

COUVERTURE D'UN STOCK DE BOUES DE LAVAGE DE GAZ DE HAUTS FOURNEAUX : SITE DE PONT À MOUSSON

STOCK OF SCRUBBER SLUDGES OF BLAST FURNACE GAS COVER : PONT-À-MOUSSON SITE

Marine LAURENT¹, Thierry PIRRION¹, Charlotte MOUGEOT², Jean-Luc TROMBOWSKY², Fabrice METREAU³, Lionel MACOR³,

1 Antea Group, Nancy, France

2 Saint-Gobain

3 Galopin

RÉSUMÉ – Dans le cadre de l'arrêté préfectoral réf. 2010-341 du 6 décembre 2010, le stock historique de boues issues du lavage des gaz de hauts fourneaux de l'usine de Saint-Gobain Pont-à-Mousson a dû être confiné. Le stock de boues est considéré comme déchets non-inertes non dangereux. Eu égard à la complexité technique liée aux contraintes de site (emprise au sol fixe, pente raide de 2H/1V à 1H/1V sur 17 m de hauteur, faibles caractéristiques mécaniques des boues...), et dans un souci d'optimisation technique, environnementale et économique, une solution équivalente à celle de l'arrêté a été proposée, validée puis mise en œuvre. Le dimensionnement de la couverture équivalente puis sa mise en œuvre en phase chantier sont discutés.

Mots-clés : couverture équivalente, géocomposite alvéolaire, géosynthétique de renforcement.

ABSTRACT – In accordance with the prefectural decree ref. 2010-341 of 6 December 2010, the old basin where the blast furnaces (gas) sludge of the Saint-Gobain Pont-à-Mousson were stored, had to be confined. The sludge is considered as non-inert non-hazardous waste. Considering the complex technical constraints of the site (set layout, steep slopes 2H/1V to 1H/1V, 17 m high, poor mechanical properties of the sludge ...), and the objective to optimize the economic and environmental performances, a solution equivalent to what was required in the decree was proposed, approved and implemented. The design of the equivalent cover and its installation during the construction phase are discussed in this report.

Keywords: equivalent cover, alveolar géocomposite, geosynthetic reinforcing

1. Introduction

Le stock historique de boues issues du lavage des gaz de hauts fourneaux de l'usine de Pont-à-Mousson a dû être confiné suite aux prescriptions de l'arrêté préfectoral réf. 2010-341 du 6 décembre 2010. Le stock de boues est considéré comme des déchets non-inertes non dangereux, sur une emprise de l'ordre de 1,8 hectare.

La couverture initiale demandée par l'arrêté préfectoral était la suivante (de haut en bas) :

- 30 cm de terre arable végétalisée ;
- 0,5 m de niveau drainant ;
- une géomembrane ;
- 1 m de matériau de perméabilité $< 1.10^{-9}$ m/s.

La faisabilité technique de conception et réalisation a dû prendre en compte, notamment :

- une emprise au sol fixe et consigne de ne pas évacuer de boues hors du site ;
- des pentes raides des talus (2H/1V à 1H/1V) sur une hauteur de 17 m (21 m après remodelage) ;
- de faibles caractéristiques mécaniques des matériaux stockés ;
- les contraintes liées à l'activité de l'usine (circulation d'engins, bassins, canalisations,...).

La couverture initiale, au delà de l'incompatibilité technique (difficulté de mise en œuvre de la couche d'argile et de matériaux drainants sur un site très contraint), présentait un « non sens » environnemental qui impliquait d'évacuer des boues en installations classées et d'apporter des matériaux naturels à grande distance (absence d'argile à proximité).

Eu égard à la complexité technique liée aux contraintes décrites dans les grandes lignes ci-dessus, et dans un souci d'optimisation technique, environnementale et économique, une solution équivalente a été proposée, validée puis mise en œuvre en 2015- 2016.

Les photographies de la Figure 1 illustrent l'état initial du stock de boues de lavages de gaz de hauts fourneaux avant travaux, après débroussaillage et suite au remodelage avant pose de la couverture étanche de géosynthétiques.



Figure 1. Photographies du stock de boues dans son état initial, suite au débroussaillage et après remodelage.

2. Présentation de la couverture équivalente

2.1. Contexte général et principe d'équivalence

Cette solution équivalente repose principalement sur les modifications suivantes :

- remplacement de la couche d'argile de 1 m d'épaisseur par un géosynthétique bentonitique avec géofilm ;
- remplacement de la couche de matériaux drainants par un géocomposite de drainage ;
- pour les talus 2H/1V l'intégration d'une géogrille de renforcement et d'un accroche terre ;
- pour les talus 1H/1V l'intégration d'une géogrille de renforcement et d'un géocomposite alvéolaire.

2.2. Dimensionnement de la couverture équivalente

À l'occasion de cette conception, en phase projet ainsi qu'en phase travaux, il a été nécessaire de démontrer l'équivalence de la solution proposée vis-à-vis de l'étanchéité et de la capacité drainante, et de dimensionner les géosynthétiques pour justifier de la stabilité de cette couverture.

2.2.1. Equivalence d'étanchéité

Méthodologie de calcul :

L'équivalence du dispositif d'étanchéité de la couverture finale au regard des exigences de la réglementation en vigueur est calculée dans le cas d'une détérioration du Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane (DEG) et de l'établissement d'une montée en charge des matériaux de la couverture située au dessus de la géomembrane, soit une charge hydraulique de 0,25 m au dessus de la géomembrane.

La géomembrane est supposée présenter des défauts, modélisés selon les théories de Bonaparte et Giroud (Giroud et Touze-Foltz, 2003).

Les défauts représentent des passages préférentiels d'écoulement pour les eaux pluviales.

La hauteur de charge est prise égale à 0,25 m – cas le plus défavorable : la terre végétale est considérée saturée sur toute son épaisseur.

Cette situation est peu probable au vue du drainage mis en place en couverture.

L'épaisseur et la perméabilité de la couche « peu perméable » sont prises égales à :

- pour le dispositif 1 (arrêté préfectoral) : une couche de matériau peu perméable de 1 m d'épaisseur et d'une perméabilité $k \leq 1.10^{-9}$ m/s ;
- pour le dispositif 2 : une géosynthétique bentonitique de 6 mm d'épaisseur et d'une perméabilité considérée $k \leq 5.10^{-11}$ m/s.

Résultats des calculs :

La perméabilité équivalente du système « Géomembrane / matériaux argileux reconstitués ou GSB », selon l'hypothèse d'une densité de défaut considérée de 15,3 défauts par hectare, est donnée dans le Tableau 1.

Tableau 1. Résultats des calculs d'équivalence de perméabilité

Dispositif considéré		D1 Arrêté Préfectoral	D2 Couverture finale proposée
Nombre de perforation		15,3	15,3
Débit à travers un défaut (m ³ /s)		5,39.10 ⁻⁹	2,55.10 ⁻⁹
Débit par hectare	(m ³ /s/ha)	8,25.10 ⁻⁸	3,90.10 ⁻⁸
	(l/j/ha)	7,13	3,37
Perméabilité équivalente (m ³ /s/m ²)		8,25.10 ⁻¹²	3,90.10 ⁻¹²
Écart par rapport à l'Arrêté Préfectoral		/	-53%

En considérant une détérioration du dispositif d'étanchéité et sur la base des flux définis suivant les équations empiriques (Giroud et Touze-Foltz, 2003), la perméabilité équivalente du dispositif proposé avec GSB est inférieure de 53% à celle du dispositif de l'arrêté préfectoral, ce qui va dans le sens d'une amélioration de la protection.

On notera que les perméabilités équivalentes des deux dispositifs étudiés sont toutes deux très faibles ($k_{eq} \leq 8.10^{-12}$ m/s).

Ces résultats sont à mettre en perspective avec les caractéristiques de l'ensemble de la couverture finale proposée. En effet, le remplacement des 50 cm de matériaux drainant par un géocomposite de drainage des eaux pluviales permet, sur la base des caractéristiques du produit étudié, un meilleur drainage des eaux pluviales. Le coefficient de sécurité est compris entre 15 et 20 respectivement en dôme et en flanc (§2.2.2).

De plus, le dispositif proposé permet une meilleure protection de la géomembrane vis-à-vis des endommagements de type poinçonnement par les matériaux supérieurs et inférieurs, étant donné que la géomembrane est située au dessus du géosynthétique bentonitique et en dessous d'un géocomposite de drainage.

Enfin cette solution est plus opérationnelle et limite les flux de camions lors de la mise en œuvre.

2.2.2. Equivalence de la capacité drainante

Méthodologie de calcul :

L'évaluation de l'équivalence a été menée à l'aide du logiciel Lymphéa, développé par le LIRIGM¹.

La méthodologie consiste à déterminer la capacité de débit dans le plan d'un géocomposite de drainage permettant de disposer d'un dispositif équivalent à celui demandé par la réglementation en vigueur, à savoir : 50 cm de matériaux drainants de perméabilité supérieure ou égale à 1.10^{-4} m/s.

Le flux de la couche granulaire est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$F_{\text{granulaire}} = \frac{Q}{L \cos \alpha} = \frac{Kei}{L \cos \alpha}$$

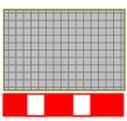
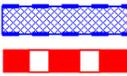
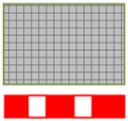
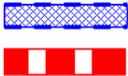
où:

- K = perméabilité des matériaux drainants ;
- e = épaisseur des matériaux drainants ;
- L = Longueur drainée ;
- α = angle du talus ;
- i = gradient hydraulique = $\sin \alpha$.

Résultats des calculs :

Le Tableau 2 présente le calcul d'équivalence en couverture finale pour la mise en œuvre des éléments drainants dans le sens de la plus grande pente sur les profils les plus défavorables.

Tableau 2. Résultats des calculs d'équivalence de drainage

Localisation			Dôme		Flanc	
Dispositifs étudiés			Dispositif 1 AP	Dispositif 2 Proposition	Dispositif 1 AP	Dispositif 2 Proposition
Schéma du dispositif						
Caractéristiques couche drainante			e = 0,50 m K = 1.10^{-4} m/s $\alpha = 2,69^\circ$ (5 %) i = $\sin \alpha = 0,05$ L = 7,5 m	$\alpha = 2,69^\circ$ (5 %) i = $\sin \alpha = 0,05$ L = 7,5 m	e = 0,50 m K = 1.10^{-4} m/s $\alpha = 26,5^\circ$ (50 %) i = $\sin \alpha = 0,47$ L = 35,5 m	$\alpha = 26,5^\circ$ (50 %) i = $\sin \alpha = 0,47$ L = 35,5 m
Géocomposite de drainage avec mini-drains ou bande drainante	Flux drainé ($m^3/m^2/s$)	Drainant	3.13×10^{-7}	-	$7,02 \times 10^{-7}$	-
		Géocomposite	-	4.16×10^{-6}	-	1.66×10^{-5}
	Débit (l/h/m)		1	15	3	60
	Coefficient de sécurité		-	15	-	20
	Diamètre mini-drains (mm)		-	20	-	25
	Espacement (m)		-	1	-	0,5
Equivalence			-	Oui	-	Oui

* Capacité de débit dans le plan selon ENISO12958 - PRV95 = -30% - Mousse/mousse à 1008h - 20 kPa

Ces calculs mettent en avant que la mise en place de géocomposites de protection et de drainage disposant des caractéristiques prises en compte est une solution équivalente à celle demandée par l'Arrêté Préfectoral (couche drainante de 50 cm), tenant compte d'un coefficient de sécurité de 15 à 20 soit supérieur à 10, comme habituellement considéré.

2.2.3. Dimensionnement de l'accroche terre, de la géogrille de renforcement et du géocomposite alvéolaire

Les dimensionnements des différents géosynthétiques ont été réalisés suivant la norme XPG38067.

Le détail des dimensionnements des géosynthétiques et de leurs ancrages ne fait pas l'objet de cet article.

¹ devenu Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)
Laboratoire dépendant de l'Université Joseph Fourier de Grenoble

2.3. Couverture équivalente retenue

Pour rappel la couverture demandée par l'arrêté préfectorale est décrite sur la Figure 2.

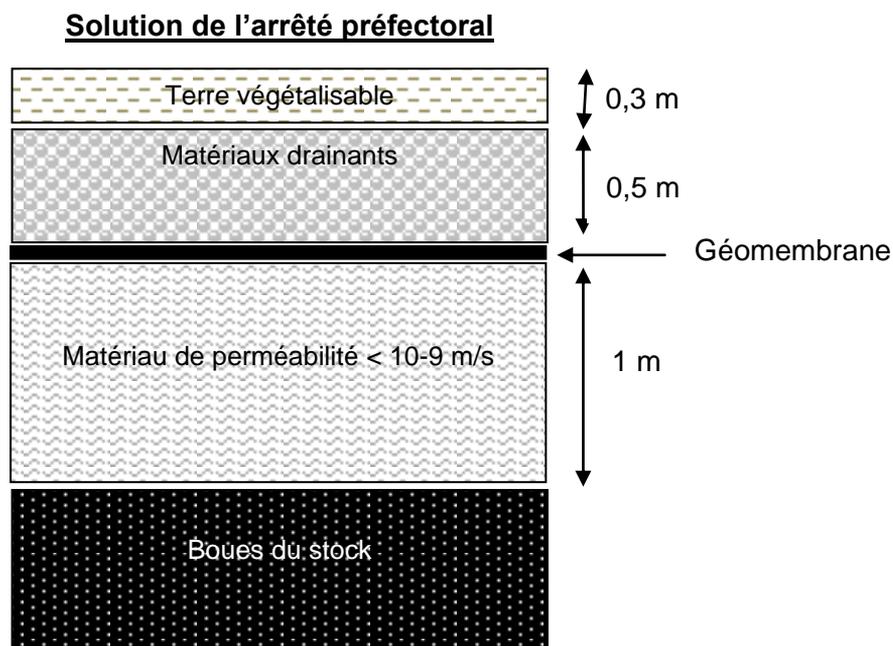


Figure 2. Couverture imposée par l'arrêté préfectoral.

La solution de couverture équivalente par utilisation de différentes géosynthétiques est présentée sur la Figure 3.

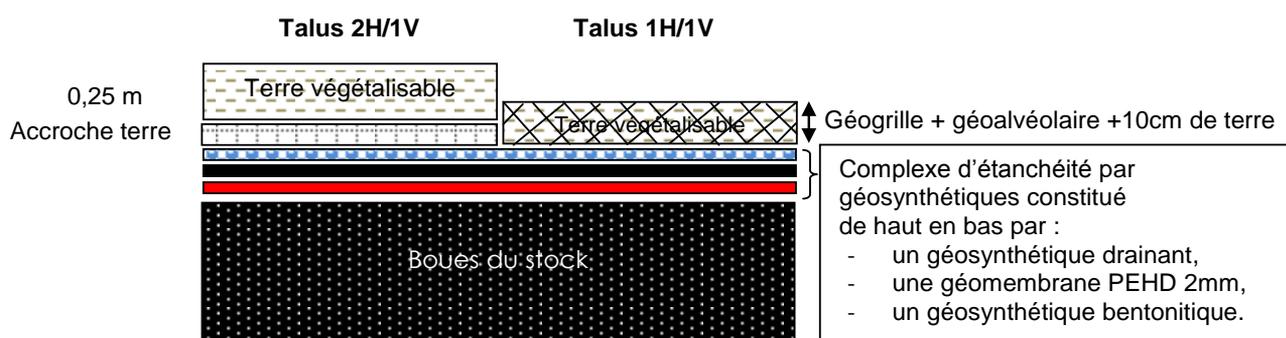


Figure 3. Couverture équivalente réalisée

L'épaisseur de la couverture est ainsi réduite très significativement, à minima de 1,5 m comme le montre le Tableau 3.

Tableau 3. Épaisseurs de différentes couvertures

Couverture type	Épaisseur en m	
	Talus 2H/1V	Talus 1H/1V
Arrêté préfectoral	1,80	1,80
Solution équivalente	0,26	0,11
Gain d'épaisseur avec la couverture par géosynthétiques	1,54	1,69

Le schéma de principe de la couverture équivalente mise en œuvre sur le stock de boue de lavage de gaz de hauts fourneaux est présenté sur la Figure 4.

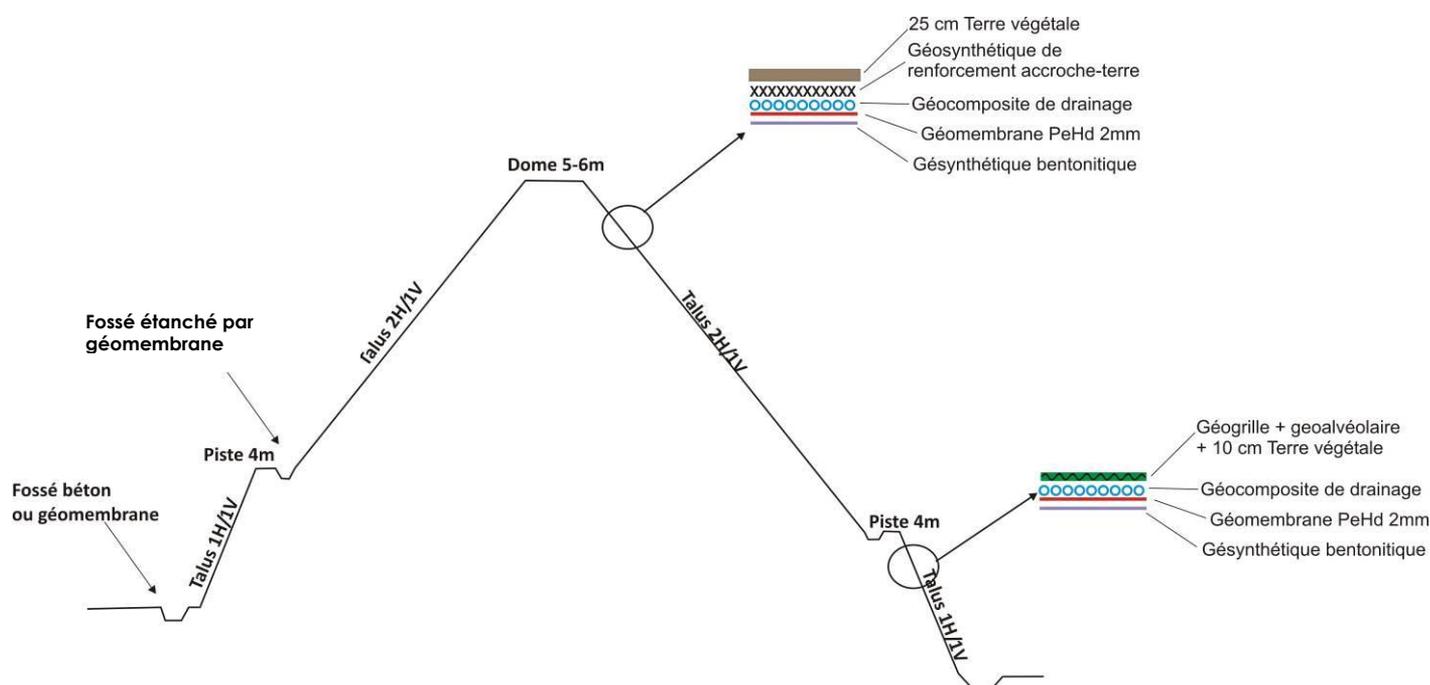


Figure 4. Schéma de principe du confinement.

En guise de synthèse, le Tableau 4 présente les produits commerciaux retenus, leurs fonctions et leurs principales caractéristiques :

Tableau 4. Synthèse des géosynthétiques utilisés en couverture du stock de boues de lavage de gaz de hauts fourneaux

Produit utilisé	Fonction	Caractéristiques principales
Géofilm bentonitique – CETCO – Bentomat CL-1	Étanchéité	Géofilm et 2 géotextiles (tissé et non tissé) avec couche de bentonite sodique Masse surfacique 4100 g/m ² (EN 14 196)
Géomembrane PeHD – SIPLAST – Geonap 2,00mm		Produit certifié ASQUAL 97,5 % de polyéthylène Masse surfacique 1850 g/m ² (EN 1849-2)
Géocomposite de drainage – BONAR – Enkadrain 5004F/5-1S/M110PP	Drainage	Produit certifié ASQUAL Perméabilité 0,1 m.s ⁻¹ (NF EN ISO 11058) Ouverture de filtration 90 µm (NF EN ISO 12956)
Géocomposite de protection – TENCATE – Bidim P100S	Protection	Produit certifié ASQUAL Masse surfacique 1050 g/m ² (NF EN ISO 9864) Résistance au poinçonnement 5,6 kN (NF G 38-019)
Géocomposite de retenue des terres sur le talus 2H/1 – BONAR – Enkamat – 7010W/5/200.50PET	Renforcement	Résistance à la traction (EN ISO 10319) Longitudinale 110 kN/m Transversale 50kN/m Déformation à l'effort 10 %
Géogrille de renforcement sur le talus 1H/1V – AGRU – TT45 ou TT60	Renforcement	Geogrille PeHD TT45 : Résistance à long terme 18,5 kN/m (ISO 13431) TT60 : Résistance à long terme 24,6 kN/m (ISO 13431)
Geoalvéolaire sur le talus 1H/1V – AGRU – Tenweb 4/300	Renforcement	Structure tridimensionnelle à nid d'abeille en Polyéthylène. Résistance max. à la traction 1,2 kN/bande (ISO 13426)

3. Mise en œuvre de la couverture équivalente

3.1 Phasage et chronologie des travaux

Le marché de travaux de couverture du stock de boues de lavage de gaz de hauts fourneaux a débuté en juillet 2015.

Les travaux de pose de la couverture équivalente ont été réalisés à la suite des travaux de terrassements qui ont permis de remodeler le stock de boues suivant la géométrie établie en phase projet, confirmée par les études d'exécution.

Suite à des aléas de mise en œuvre des boues, les travaux de pose des géosynthétiques ont débuté à partir d'octobre 2015 et se sont déroulés suivant le phasage suivant :

- Mise en œuvre des géosynthétiques sur le talus inférieur de pente 1H/1V (Fig.5) :
 - Réalisation de la tranchée sur la risberme ;
 - Mise en œuvre du géosynthétique bentonitique avec film de protection côté boues recouvert à l'avancement par la géomembrane PEHD ;
 - Mise en œuvre de la géosynthétique drainant et de géogrille de renforcement ;
 - Fermeture de la tranchée d'ancrage ;
 - Mise en œuvre du géocomposite alvéolaire fixé sur la géogrille par des rilsans.



Figure 5. Mise en œuvre des géosynthétiques de la couverture équivalente du talus 1H/1V.

- Mise en œuvre des géosynthétiques sur le talus supérieur de pente 2H/1V (Fig.6) :
 - Réalisation de la tranchée en crête du stock ;
 - Mise en œuvre du géosynthétique bentonitique avec film de protection côté boues recouvert à l'avancement par la géomembrane PEHD ;

- Fermeture de la tranchée d'ancrage ;
- Arrêt pour période hivernale de janvier à avril 2016 inclus ;
- Réalisation de la tranchée en crête du stock ;
- Mise en œuvre de la géosynthétique drainant et de l'accroche terre ;
- Fermeture de la tranchée d'ancrage ;
- Mise en œuvre des géosynthétiques sur le dôme en recouvrement :



Figure 6. Mise en œuvre des géosynthétiques et de la terre végétale de la couverture équivalente du talus 2H/1V.

Les travaux de mise en œuvre des géosynthétiques sur le talus inférieur 1H/1V se sont terminés début décembre 2015. À partir de mi-novembre, la mise en œuvre de la terre végétale a débuté et a été réalisée sur la moitié du stock, sur les talus de plus faible hauteur situés côté ouest.

Une planche d'essai sur les talus de grande hauteur a été mise en œuvre sur 4 panneaux comme présenté sur la photographie de la Figure 7.



Figure 7. Planche d'essais du géocomposite alvéolaire – décembre 2015.

À la reprise des travaux en avril 2016, après constat de la bonne tenue de la planche d'essais, les travaux se sont poursuivis. Les photographies de la Figure 8 présentent le stock après travaux de couverture et de mise en œuvre de la terre végétale.



Figure 8. Vue du stock après travaux de couverture – juin 2016.

3.3 Retour d'expérience

3.3.1. Couverture équivalente du talus 2H/1V

La mise en œuvre n'a pas posé de problème particulier, cependant en raison de la période hivernale les travaux ont dû être réalisés en deux temps avec mise en place de mesures de protections provisoires.

Dans un premier temps l'entreprise a réalisé l'étanchéité avec la mise en place de la géomembrane qui s'est fait immédiatement à l'avancement sur le géosynthétique bentonitique.

Dans un second temps, après la période hivernale, il a été nécessaire de venir ouvrir de nouvelles tranchées pour poser le géosynthétique drainant et l'accroche terre.

3.3.2. Couverture équivalente du talus 1H/1V

La mise en œuvre de l'étanchéité et du géosynthétique drainant n'ont pas posé de problème particulier.

En revanche, concernant la pose de la géogrille associée au géoalvéolaire, le retour d'expérience nous permet d'identifier des points d'attention à prendre en compte et à contrôler :

- mise en œuvre longue et délicate en raison de la fixation par rilsans ;
- ajustement du maillage de la grille à celle du géoalvéolaire ;
- mise en œuvre de la terre végétale soignée.

Lorsque cela est possible, il s'avère plus simple de réduire les pentes et de mettre en œuvre un accroche terre. Toutefois, ce système a permis de végétaliser ce talus d'une assez grande hauteur de pente raide, 1H/1V.



Figure 9. Vue du côté est depuis la piste sur risberme – novembre 2016.

4. Conclusion

En conclusion, la réalisation d'une couverture étanche, avec des pentes de talus fortes (de 2H/1V à 1H/1V), intégrant une gestion des eaux pluviales et une intégration paysagère du stock de boues de lavage des gaz de hauts fourneaux, a été permise grâce à un large usage des géosynthétiques.

Pour ces travaux, par comparaison à la structure de couverture demandée par l'arrêté préfectoral, qui était inenvisageable sans l'évacuation d'un volume de boues important en installation classée, l'utilisation des géosynthétiques a permis de réaliser ce projet sans évacuation et par conséquent, une économie substantielle, mais aussi une baisse de l'impact environnemental du projet avec un volume de transports nettement réduit, le tout dans un site industriel en exploitation.

5. Références bibliographiques

Giroud J.P., Touze-Foltz N. (2003). Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to geomembranes defects, *Geosynthetics International*, Vol. 10, No. 6, pages 215-233.

Norme XPG38067 en date de juillet 2010 *Géosynthétiques - géotextiles et produits apparentés - stabilisation d'une couche de sol mince sur pente - justification du dimensionnement et éléments de conception.*

Arrêté préfectoral réf. 2010-341 du 6 décembre 2010.