

CONCEPTION D'UN MATELAS EN SOLS TRAITÉS RENFORCÉ PAR GÉOSYNTHÉTIQUE SUR INCLUSIONS RIGIDES : ROCADE DE BOURGES

PILED EMBANKMENT SOIL TREATED BASAL LAYER REINFORCED BY GEOSYNTHETIC : CASE OF THE NORTH EAST BOURGES RING ROAD

Valéry FERBER¹, Renaud BOURGUET², Jean-Frédéric OUVRY², Laurent CIBOT³, Yann GAUTIER-BRET¹

¹ *Entreprise CHARIER, Montoir-de-Bretagne, France*

² *ANTEA Group, Olivet, France*

³ *Conseil Général du Cher, Bourges, France*

RÉSUMÉ – La rocade routière Nord-Est de Bourges, réalisée en 2013-2014 sous la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre du Conseil Général du Cher, traverse un ancien site d'enfouissement de déchets. Le passage de la future route sur cette zone se fait en remblai et un dispositif de renforcement par inclusions rigides a été choisi. Un matelas de répartition renforcé par géosynthétique a fait l'objet d'une optimisation en phase travaux par un traitement de sols au liant hydraulique. Ceci a nécessité une conception originale mettant en évidence la difficulté à prendre en compte les sols traités au liant dans un matelas de répartition.

Mots-clés : géosynthétiques de renforcement, inclusions rigides, tassement, traitement de sols.

ABSTRACT – The North East ring road of Bourges, built in 2013-2014 under the control of the General Council of the Cher (France), crosses an old landfill site. This section of the project has been specially designed with piles and a basal layer reinforced by a geosynthetic. During the works, this design has been optimized by the use of treated soil with hydraulic binder in the basal layer. This original design highlighted the difficulties encountered when designing reinforced piled embankment with a soil treated basal layer.

Keywords: reinforcement geosynthetics, piled embankment, settlement, soil treatment.

1. Contexte du projet

Le Conseil Général du Cher assure la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre du projet de réalisation du contournement Nord de Bourges (Figure 1), décomposé en deux tronçons Nord-Ouest et Nord-Est. Le tronçon Nord-est de Bourges permet la liaison entre la RN 151, Commune de Saint Germain du Puy et la RD 940, au Clos de Feularde. Il représente un linéaire d'environ 4,2 km. Les travaux ont été réalisés entre 2013 et 2014.

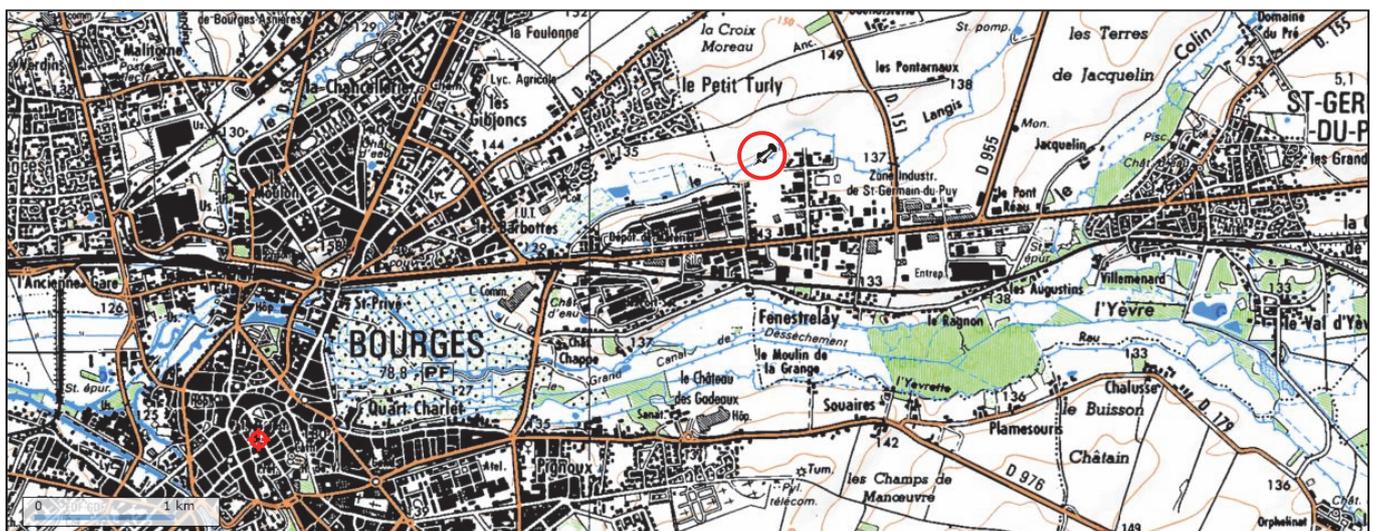


Figure 1. Localisation du site

Les différentes campagnes de sondages géotechniques menées dans le cadre des études de projet de l'infrastructure ont révélé la présence, sous le tracé de future route, d'une ancienne carrière de calcaire, utilisée par la suite en décharge sur la commune de Saint-Germain-du-Puy (Figure 2 et 3), exploitée jusqu'en 1989. Cette décharge, située au lieu-dit « Les Boubards », représente pour l'assise de l'infrastructure routière une zone particulière soumise aux servitudes inhérentes à la fermeture de la décharge.



Déchets ménagers extraits



Trou à la pelle S7

Figure 2. Photographies des déchets présents dans l'ancienne décharge

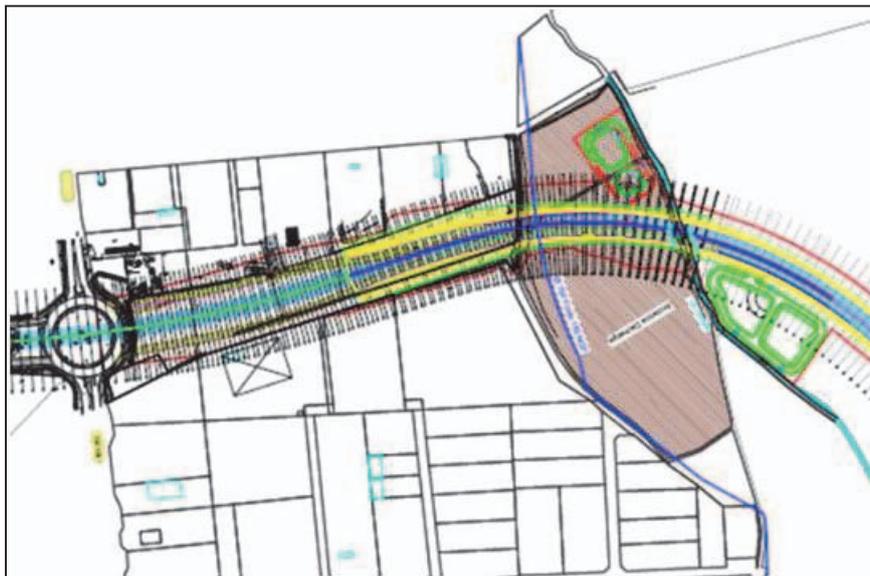


Figure 3: Localisation de la décharge - Projet de la Rocade Nord-Est de Bourges

Sous la maîtrise d'ouvrage du Conseil Général du Cher, une étude comparative des différents systèmes d'amélioration de sol a été menée par Antea Group, afin de déterminer la solution technique la plus avantageuse permettant le franchissement de la décharge tout en respectant les contraintes du projet et en limitant l'impact des déchets stockés sur l'environnement. À l'issue de cette étude, le Conseil Général du Cher s'est orienté vers la solution d'un franchissement de la décharge par une amélioration de sol par inclusions rigides avec mise en place de géosynthétiques de renforcement et de drainage.

2. Données du projet et principes généraux de conception

2.1. Caractéristiques géotechniques du support

Les reconnaissances géotechniques menées dans le cadre du projet et de l'étude comparative des solutions d'amélioration des sols ont permis de présenter le modèle géotechnique suivant (Tableau 1).

Tableau 1. Modèle géotechnique de synthèse

Formation	Epais	γ_h	P_{LM}^*	E_M	c'	φ'	α	E
	m	kN/m^3	MPa	MPa	kPa	degré	-	MPa
Remblai routier	Max 8 m	20	-	-	5	33	-	30
Matelas de répartition	0,8	20	-	-	5	38	-	50
Couverture	1,0	18	0,6	9	0	30	1/2	18
Déchets matures	7,0	10	0,2	2	5	22	2/3	3
Substratum calcaire	-	19	4,3	45	40	35	1/2	200

Le site est bordé en partie Nord par un cours d'eau, le Langis, et à l'Est par un petit plan d'eau. Un suivi piézométrique du site met en évidence la présence d'une nappe phréatique fluctuante dans l'horizon des déchets.

2.2. Géométrie du projet

Dans le secteur de la décharge de Saint Germain du Puy (Figure 4), au lieu-dit « Les Boubards », les infrastructures sont réalisées en remblais de hauteur variable.

La topographie du site avant travaux était subhorizontale, comprise entre 132 NGF et 133,5 NGF. La surface de la décharge est estimée à 42 000 m². L'emprise au sol du remblai au niveau du site de la décharge est de 8 000 m² sur un linéaire de 160 m.



Figure 4. Panorama du site de la décharge dans l'axe du projet de la Rocade

Le projet prévoit la réalisation d'un remblai constituant l'assise de la Rocade (Figure 5). Sa hauteur varie entre 3 m et 8 m. Son emprise latérale est de 30 m en partie sommitale et 48 m à sa base, ce qui représente un volume de remblais d'environ 30 000 m³. Il se raccorde d'une part au giratoire présent sur la RN 151 et d'autre part sur l'ouvrage d'art de franchissement du Langis.

2.3. Principes généraux de conception

L'objectif du système d'amélioration des sols est de permettre la maîtrise des tassements absolus et différentiels engendrés par la présence de la couche de déchets compressibles. Il doit permettre également de limiter l'impact des tassements induits par la biodégradation probable des déchets.

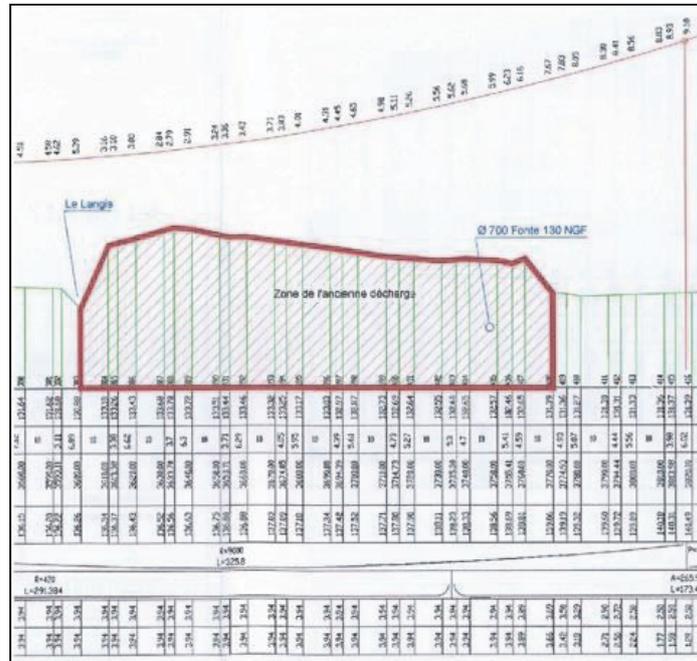


Figure 5: Profil en long du projet au droit du site de la décharge

Du fait de la présence de la décharge au droit du projet de la rocade Nord-Est de Bourges, le dispositif d'amélioration de sol doit :

- permettre d'assurer la portance nécessaire,
- limiter l'impact du tassement organique probable des déchets,
- limiter les volumes de déchets excavés,
- respecter des clauses inscrites dans le dossier de cessation d'activité (pérennité et intégrité de la couverture),
- traiter les effluents potentiels des déchets.

De plus, une canalisation d'adduction d'eau potable d'un diamètre de 300 mm est présente dans la partie Sud du site de la décharge, induisant des contraintes spécifiques à prendre en compte dans la définition du dispositif d'amélioration de sol.

Caractéristiques techniques

La base du dispositif préconisé se compose d'inclusions en béton non armé effectuées à l'aide d'une tarière refoulante et d'un matelas de répartition granulaire respectant les prescriptions définies dans le projet ASIRI. Les inclusions assurent le transfert des charges au substratum calcaire.

Cependant, le matériau granulaire composant le matelas de répartition ne possédant pas de cohésion intrinsèque, des tassements différentiels peuvent apparaître induits par les tassements dus à la dégradation biologique des déchets. Afin de limiter ce phénomène, une géogrille de renforcement est disposée dans l'épaisseur du matelas de 80 cm, afin d'assurer un transfert des efforts vers les inclusions en cas de tassement du sol support (Figure 6).

Enfin, la présence des déchets sous l'ouvrage peut induire la production éventuelle de biogaz. Un géotextile de drainage est donc disposé à l'interface entre le remblai et le matelas de répartition (Figure 7), ce géotextile est posé avec une pente en travers non nulle, afin de récolter à l'extrémité haute les biogaz et à l'extrémité basse les infiltrations d'eau dans le remblai.

Le dimensionnement du dispositif, en phase projet, est basé sur les préconisations du projet ASIRI. Une modélisation en 2 dimensions a été réalisée avec le logiciel FLAC (Figure 8,

Figure 9) afin d'effectuer les vérifications nécessaires. Les efforts maxima ont été établis sur la base des résultats du modèle numérique intégrant la présence de la géogrille.

La géogrille a été dimensionnée selon la méthode développée dans les recommandations ASIRI et la méthode EBGeo.

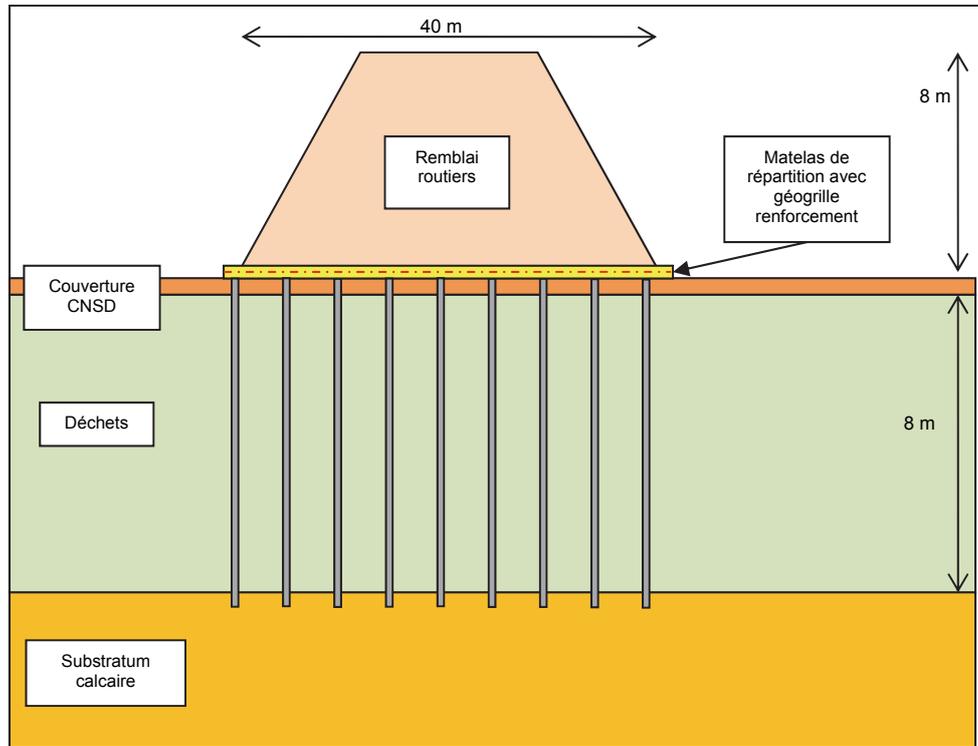


Figure 6. Schéma du dispositif d'amélioration de sol par inclusions rigides

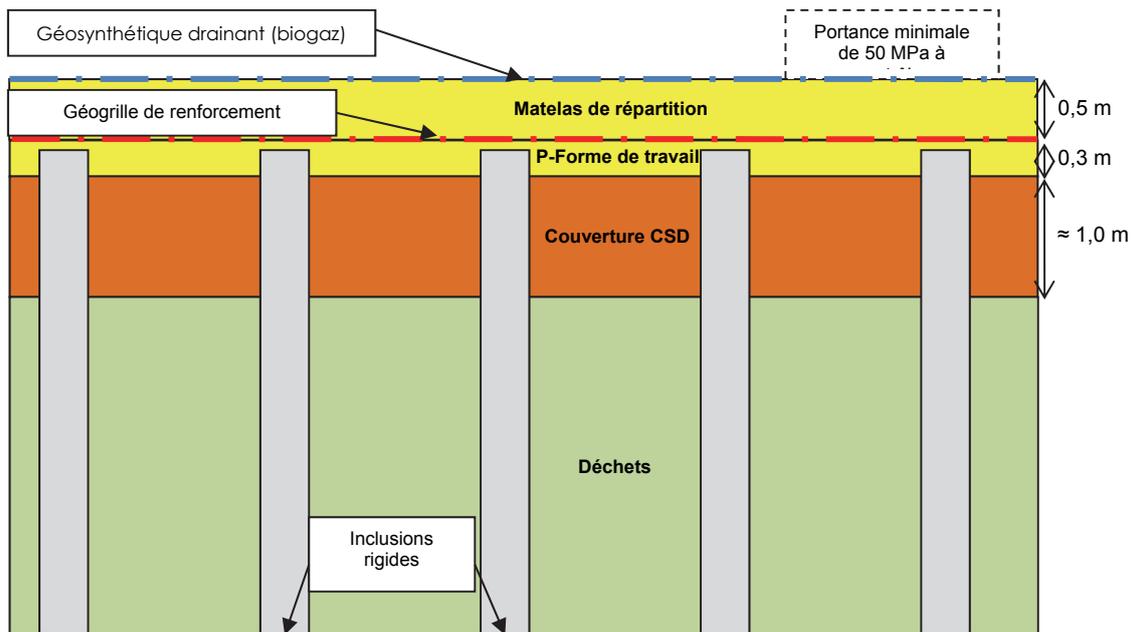


Figure 7. Détails du matelas de répartition granulaire

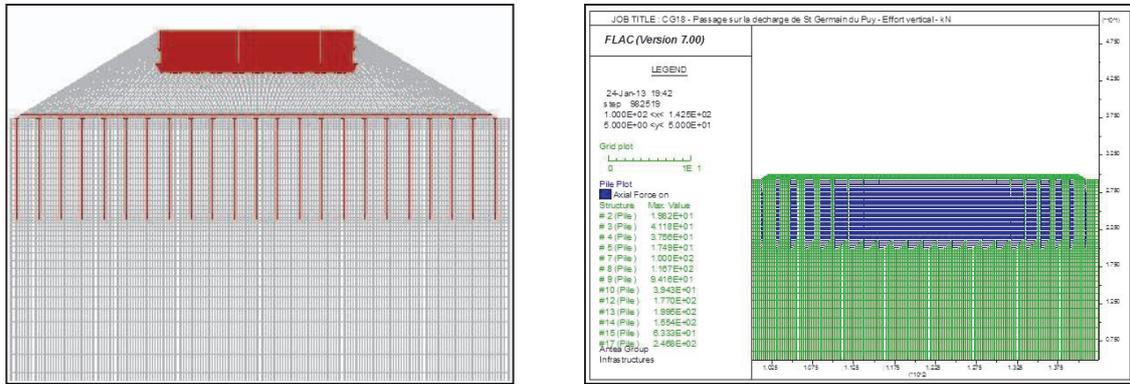


Figure 8. Illustrations du modèle numérique réalisé sous FLAC, logiciel développé par ITASCA

Synthèse des paramètres:

- Epaisseur de matelas granulaire : 0,8 m
- Diamètre des inclusions : 0,4 m
- Ancrage : 0,5 m dans le calcaire (hauteur moyenne de 9 m)
- Maille : 1,8 m x 1,8 m
- Résistance à la traction de la géogrille : 600 kN/m

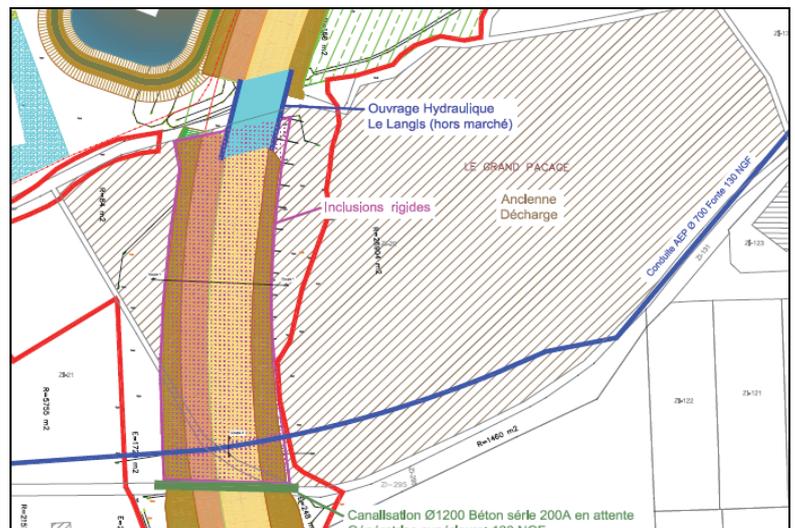


Figure 9. Plan d'implantation des inclusions rigides – Phase projet

3. Optimisation de la conception par le traitement des sols au liant hydraulique

Lors des travaux, l'entreprise CHARIER TP, dans un souci d'optimisation économique, a proposé une autre conception, basée sur l'emploi du traitement des sols au liant hydraulique ; cette solution a fait l'objet d'un dimensionnement adapté. Les spécificités liées à cette conception ainsi que les principes de dimensionnement retenus sont présentés dans ce chapitre.

3.1. Particularités de la conception d'un matelas de répartition en sol traité au liant hydraulique

Le principe de la solution optimisée était de substituer le matelas de répartition en matériau granulaire par une couche de sol traité au liant hydraulique. Cette idée a cependant rencontré plusieurs obstacles liés aux spécificités des matériaux traités au liant hydraulique :

- la faible perméabilité du matelas en sol traité ne permettait pas de positionner le drainage du biogaz au-dessus du matelas de répartition ;
- le risque de fissuration de retrait et le comportement fragile du sol traité ne permettent pas de considérer le matelas traité comme une dalle continue. Ceci a notamment conduit à étudier la reprise des efforts verticaux entre inclusions de manière adaptée ;
- le pH basique du sol traité au liant hydraulique impose de prendre en compte des paramètres de correction préjudiciables dans le dimensionnement du géosynthétique de renforcement.

Cependant, le sol traité présente des avantages notables par rapport au matériau granulaire dans un matelas de répartition :

- sa résistance en compression est plus élevée et favorise la résistance au poinçonnement du matelas,
 - sa résistance en traction contribue favorablement à la reprise des efforts horizontaux.
- La conception de la solution de matelas de répartition en sol traité a donc conduit à :
- positionner la collecte des éventuels biogaz sous la couche en sol traité ;
 - ne pas mettre en contact le géosynthétique de renforcement avec le sol traité, en intercalant une couche de matériau granulaire entre le géosynthétique de renforcement et le sol traité ;
 - intégrer le risque de discontinuité dans la vérification de la reprise des efforts verticaux ;
 - intégrer la résistance en traction du sol traité dans la reprise des efforts horizontaux, en complément de la résistance du géosynthétique de renforcement.

3.2. Caractéristiques du sol traité

Le sol traité est constitué d'un mélange entre un matériau marno-calcaire du site avec un liant hydraulique, à raison d'un dosage de 5 %. Les études de laboratoire ont conduit aux performances suivantes à 28 jours :

- masse volumique sèche à l'Optimum Proctor Normal : 1,74 t/m³
- résistance en compression : 2,56 MPa
- résistance en traction : 0,28 MPa

3.3. Discussion sur les éléments de dimensionnement

Le dimensionnement de la solution optimisée a été réalisé avec l'appui du guide ASIRI (ASIRI, 2012) et de la norme britannique BS8006-1:2010 (BS8006-1, 2012). Elle repose essentiellement sur la vérification des points suivants :

- poinçonnement,
- reprise des efforts horizontaux dans le matelas de répartition,
- reprise des efforts verticaux entre inclusions rigides,
- déplacement maximum.

La vérification au poinçonnement a été réalisée sur la base du principe présenté sur la figure 10. Le principe est d'araser les inclusions rigides dès leur mise en œuvre sous la base de la plate-forme de travail et de substituer le béton par du matériau granulaire. Ainsi, on peut utiliser l'angle de frottement du matériau granulaire pour réduire les efforts de cisaillement dans le matelas de répartition en sol traité ($\sigma_s = 0,278$ MPa). Pour une couche granulaire de 70 cm d'épaisseur et un diamètre d'inclusions de 36 centimètres, le diamètre équivalent de l'empreinte de l'inclusion dans le matelas traité s'élève alors à plus d'un mètre. Moyennant un coefficient de sécurité de 3, ceci conduit à exiger une résistance en compression du sol traité au liant hydraulique de près de 0,4 MPa.

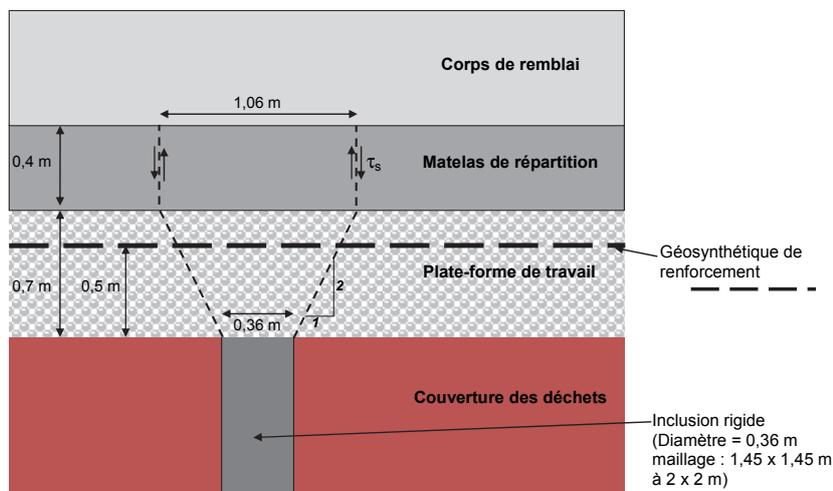


Figure 10. Vérification au poinçonnement du matelas de répartition.

La vérification de la reprise des efforts horizontaux a été réalisée classiquement en déterminant l'effort de traction dû à la poussée des terres par la formule suivante :

$$T_{tr} = P_a = 0,5 K_a(\gamma H + q) H \quad (1)$$

avec :

- H, la hauteur du remblai au-dessus du géosynthétique (égale au maximum à la hauteur de remblai au droit de la crête de talus),
- γ , le poids volumique du matériau de remblai,
- K_a , le coefficient de poussée des terres du remblai = $\tan^2(\pi/4 - \varphi/2) = 0,238$ pour $\varphi = 38$ degrés,
- q, la surcharge routière = 20 kPa

Il a été choisi de vérifier que cet effort de traction était bien repris par la résistance cumulée du géosynthétique de renforcement et la résistance en traction du sol traité au liant hydraulique. En réalité, cette approche est probablement discutable pour au moins deux raisons dans cette conception :

- d'une part le géosynthétique de renforcement et le sol traité ne sont pas solidaires, dans la mesure où ils sont séparés par une couche de matériau granulaire. Aussi, c'est certainement le sol traité qui devra résister en premier lieu à l'effort de traction, et le géosynthétique de renforcement ne sera réellement sollicité qu'après rupture du sol traité ;
- d'autre part le sol traité peut présenter une fissuration due au retrait de la prise hydraulique qui peut remettre en cause l'efficacité de sa résistance en traction intrinsèque.

Ceci étant, cette hypothèse optimiste est largement contrebalancée par des hypothèses pessimistes, notamment sur le risque de tassement des déchets sous-jacents.

Enfin, la reprise des efforts verticaux entre inclusions a fait l'objet d'une réflexion particulière pour définir le critère de vérification. En effet, ni le guide ASIRI ni la norme BS8006-1 ne proposent de méthode de dimensionnement adaptée au cas des sols traités. En particulier, la norme BS8006-1 est explicitement basée sur une reprise des efforts verticaux par effet de voûte. Or, les mécanismes par lesquels un sol traité peut reprendre les efforts verticaux sont (Figure 11) :

- soit des mécanismes en flexion, avec une résistance en traction minimale à assurer en base de la couche traitée pour résister au fléchissement sous le poids des terres ;
- soit un mécanisme d'affaissement en sous-dalle désolidarisées si des fissures délimitent des plaques ne reposant sur aucune inclusion rigide.

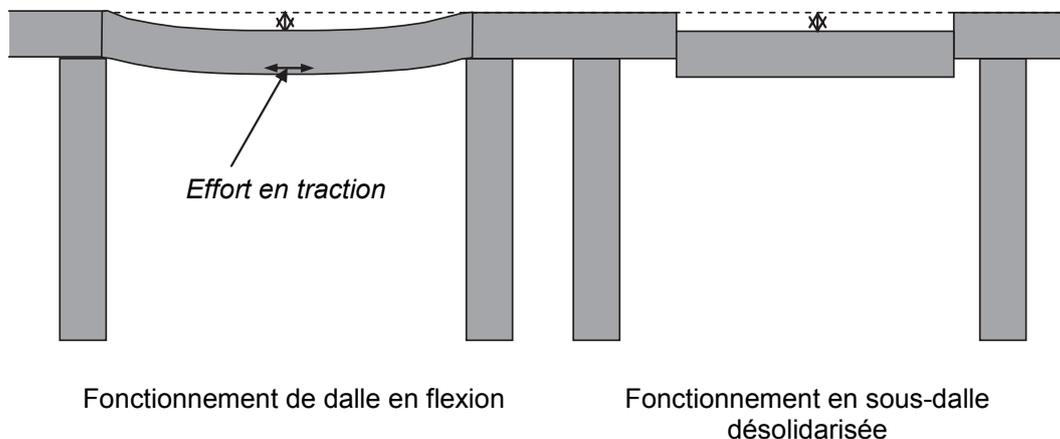


Figure 11. Mécanismes possibles de rupture du matelas traité sous le poids des terres.

Il a donc été choisi de dimensionner le géosynthétique de renforcement sur la base du cas où la fissuration délimiterait une plaque non solidaire du matelas traité, de diamètre inscrit entre quatre inclusions (Figure 12). L'effort linéique à reprendre par le géosynthétique de renforcement serait alors égal à la contrainte due au poids des terres (Equation (2)) divisé par le périmètre de ce cercle hypothétique (Equation (3)).

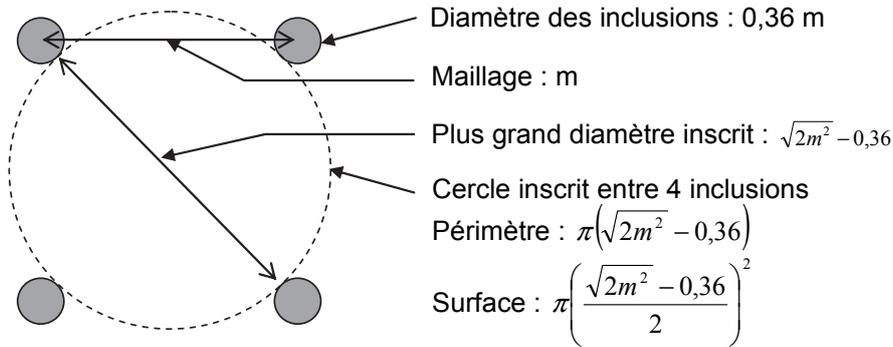


Figure 12. Principe de vérification de reprise des efforts verticaux par le matelas traité.

$$F = S_v \pi \left(\frac{\sqrt{2m^2} - 0,36}{2} \right)^2 \quad (2)$$

$$F_l = \frac{F}{\pi(\sqrt{2m^2} - 0,36)} \quad (3)$$

avec :

- F, la contrainte due au poids des terres ;
- S_v , la charge sur au poids des terres ($\rho g H$) ajouté à la surcharge d'exploitation ($q=20$ kPa) ;
- m, le maillage (distance entre inclusions les plus proches) ;
- F_l , la contrainte linéique appliquée au géosynthétique.

4. Produits géosynthétiques retenus et posés

Le géosynthétique de renforcement prévu au marché était une géogridde en PVA d'une résistance nominale de 600 kN/m dans les deux directions (production et transversal).

L'évolution de la conception a permis de réduire les exigences mécaniques et physico-chimiques et de retenir un géosynthétique tissé de multifilaments de haut module en polyester (TENCATE Bidim, Geolon PET). Les résistances retenues ont été adaptées à la hauteur de remblai et au maillage entre inclusions et étaient comprises entre 300 et 400 kN/m. Au droit de la plate-forme, où la reprise des efforts verticaux entre inclusions est cruciale, deux couches de géosynthétiques ont été superposées et croisées afin d'assurer une résistance dans les deux directions (Figure 13).



Figure 13. Mise en œuvre du géosynthétique de renforcement

5. Conclusions

La modification apportée à la conception du matelas de répartition pour le franchissement de l'ancienne décharge sur le tracé de la déviation Nord-Est de Bourges a reposé sur un traitement du sol au liant hydraulique, afin de constituer une couche rigide reprenant mieux les efforts. Cette modification du matelas de répartition a conduit à revoir la position du géosynthétique de drainage des gaz et des eaux de percolation et à reprendre l'ensemble du dimensionnement des inclusions rigides et du géosynthétique de renforcement.

Ces modifications de la conception ont permis d'optimiser la solution technique et par là même de réaliser des économies sur le projet grâce notamment à :

- l'optimisation du maillage entre inclusions rigides, qui a permis de réduire le linéaire total d'inclusions ;
- la substitution de la géogrille en PVA, initialement prévue en renforcement, par un géosynthétique tissé de multifilaments en fibres de haut module de polyester.

La technique d'amélioration de sol par inclusion rigide sous un matelas traité au liant hydraulique a atteint les limites des prescriptions techniques de dimensionnement actuellement en vigueur. De ce fait, une méthode de calcul spécifique a été adaptée à ce cas de figure intégrant la mise en œuvre d'un géosynthétique de renforcement permettant de tenir compte à la fois du risque lié au caractère fragile des sols traités aux liants hydrauliques et du risque lié au caractère évolutif des déchets sous-jacents.

6. Références bibliographiques

ASIRI Projet National (2012) Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides, Presses des Ponts, Juillet 2012

BS8006-1:2010 Incorporating Corrigendum No1 (2012) Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. BSI Standards publication. 30 June 2012. 250 pages.