

GEOSYNTHETIQUES POUR LE RENFORCEMENT DES SOLS : APPLICATIONS RECENTES ET RECHERCHE EN BELGIQUE

GEOSYNTHETICS FOR SOIL REINFORCEMENT: RECENT APPLICATIONS AND RESEARCH IN BELGIUM

Nicolas Denies¹, Noël Huybrechts², Jan Verstraelen³, Wim Maekelberg³, Jan Maertens⁴

1 Centre Scientifique et Technique de la Construction - CSTC, Limelette, Belgique

2 Centre Scientifique et Technique de la Construction - CSTC et KU Leuven, Belgique

3 TUC RAIL, Bruxelles, Belgique

4 Jan Maertens BVBA & Chairman Belgian Geosynthetics Society - BGS, Beerse, Belgique

RÉSUMÉ – Les remblais renforcés au moyen de géosynthétiques sont de plus en plus utilisés comme alternative à des solutions plus classiques de soutènement. Dans le présent article, les auteurs présentent tout d’abord les dernières tendances liées au développement de cette technique en Belgique à l’aide de différents cas pratiques. Le cœur de l’article se concentre ensuite sur un cas particulier : la conception, la construction et le monitoring, au moyen de fibres optiques, de remblais renforcés réalisés dans le cadre du projet « by-pass – Mechelen ».

Mots-clés : Remblais renforcés, cas pratiques, dimensionnement, monitoring, fibres optiques

ABSTRACT – Reinforced fills are more and more used as alternative to typical retaining solutions. In the present article, the authors first present the last trends related to the development of this technique in Belgium considering various field cases. Then, the core of the paper focuses on a particular case study: the design, the construction and the monitoring, with optical fibers, of reinforced fills realized within the framework of the “by-pass – Mechelen” project.

Keywords: Reinforced fills, case studies, design, monitoring, optical fibers

1. Introduction

Initiées par Henri Vidal au début des années soixante, les techniques de renforcement de sol destinées aux remblais sont aujourd’hui reconnues internationalement. Depuis lors, le développement des produits géosynthétiques combiné aux nombreuses études expérimentales et numériques a fait de cette technique une des innovations majeures de ces cinquante dernières années dans le domaine géotechnique. Cependant, si une norme européenne pour l’exécution des remblais renforcés (EN 14475) a été publiée en 2006, on ne dispose toujours pas à l’échelle européenne d’une approche globale de dimensionnement de ce type d’ouvrage. En conséquence, les géotechniciens se tournent vers les différentes normes nationales disponibles sur le marché : principalement, la norme britannique BS 8006-1:2010, les normes françaises NF P 94-270 et XP G 38-064, les rapports 175 et 198 du SBRCURnet aux Pays-Bas et les recommandations EBGeo en Allemagne.

Ces dernières années, on a de plus en plus recours en Belgique à la technique des remblais renforcés. Néanmoins, il n’existe pas encore d’approche belge officielle ou normalisée pour le dimensionnement des remblais renforcés au moyen de géosynthétiques. Les recommandations mentionnées ci-dessus sont donc utilisées par les géotechniciens en fonction du donneur d’ordre. En pratique, cela amène souvent de nombreuses discussions pendant le projet, chaque intervenant du problème ayant tendance à sélectionner l’approche de dimensionnement qui lui convient le mieux en fonction de ses intérêts, de ses habitudes ou de son expérience. Ce choix d’approche sera alors jugé soit trop conservatif par les uns soit trop risqué par les autres. De manière à répondre à cette problématique, un groupe de travail a récemment été créé par la BGS, la branche belge de l’International Geosynthetics Society (IGS), et un premier workshop dédié à cette question a été organisé en novembre 2015. Au cours de ce workshop, les participants ont tout d’abord pu découvrir un grand nombre d’applications de remblais renforcés à l’aide de géosynthétiques tels qu’installés ces dernières années en Belgique (voir Figs. 1 à 4).

Comme illustré sur les figures 1 à 4, il existe un grand nombre de variantes possibles pour la construction de remblais renforcés. En Belgique, comme dans le reste du monde, on constate qu'une attention particulière est de plus en plus portée à l'aspect esthétique du recouvrement (une solution à la mode étant la construction de murs verts ou parois vertes, communément appelés « green walls » dans la pratique).

Si les remblais renforcés sont aujourd'hui couramment utilisés comme alternatives à des solutions de soutènement plus classiques (en béton coulé sur place ou préfabriqué), les donneurs d'ordre ont néanmoins de plus en plus tendance à intégrer dans leurs cahiers des charges des éléments de monitoring leur permettant par exemple de contrôler les déformations des géosynthétiques non seulement durant la construction du remblai renforcé mais aussi tout au long de la durée de vie de l'ouvrage. En réponse à cette demande grandissante de mesures *in situ*, les fabricants ont développé des géosynthétiques « intelligents » comprenant par exemple des systèmes de mesure intégrés à base de fibres optiques tels que les géotextiles et les géogrilles Geoptex (Texion). Ces produits permettent de mesurer sur le long terme les déformations des géogrilles. Ces mesures de déformations peuvent alors être couplées à des levés topographiques et des mesures inclinométriques permettant d'avoir une idée du comportement global en déformation et en déplacement de l'ouvrage monitoré afin, notamment, d'affiner les dimensionnements de futurs remblais renforcés sur base de mesures réelles (= développement d'approches de dimensionnement plus réalistes et plus économiques).



Figure 1. Exemple d'application en Belgique (1) : Remblais renforcés au moyen de géotextiles tissés.
Source : Texion et TenCate.

Chantier Infrabel à Zeebrugge – Construction d'un remblai renforcé à l'aide de géogrilles (type Miragrid) et recouvrement au moyen de géocellules perforées (type TexiWeb) à remplir de terre et à ensemercer pour créer une paroi verte

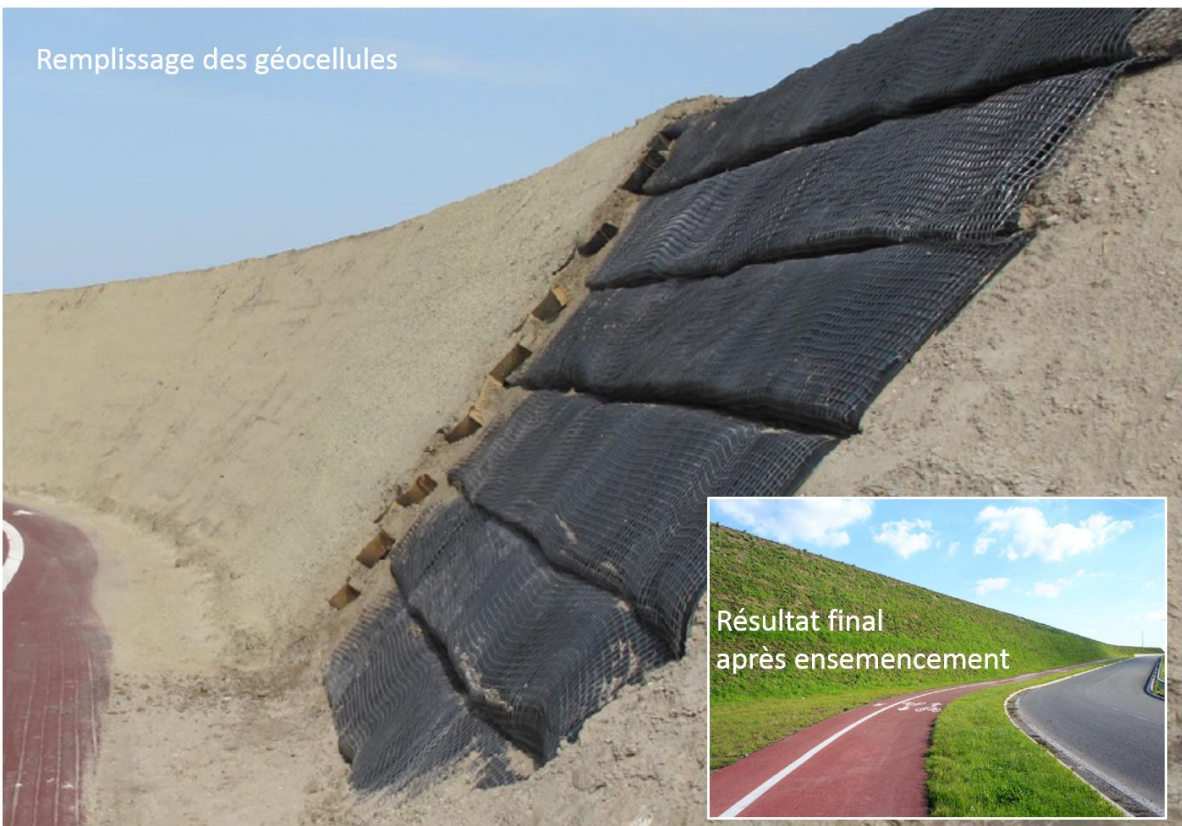


Figure 2. Exemple d'application en Belgique (2) : Remblais renforcés au moyen de géogrilles et recouvrement réalisé au moyen de géocellules perforées.
Source : Texion, TenCate et PRS Mediterranean Ltd.



Figure 3. Exemple d'application en Belgique (3) : Remblai renforcé au moyen de bandes en polyester connectées à des panneaux en béton préfabriqués. Source : Texion et Maccaferri.



Figure 4. Exemple d'application en Belgique (4) : Remblai renforcé au moyen de géogrilles insérées dans des éléments préfabriqués en béton en forme de L.
 Source : Emergo, Huesker et TUC RAIL (Verstraelen et al., 2012 et 2013).

Il n'est cependant pas nécessaire d'avoir recours à des géosynthétiques « intelligents » pour obtenir des mesures de déformation des fibres le constituant. En effet, l'utilisation d'un système de mesure directement intégré au géosynthétique, bien que très pratique, n'est pas une obligation en soi. On peut très bien venir instrumenter un géotextile ou une géogridde quelconque, disponible sur le marché, au moyen de fibres optiques que l'on connectera alors ultérieurement à la nappe de géosynthétiques. Ce concept de mesure présente alors l'avantage de pouvoir choisir le système géosynthétique le plus adapté à l'application étudiée. A ce sujet, la suite du présent article rapporte un cas d'étude pratique concernant la construction et le monitoring permanent de remblais renforcés construits dans le cadre du projet d'extension de l'infrastructure ferroviaire de la gare de Mechelen (intitulé projet « by-pass – Mechelen »).

2. Instrumentation de remblais renforcés dans le cadre du projet « by-pass – Mechelen »

2.1. Présentation du projet « by-pass – Mechelen »

Dans le cadre des travaux d'extension de l'infrastructure ferroviaire à hauteur de la gare de Mechelen, des remblais renforcés ont été installés de manière à assurer la mise à quatre voies de la ligne de chemin de fer (Ligne L25N) reliant l'aéroport de Bruxelles National, tout d'abord, à la ville de Mechelen, et ensuite, aux métropoles d'Anvers et d'Amsterdam (voir Fig. 5). La pose de la nouvelle ligne de chemin de fer est, d'une part, nécessaire à l'augmentation de la vitesse de roulage des trains de 100 à 160 km/h pour permettre le passage de TGVs, conformément à un accord passé entre la Belgique et les Pays-Bas et d'autre part, elle répond aux besoins d'accroissement de la capacité du réseau résultant de la nouvelle liaison avec l'aéroport de Bruxelles National et les futurs projets de RER se développant au niveau national.

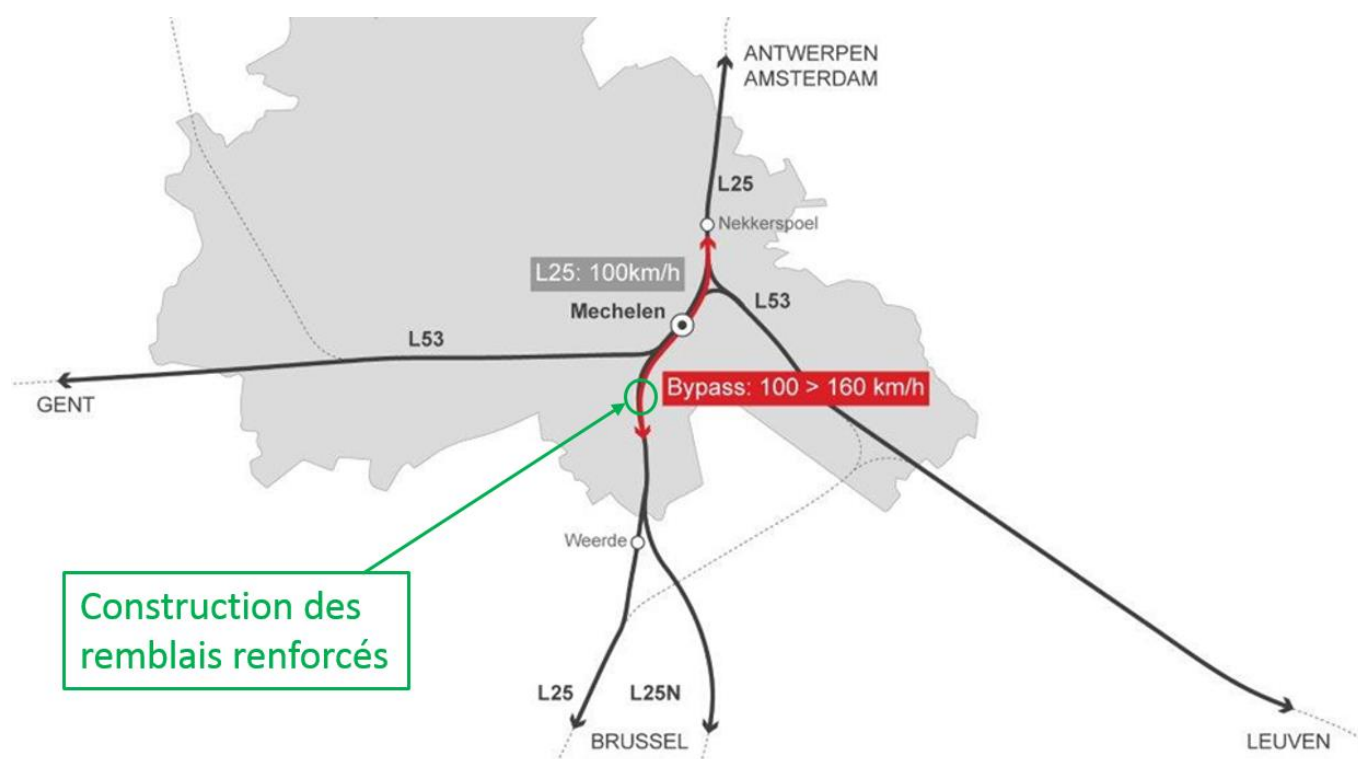


Figure 5. Représentation du réseau ferroviaire autour de la ville de Mechelen. Source : TUC RAIL.

2.2. Géométrie et composition des remblais renforcés

Dans le cadre de ce projet, mené à bien par une association des entreprises BAM-CEI De Meyer, Besix, Franki et Jan De Nul, deux types de remblais renforcés ont été installés comme illustré sur les figures 6 et 7. Sur une distance d'environ 200m, le premier remblai renforcé présente une inclinaison de 70° au niveau de son recouvrement. Ce dernier est réalisé en matériau géosynthétique destiné à être ensemencé afin de créer une paroi végétale. Sur une distance d'environ 50m, le remblai renforcé présente ensuite une face avant réalisée au moyen de gabions dont l'inclinaison est comprise entre 70 et 90°. Ces deux remblais présentent tous deux une hauteur de 6m. Ils sont armés au moyen de géogrilles de type FORTRAC 55/25 – 20/30 MP (Emotrade/Huesker) tel qu'illustré en Fig. 8. Ce type de géogrille présente une résistance à la traction à court terme de 55 kN/m et un allongement à la rupture d'environ 6%. Les géogrilles sont installées dans les remblais renforcés avec une entre-distance verticale de 50cm. Un recouvrement minimum de 30 à 50cm est prévu entre les différentes géogrilles une fois celles-ci déroulées. Ce recouvrement est nécessaire au bon fonctionnement du remblai renforcé. La durée de vie de l'ouvrage est fixée à 120 ans par TUC RAIL, le donneur d'ordre du projet, qui impose de plus que les déformations mesurées à partir de la fin de la construction du remblai (= post-construction strains) restent inférieures à 0.5 % et ce pour toute la durée de vie de l'ouvrage.

Section d'environ 200 m de long
Inclinaison du recouvrement de 70°
Hauteur du remblai = 6 m

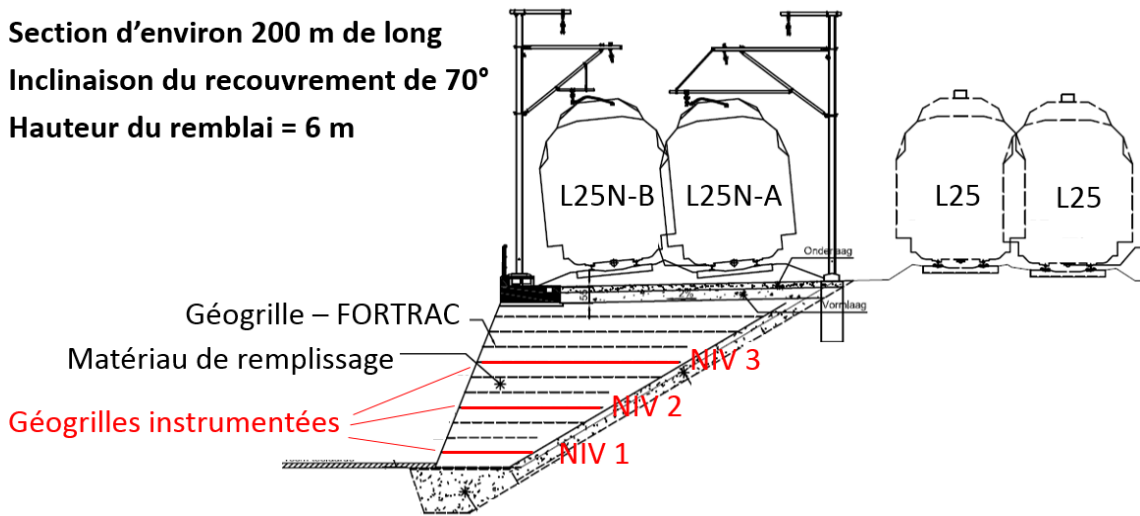


Figure 6. Remblai renforcé – section inclinée.

Section d'environ 50 m de long
Inclinaison du mur en gabion: 70 - 90°
Hauteur du remblai = 6 m

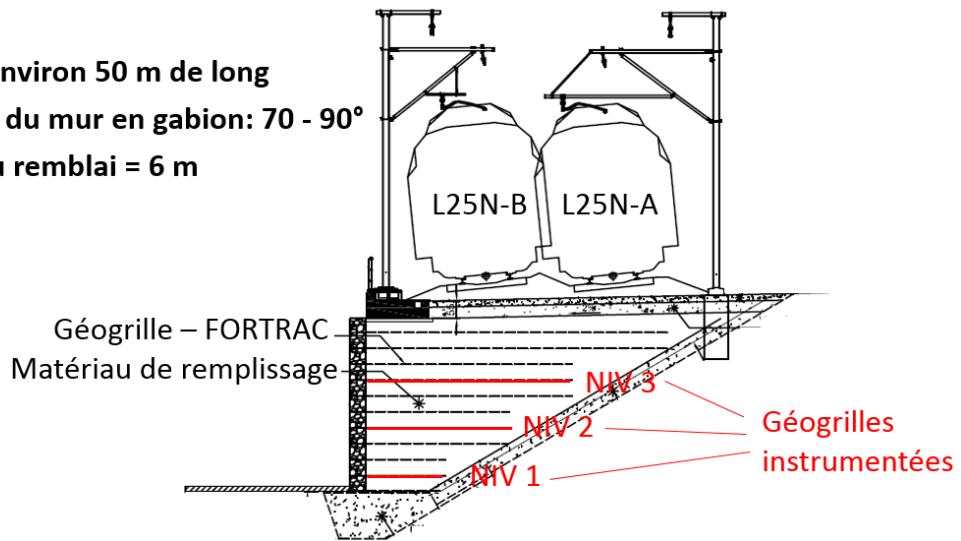


Figure 7. Remblai renforcé – section en gabions.

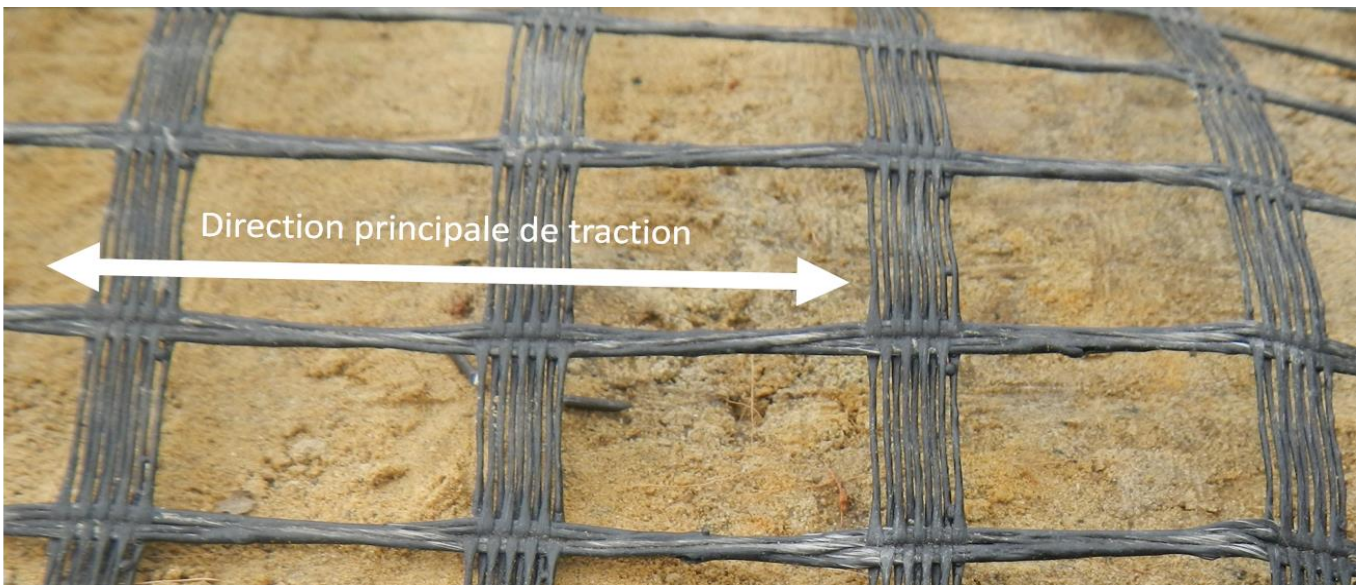


Figure 8. Géogridde de type FORTRAC 55/25 – 20/30 MP. Source : Emotrade/Huesker.

2.3. Dimensionnement des remblais renforcés

Les deux remblais renforcés ont été dimensionnés par TUC RAIL sur base de la norme française NF P 94-270 et de calculs numériques réalisés à l'aide de FLAC 2D (programme en différences finies) et TALREN (logiciel Terrasol). Le modèle final de calcul incluait la géométrie réelle du problème (dimensions et entre-distances des géogrilles, inclinaison des remblais...) et intégrait les différents aspects liés au drainage du remblai, à la présence de câbles et d'installations du chemin de fer. Les différents mécanismes de rupture interne ou externe ont été considérés dans le dimensionnement.

2.3.1. Dimensionnement des géogrilles vis-à-vis des efforts internes

Au niveau des mécanismes de rupture interne, les géogrilles ont au départ été étudiées vis-à-vis des efforts internes de traction. Des calculs comparatifs ont tout d'abord été menés sur des cas simplifiés de manière à estimer la légitimité du logiciel FLAC vis-à-vis du dimensionnement des efforts internes dans les géogrilles (voir Fig. 9). La figure 9 présente les résultats de calculs comparatifs effectués pour une géométrie simplifiée de remblai renforcé (hauteur de remblai de 6 m et géogrilles de 5 m de long). Comme illustré sur cette figure, les résultats obtenus à l'aide du logiciel FLAC sont comparables aux résultats obtenus au moyen d'une méthode de calcul analytique conforme à la NF P 94-270. Sur base de ces résultats, il fut alors décidé de dimensionner les géogrilles des deux types de remblais renforcés au moyen du logiciel FLAC, la complexité des géométries réelles étant telle que celles-ci sortaient du cadre de calcul des méthodes analytiques proposées dans la norme française. Une géométrie de calcul comparable à celle de la solution finale fut donc simulée et les géogrilles des deux types de remblais renforcés furent dimensionnées à l'aide du logiciel FLAC. La charge de service obtenue au moyen de ces simulations varie en fonction de la profondeur et de la longueur des géogrilles des remblais. Une charge de service maximale d'environ 11 kN/m fut obtenue pour la géogrille de 3 m de long installée au pied du remblai renforcé vertical (voir Fig. 7). A l'état limite ultime (ELU), un effort interne de traction maximal de 17 kN/m fut obtenu pour la même géogrille. Sur base des résultats de ces simulations et en tenant compte des exigences de déformations à long terme (post construction strain < 0.5% à 120 ans), le choix se porta finalement sur les géogrilles de type FORTRAC 55/25 – 20/30 MP. Tout d'abord, celles-ci présentent une résistance en traction à la rupture suffisante, caractérisée par un facteur de sécurité global compris entre 2 et 2.5 en fonction de l'approche de dimensionnement suivie et des différents facteurs partiels considérés. Ensuite, comme illustré en Fig. 10, ces géogrilles présentent un comportement en déformation beaucoup plus raide (allongement à la rupture de 6% maximum et fluage limité) que d'autres géogrilles du fait du matériau principal les constituant : l'alcool polyvinylique (PVA). En travaillant à une charge de 11 kN/m (valeur maximale de la charge de service rencontrée dans le cadre de ce projet), le taux de travail de la géogrille concernée sera de 20 %, ce qui correspond à un allongement à court terme de l'ordre de 2% et à un fluage d'environ 0.25% à 120 ans (voir Fig. 11).

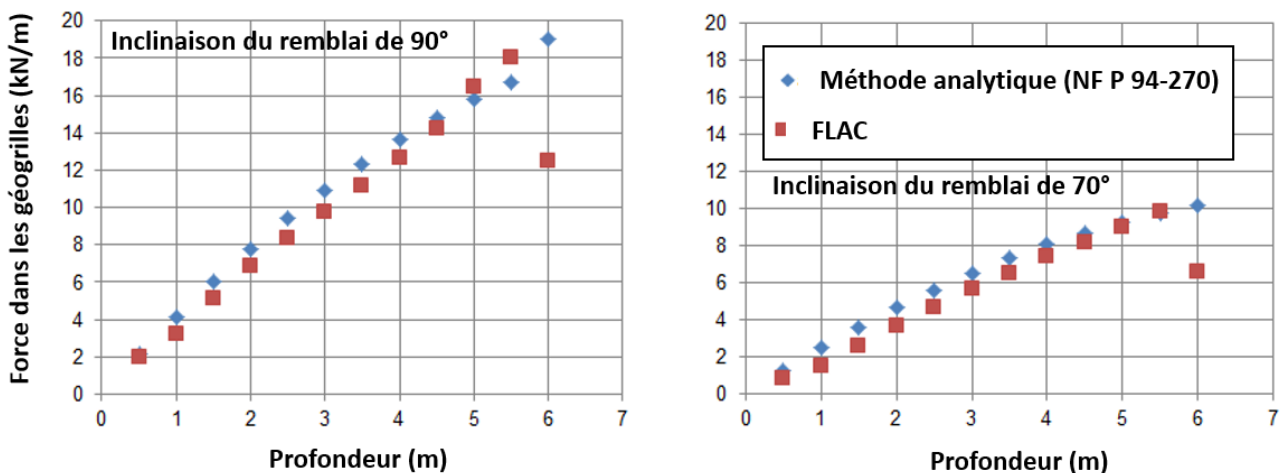


Figure 9. Calcul comparatif réalisé pour un remblai à géométrie simplifiée (hauteur de remblai : 6m et longueur des géogrilles : 5m). Pour le calcul analytique du remblai présentant une inclinaison de 70°, la méthode de calcul de la NF P 94-270, valable jusqu'à 76°, a dû être adaptée.

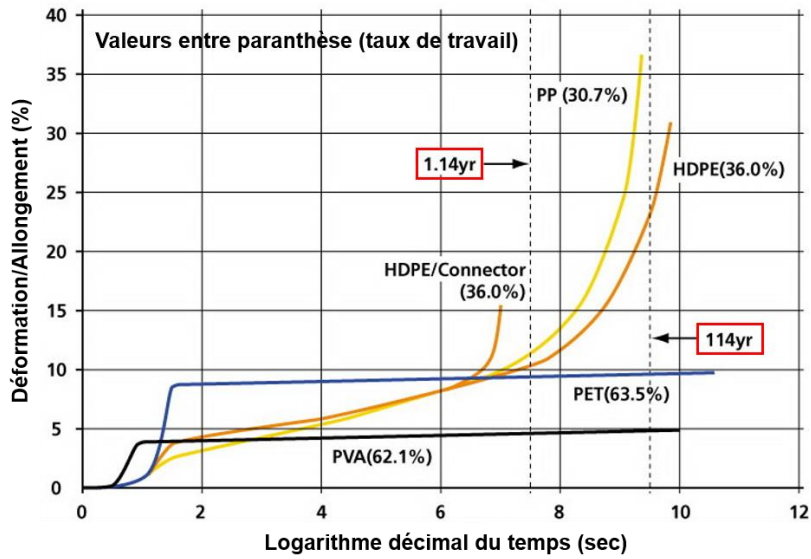


Figure 10. Comportement au fluage de différents polymères. Source : catalogue du fabricant (Huesker).

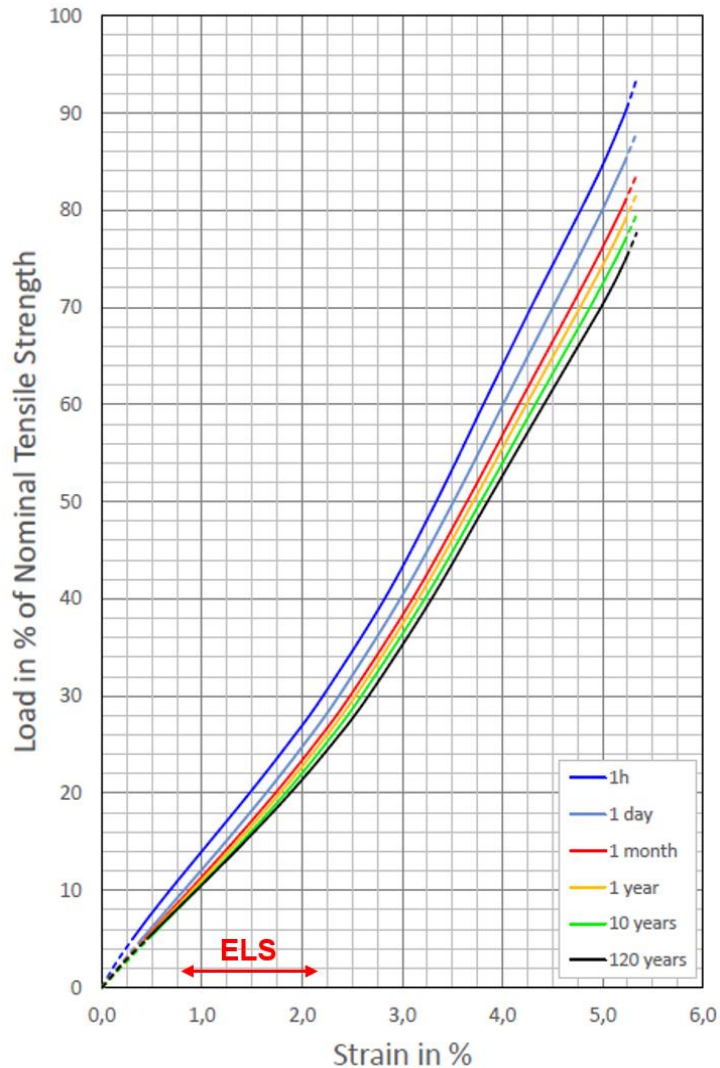


Figure 11. Domaine des déformations aux Etats Limites de Service (ELS) des géogrilles du présent projet représenté sur le graphe des isochrones des géogrilles de type FORTRAC en PVA illustrant l'évolution des déformations attendues (à court et long termes) en fonction du taux de travail des géogrilles (charge de service/traction à la rupture à court terme). Source : catalogue Huesker.

2.3.2. Matériau de remplissage du remblai et interaction « sol-géogridde »

Pour le matériau de remplissage du remblai, un sol sableux homogène - présentant des grains dont le diamètre maximal était inférieur à 5 mm - fut sélectionné. Ce matériau de remplissage fut d'abord soumis à des essais de cisaillement direct selon la norme EN ISO 12957-1; une valeur pic d'angle de frottement de 39° fut obtenue pour ces essais réalisés à différentes contraintes normales (30, 60 et 90 kPa). Dans un second temps, des essais de type « pull-out » furent réalisés selon la DIN 60009 pour tester l'interface « sol-géogridde » à l'arrachement. Les résultats de ces essais sont présentés en Fig. 12. Sur base d'une rupture de type Mohr-Coulomb, un angle de frottement de 39° fut établi à partir de ces résultats d'essais. En considérant la valeur de l'angle de frottement interne du sol obtenu (égal à 39°), un facteur d'interaction de 1 ($=39^\circ/39^\circ$) fut donc utilisé dans le dimensionnement pour l'interface « sol-géogridde ». Les résultats de la Fig. 12 illustrent aussi l'influence de l'effort normal appliqué sur l'effort d'arrachement et soulignent, en conséquence, l'importance de prévoir un compactage adéquat des différentes couches de matériaux de remplissage du remblai. On peut d'ailleurs noter qu'un contrôle du compactage *in situ* fut aussi réalisé en cours de construction au moyen d'essais à la plaque conduits à différents niveaux et en différents endroits des remblais renforcés.

2.3.3. Vérification de la résistance en traction de la connexion « géogridde – gabions »

Au-delà des essais d'arrachement classiques caractérisant l'interface « sol-géogridde », les connexions des géogrilles aux gabions furent aussi testées avant mise en place. Comme illustré en Fig. 13, des essais de traction furent réalisés, dans les laboratoires du CSTC, de manière à valider la résistance en traction des connexions « géogrilles-gabions ».

2.3.4. Considération des mécanismes de rupture externe

Après vérification des mécanismes de rupture interne (rupture des géogrilles en traction, arrachement des géogrilles du sol et rupture de la connexion des géogrilles aux gabions), les mécanismes de rupture externe furent considérés dans le dimensionnement par TUC RAIL. Les critères suivants furent évalués à l'aide de simulations numériques : le glissement du remblai renforcé sur sa base, la capacité portante du sol sous le remblai renforcé, l'équilibre du remblai renforcé du point de vue d'un basculement éventuel, la stabilité d'ensemble (vérification de l'apparition d'un cercle de glissement par exemple) et le tassement du remblai renforcé. La vérification globale des remblais renforcés installés à Mechelen est présentée en Fig. 14.

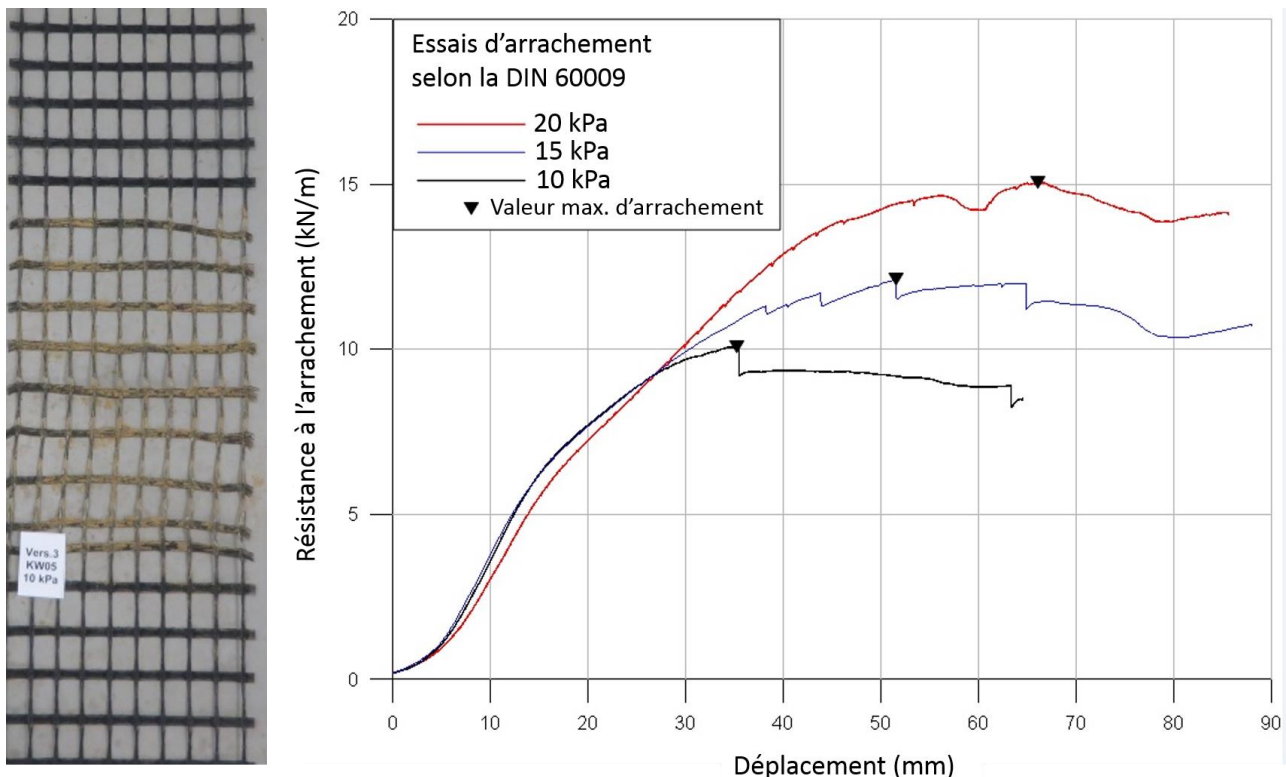


Figure 12. Résultats du test d'arrachement mené à l'interface « sol-géogridde ».



Figure 13. Essai de traction réalisé dans les laboratoires du CSTC de manière à tester la résistance de la connexion « géogridde – gabion ».

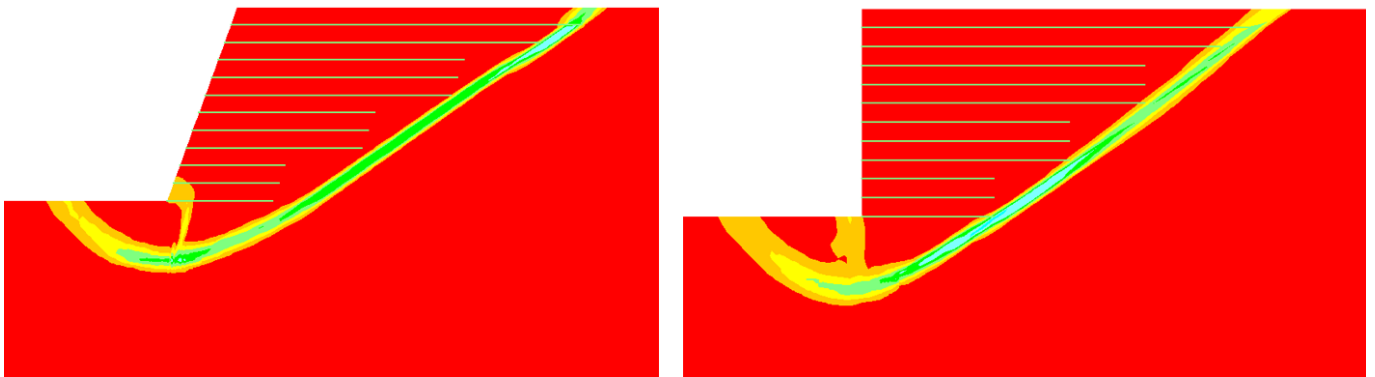


Figure 14. Vérification globale vis-à-vis des mécanismes de rupture externe au moyen du logiciel FLAC.

Comme illustré sur la Fig. 14, ce sont les mécanismes de rupture externe (stabilité d'ensemble) qui sont déterminants dans le cadre du présent dimensionnement lorsque l'on considère la géométrie réelle du problème et les propriétés réelles des géogrilles FORTRAC 55/25 – 20/30 MP installées dans ces remblais. A la suite de cette vérification, il fut d'ailleurs décidé de remplacer le sol original au pied des remblais par un sol grossier (couche de pierrailles 0-120mm) de manière à, d'une part, augmenter la capacité portante du sol sous les remblais et, d'autre part, à renforcer la stabilité globale des remblais, le sol grossier jouant alors le rôle de murs ou blocs stabilisants communément appelés « shear keys » dans la pratique.

2.4 Monitoring à long terme des déformations des géogrilles

Dans le cadre du présent projet, les deux types de remblais renforcés ont été instrumentés par le CSTC de manière à pouvoir vérifier leur comportement à long terme, non seulement durant la construction de ceux-ci mais aussi tout au long de leur durée de vie. Comme illustré sur les Figs. 6 et 7, deux sections des remblais renforcés ont été instrumentées : la première au niveau du remblai incliné et la seconde au niveau des gabions. L'instrumentation consiste ici à installer des câbles de mesure le long des géogrilles du remblai renforcé et ce pour trois niveaux différents par section étudiée (voir Figs. 6 et 7). Ces câbles de mesure, développés par le CSTC à partir de fibres optiques, sont destinés à la mesure des déformations des géogrilles et ce, dans la direction principale de traction (voir Fig. 8).

Comme expliqué dans Huybrechts et al. (2016), les fibres optiques peuvent être utilisées pour le monitoring permanent de structures géotechniques que ce soit selon un principe extensométrique (déformations mesurées par section via une technologie de type « FBGs » par exemple) ou de manière continue (mesure de la déformation moyenne sur 10 mm sur la longueur totale de l'élément via une technologie de type « Rayleigh scattering »). La précision de mesure obtenue au moyen de ces deux technologies de fibre optique est respectivement de l'ordre de 1 et 5 μ strains.

Comme illustré sur les Figs. 6 et 7, pour chaque type de remblai renforcé, les géogrilles sont réparties en quatre groupes présentant des longueurs différentes (3, 5, 7 et 10 m). Dans le cadre du présent projet, les géogrilles suivantes ont été instrumentées pour chaque section de mesure : les géogrilles intermédiaires des groupes de géogrilles de longueur égale à 3, 5 et 7 m (respectivement NIV 1, NIV 2 et NIV 3 sur les Figs. 6 et 7).

Durant la construction des remblais, les déformations dans les géogrilles devaient être mesurées juste après l'installation de celles-ci ainsi qu'après la mise en place et le compactage d'un mètre de matériau de remplissage sur celles-ci (= contrôle du fonctionnement des géogrilles). Dès la fin des travaux de construction des remblais renforcés commence alors le monitoring long terme des déformations (= begin post-construction strain). Celles-ci pourront ensuite être mesurées tout au long de la vie de l'ouvrage. Les fibres optiques sont donc destinées à être intégrées de manière définitive dans l'ouvrage. Les paragraphes suivants décrivent l'instrumentation des géogrilles *in situ* et présentent les premières mesures de déformation obtenues au moyen des fibres optiques.

2.4.1 Instrumentation *in situ* des géogrilles au moyen de fibres optiques

Dans le cas présent, deux types de fibres optiques sont installées sur toute la longueur de chaque géogrille à instrumenter avec une entre-distance entre capteurs respectifs de 50 cm (fibre optique « classique » protégée par un tube en nylon de 3.2 mm de diamètre) et 80 cm (fibre optique « renforcée »).

La figure 15 illustre le premier niveau de géogrille à instrumenter pour le remblai renforcé incliné. Comme illustré sur les Figs. 16 à 18, chaque fibre optique installée sur place est aussi accompagnée de câbles de thermocouples destinés à monitorer la température en chaque zone de mesure. En effet, comme expliqué dans Huybrechts et al. (2016), les mesures de déformation réalisées au moyen de fibres optiques doivent être corrigées vis-à-vis des variations de température au vu de l'influence de celle-ci sur la mesure.

Comme illustré sur la Fig. 19, au niveau de la face avant du remblai, les câbles de mesure sont rassemblés et protégés au moyen d'un tube de protection rigide en plastique (tube rouge sur la figure). Ils sont ensuite guidés au travers du recouvrement du remblai pour être connectés à l'armoire de mesure qui restera de manière permanente sur le site du monitoring.

Avant que les fibres optiques et les câbles de thermocouples ne soient fixés à la géogrille à instrumenter, cette dernière est tendue et ancrée dans le matériau de remplissage du remblai, comme illustré sur la Fig. 20.

Les différentes fibres optiques sont ensuite connectées, capteur par capteur, à la géogrille à instrumenter. Tous les points d'ancrage de chaque fibre optique (illustrés en Fig. 18) sont connectés à la même fibre longitudinale de la géogrille à instrumenter. Lors de cette opération, il est nécessaire de vérifier que la fibre optique présente une légère pré-tension de manière à assurer la lecture des déformations une fois les fibres connectées à la géogrille. Cette légère pré-tension de la fibre optique est appliquée, capteur par capteur, durant la mise en place progressive d'une couche de protection de sable fin (fraction 0-2mm) sur les fibres optiques (voir Fig. 21).



Figure 15. Première géogridde à instrumenter (NIVEAU 1 – remblai renforcé incliné).
Source : CSTC.

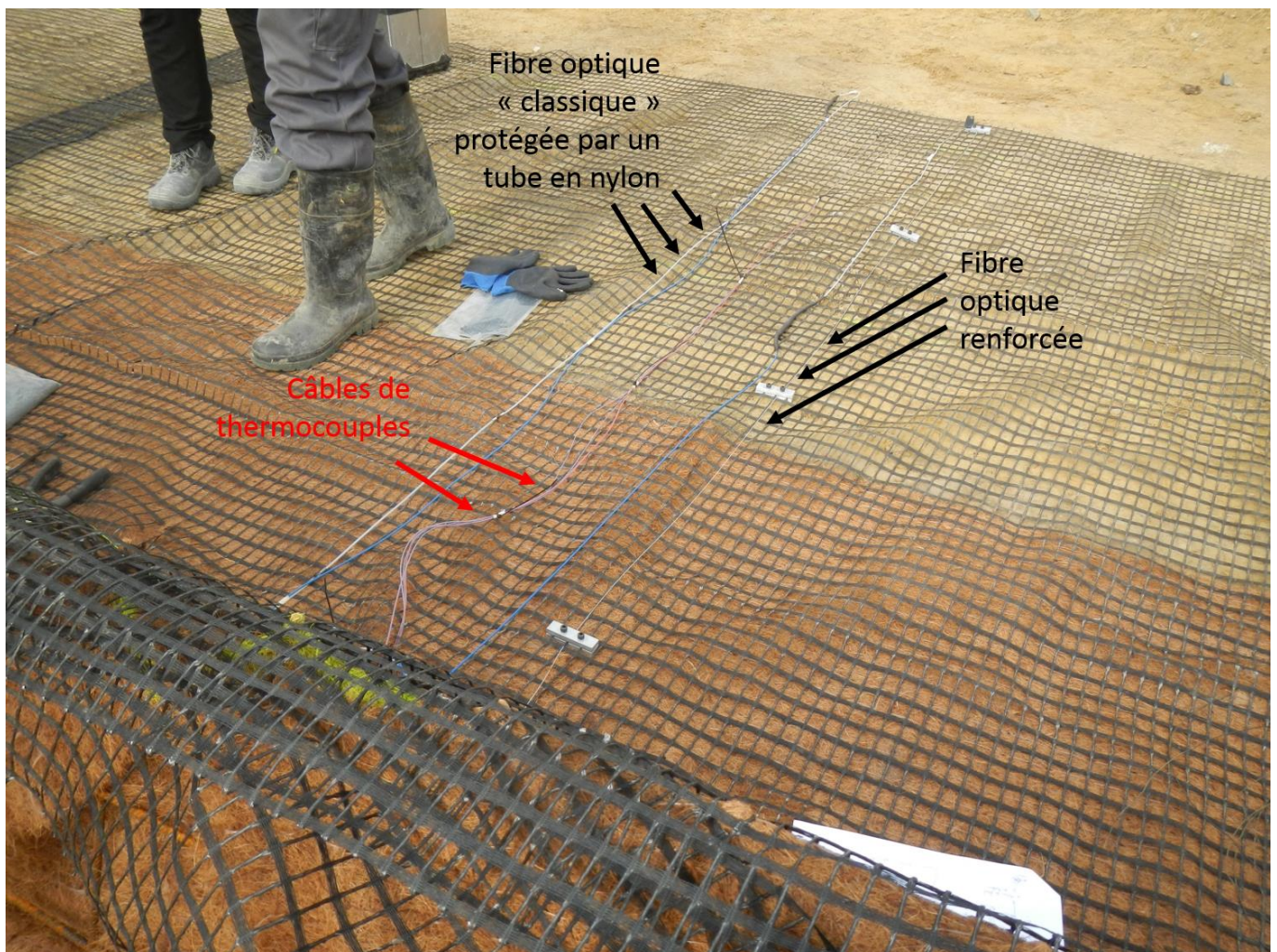


Figure 16. Installation des câbles de mesure le long de la géogridde du NIVEAU 1 pour le remblai renforcé incliné – vue 1. Source CSTC.

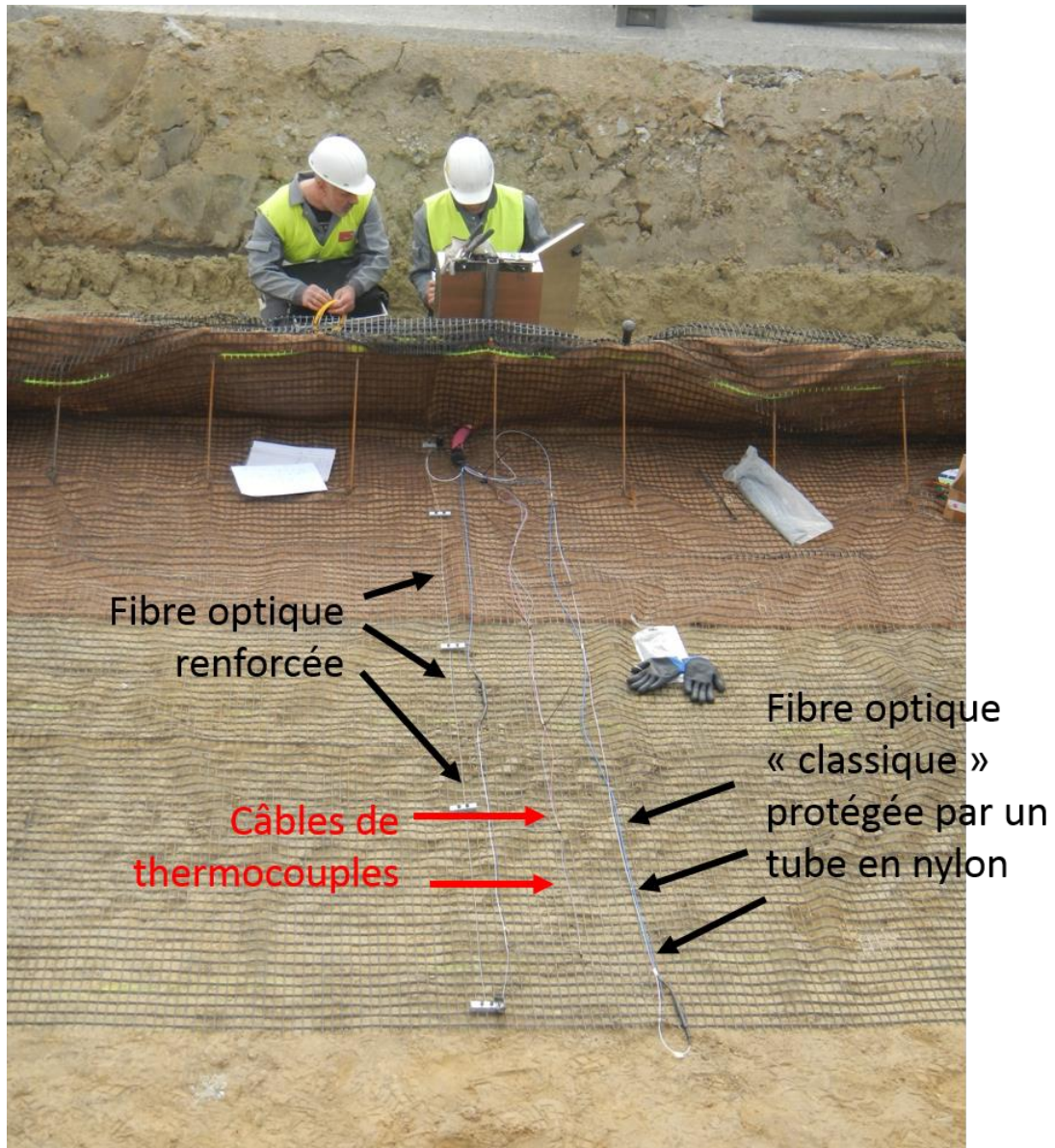


Figure 17. Installation des câbles de mesure le long de la géogrille du NIVEAU 1 pour le remblai renforcé incliné – vue 2. Source CSTC.

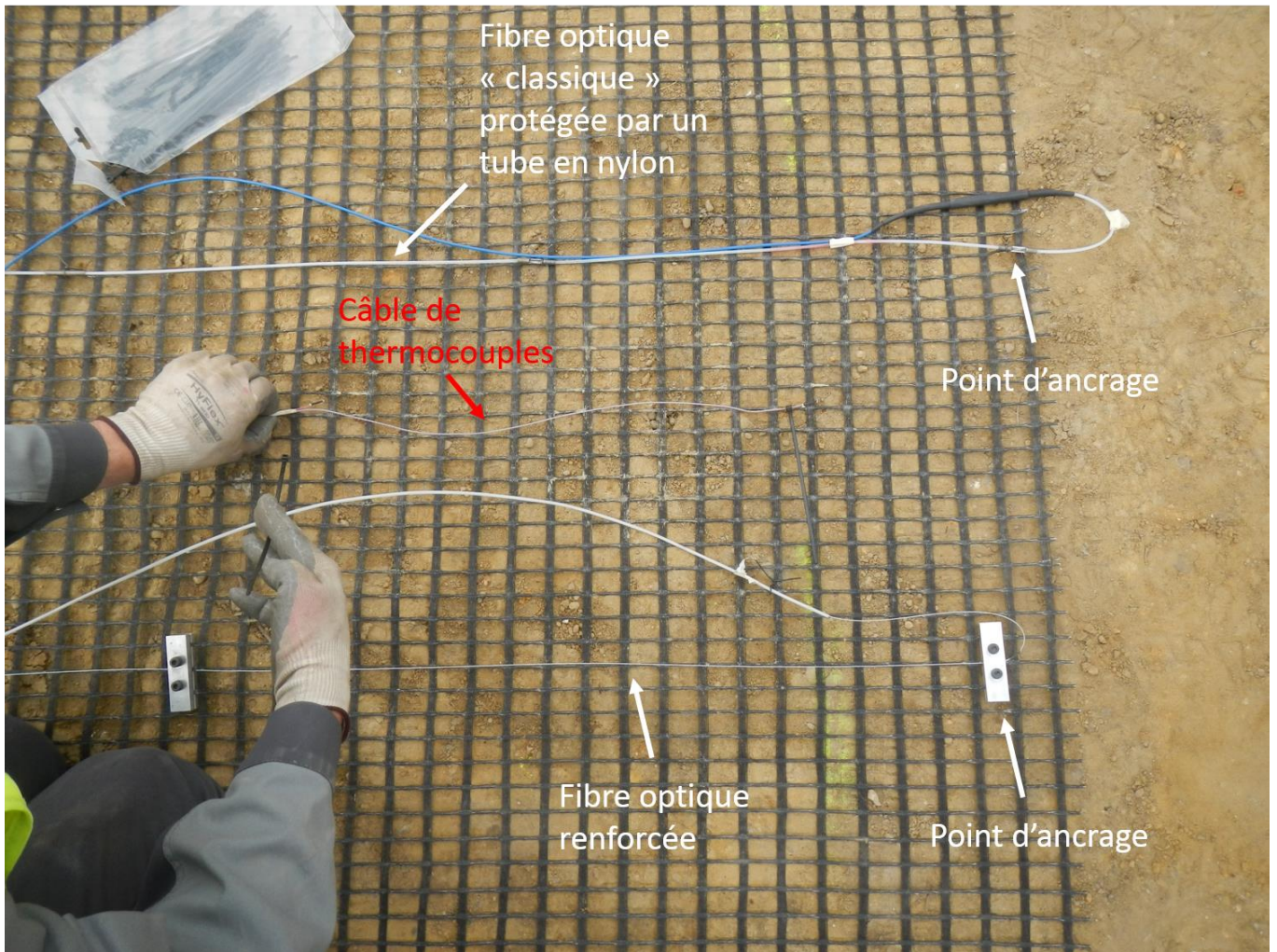


Figure 18. Installation des câbles de mesure le long de la géogrid du NIVEAU 1 pour le remblai renforcé incliné – vue 3. Source CSTC.



Figure 19. Protection des câbles de mesure au niveau du recouvrement du remblai et connexion à l'armoire de mesure permanente. Source : CSTC.



Figure 20. Ancrage de la géogridde à instrumenter dans le massif du remblai. Source : CSTC.

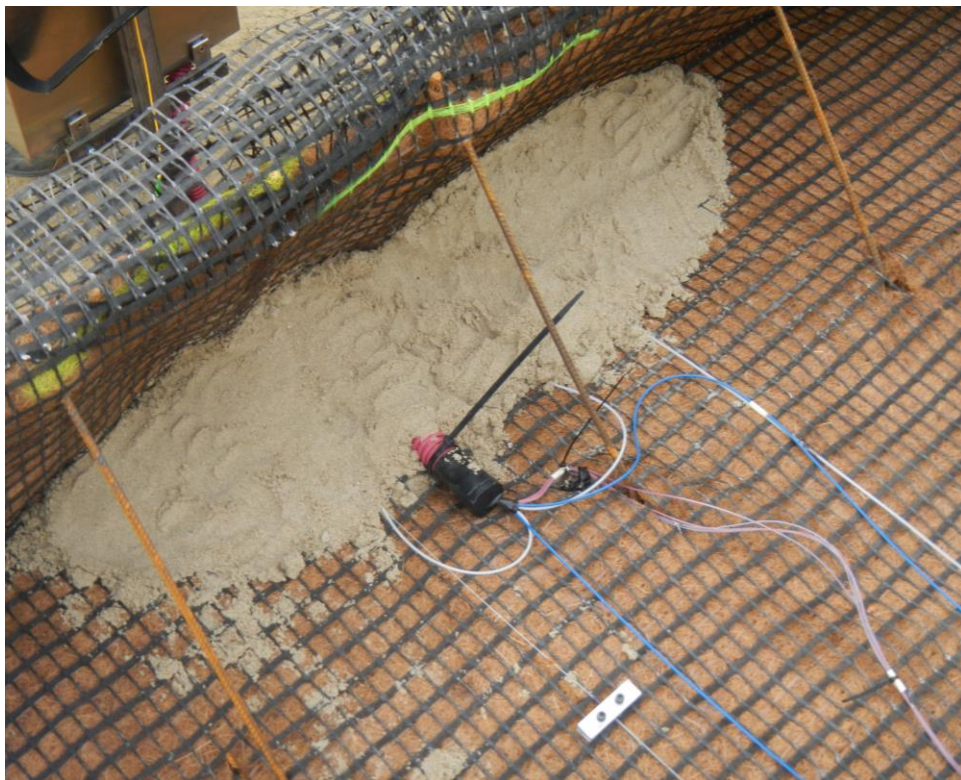


Figure 21. Pré-tension et connexion progressives des fibres optiques à la géogridde pendant la mise en place d'une couche protectrice de sable fin (fraction 0-2mm). Source : CSTC.

Cette couche de 10 cm de sable fin est appliquée sur les fibres optiques de manière à éviter une rupture de celles-ci par poinçonnement (en raison de la granulométrie du matériau de remplissage). Une fois les fibres optiques connectées à la géogridde et protégées par une première couche de sable fin, un géotextile (de type séparation) et une seconde couche de 10 cm de sable fin (fraction 0-2mm) sont encore étendus sur les câbles de mesure, comme illustré en Fig. 22. Le géotextile de séparation est choisi de manière à ne pas influencer la rigidité du remblai renforcé. On suppose donc que son influence sur le comportement de l'ouvrage est négligeable. Sa seule fonction est de protéger localement les câbles de mesure d'une rupture éventuelle par poinçonnement. Les déformations sont mesurées avant et après pré-tension et connexion des fibres optiques à la géogridde ainsi qu'en toute fin d'installation de manière à obtenir les mesures initiales. Une fois les câbles de mesure protégés par les deux couches de sable et le géotextile, le matériau de remplissage du remblai peut être installé sur la totalité des géogriddes du remblai et compacté.



Figure 22. Protection de l'instrumentation au moyen d'un géotextile (type séparation) et de deux couches de sable fin (fraction 0-2 mm). Source : CSTC.

Les paragraphes précédents présentent l'installation des câbles de mesure le long d'une géogridle de 3 m de longueur. Le même principe d'installation est valable pour les autres géogridles des sections de mesure. Dans le cadre de ce projet, 22 câbles de mesure (de type fibre optique) ont finalement été installés dans les deux remblais renforcés, permettant la mesure des déformations au moyen de 103 capteurs de mesure. Ces derniers étaient configurés de manière à mesurer une déformation maximum de l'ordre de 1.2 %.

2.4.2 Premières mesures *in situ* et comparaison avec les résultats du modèle FLAC

Les premières mesures effectuées pour la géogridle (NIV 2 du remblai renforcé incliné) sont données en Fig. 23 à titre d'illustration du monitoring permanent des géogridles. Ces premiers résultats de mesure illustrent bien l'influence du compactage sur le comportement en traction des géogridles. Les déformations au centre de la géogridle s'élèvent déjà à 4000 μ strain après mise en place et compactage de 50 cm de matériau de remplissage. A titre d'indication, cela correspond, pour cette zone, à 55% des déformations mesurées après achèvement de la construction du remblai renforcé. Comme illustré sur la Fig. 23, les déformations de la géogridle se situent proches de l'intervalle compris entre 1 et 2% de déformation conformément au dimensionnement (voir aussi Fig. 11).

La seconde étape de l'analyse consiste à traduire ces déformations en termes d'efforts de traction au sein de la géogridle. Cette opération est réalisée en considérant l'évolution de la raideur des géogridles au cours du temps, information fournie par le fabricant (voir Fig. 11). Ces efforts de traction seront ensuite comparés aux efforts déduits du modèle numérique FLAC utilisé dans le cadre du dimensionnement (voir Fig. 24). Comme illustré en Fig. 24, il est possible de corréliser les efforts déduits des mesures aux efforts calculés au moyen du logiciel FLAC en faisant varier la valeur de l'angle de frottement interne du matériau de remplissage du remblai.

Dans le cas présent, les mesures des efforts peuvent être approchées pour un angle de frottement interne de 30° (= angle de frottement du sol et angle de frottement à l'interface sol-géogridle), ce qui peut être expliqué de deux manières différentes. Soit le matériau granulaire utilisé pour le remplissage du remblai renforcé présente un tel angle de frottement (ce qui paraîtrait étonnant vu les essais réalisés en cours de projet – voir section 2.3.2 du présent article). Soit les efforts ne coïncident pas pour un angle de frottement interne réaliste de 39° du fait de l'influence du compactage sur les efforts internes dans les géogridles, ce qui nous semble l'hypothèse la plus réaliste au vu des mesures intermédiaires, effectuées au moyen des fibres optiques, au cours des différentes phases de construction du remblai renforcé (voir Fig. 23). Cette observation est sans doute une des conclusions principales de la présente étude : la simulation correcte des effets du compactage sur le développement des efforts internes dans les géogridles se révèle un défi numérique très intéressant pour l'avenir de manière à mieux comprendre le comportement réel de ce type de construction.

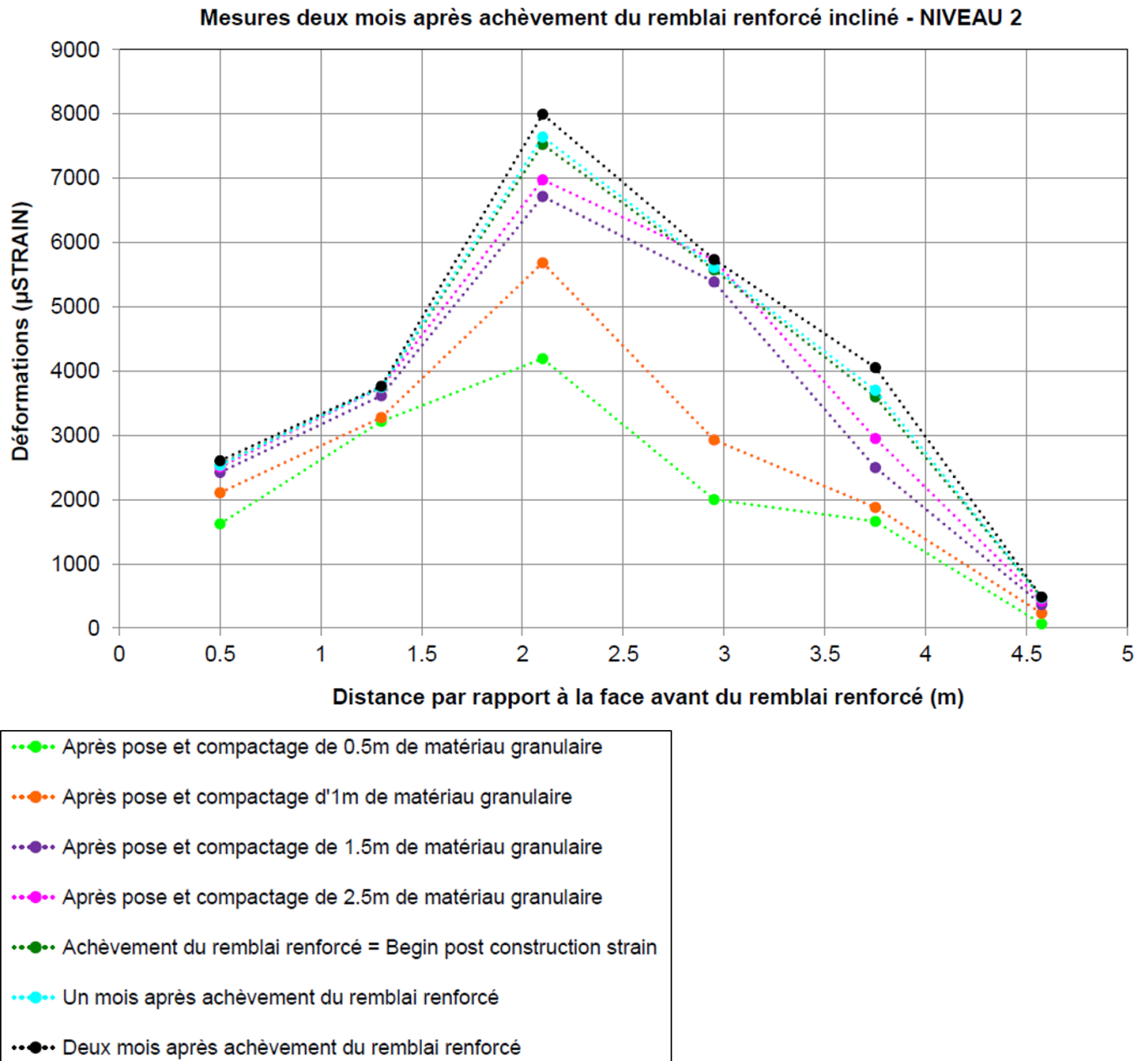


Figure 23. Déformations mesurées au moyen des fibres optiques renforcées deux mois après achèvement du remblai renforcé incliné (géogrille du NIV 2).

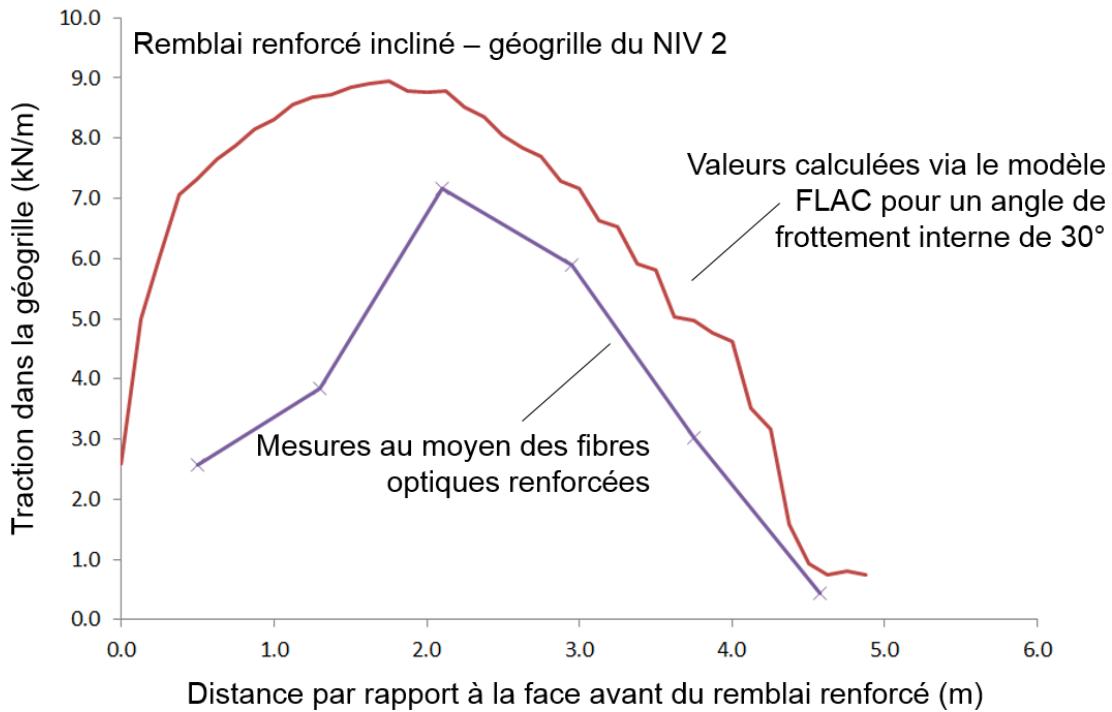


Figure 24. Comparaison des résultats de simulation numérique (FLAC) avec les mesures effectuées, au moyen des fibres optiques renforcées, après achèvement du remblai renforcé incliné.

3. Conclusions

Ces dernières années, les remblais renforcés au moyen de géosynthétiques sont de plus en plus utilisés comme alternative à des solutions plus classiques de soutènement. Dans le présent article, les auteurs illustrent tout d'abord les dernières tendances - en termes de concepts et de géomatériaux utilisés - liées au développement de cette technique en Belgique. Ils se concentrent ensuite sur la description plus détaillée d'un projet particulier : la construction de remblais renforcés au moyen de géogrilles dans le cadre du projet « by-pass – Mechelen ».

Dans le cadre de ce projet, le dimensionnement des remblais renforcés est réalisé par calcul numérique au moyen du logiciel FLAC, l'utilisation de celui-ci ayant été validée au préalable sur base d'une comparaison avec les résultats des méthodes analytiques de la norme NF P 94-270. Le présent dimensionnement considère aussi bien les mécanismes de rupture interne que les mécanismes de rupture externe des remblais renforcés. Le dimensionnement est étayé par des essais de laboratoire (essais de cisaillement sur le matériau granulaire de remplissage, essais d'arrachement « géogrille-sol », essais de traction sur la connexion « géogrille-gabion ») et par des mesures *in situ* des déformations des géogrilles. Ces mesures de déformation sont réalisées à l'aide de fibres optiques installées le long des fibres longitudinales des géogrilles durant l'installation de celles-ci sur chantier.

Comme illustré dans le présent article, l'instrumentation *in situ* au moyen de fibres optiques présente les avantages suivants :

- le fait de pouvoir être installées sur n'importe quel type de géogrille, géotextile, bande qui sera alors choisie en fonction des caractéristiques propres au dimensionnement et à la fonction de l'ouvrage (dans le cas présent : choix de géogrilles en PVA du fait de la plus grande raideur de ce géomatériau),
- le fait de ne pas influencer la rigidité ou le comportement réel du remblai monitoré de par l'incidence négligeable des fibres optiques sur le comportement mécanique de l'ouvrage,
- le fait de pouvoir suivre, dès l'installation des fibres optiques sur chantier, l'évolution des déformations dans les renforcements du remblai, que ce soit durant les différentes phases de construction du remblai renforcé mais aussi tout au long de sa durée de vie,
- le fait de pouvoir confronter et étayer le dimensionnement aux mesures *in situ* durant la construction du remblai renforcé et par après, à des fins d'assurance qualité (= contrôle du comportement à long terme du remblai renforcé).

Dans le cas présent, des efforts internes de traction du même ordre de grandeur ont été obtenus via le calcul numérique (logiciel FLAC) et via l'instrumentation *in situ*, mettant en évidence la fiabilité d'un tel monitoring dans le cadre d'un dimensionnement intégré. Dans l'absolu, les différences observées entre le modèle numérique et les résultats du monitoring sont dues à la difficulté de simuler numériquement l'effet du compactage sur le comportement en traction des géogrilles. Cet effet, mis en évidence par les mesures fibres optiques, justifie l'intérêt du monitoring des déformations et d'un contrôle *in situ* du compactage.

Pour conclure, il est certain qu'à l'avenir, les perspectives de développement des remblais renforcés sur le marché belge seront intimement liées à une démarche de dimensionnement intégrée prévoyant d'une part des essais caractérisant les (géo)matériaux mis en place sur chantier et d'autre part des mesures *in situ*. Un monitoring permanent adéquat, utilisant notamment les fibres optiques, permet non seulement d'étayer le dimensionnement pendant les différentes phases de construction mais aussi de contrôler le comportement en service et l'éventuel fluage de l'ouvrage au cours du temps.

4. Remerciements

Les auteurs tiennent finalement à remercier Frans De Meerleer (Texion) et Frans De Schepper (Emergo) pour leur aide précieuse à la rédaction de cet article ainsi que les techniciens du CSTC impliqués dans l'instrumentation *in situ* des géogrilles : Bernard André, Rosario Bonsangue et Tanguy Leduc.

5. Références bibliographiques

- Huybrechts N., De Vos M., Van Lysebetten G. (2016) Advances and innovations in measurement techniques and quality control tools, *Proc. Int. Symp. Design of Piles in Europe – How did Eurocode 7 change daily practice? Vol. I*, 209-233.
- Verstraelen J., Lejeune C., De Clerq E. (2012) Realisation of integrated steel landscape slopes within existing railway embankments, *Proc. Int. Symp. Ground Improvement – Recent Research, Advances & Execution Aspects of Ground Improvement Works, Vol. IV*, 169-179.
- Verstraelen J., De Schepper F., De Clerq E. (2013) Nieuw concept voor spoorverbredingen in ophoging met steile, groene taluds en ingebetonnerde geogrids. *Geotechniek 17 (3)*, 58-62.