. (2011). Performance hydraulique à long terme des géomembranes en bitume oxydé exposées et recouvertes. *Actes, Rencontres Géosynthétiques*, pp. 349-356.
- Touze-Foltz N., Croissant D., Gisbert T. (2013). Évaluation de la performance d'une géomembrane bitumineuse après 26 ans en service. *Actes, Rencontres Géosynthétiques*, pp. 431-436.