

REMBLAIS DE GRANDE HAUTEUR SUR INCLUSIONS RIGIDES AVEC MATELAS RENFORCE PAR NAPPE EN TREILLIS SOUDES.

HIGHT EMBANKMENT BASED ON RIGID INCLUSIONS WITH HORIZONTAL REINFORCEMENT OF STEEL WIRE MESH.

Claire BOUTET¹, Blandine LEFEBVRE²

¹ Hydrogéotechnique, Rouen, France

² Ménard, Orsay, France

RÉSUMÉ – La construction d'un pont routier à Ferrières-en-Bray en Normandie a nécessité la mise en place de remblais de 10 m de hauteur sur des alluvions compressibles. Un renforcement des sols par inclusions rigides a été réalisé avec une particularité au sein de son matelas de répartition : des nappes en treillis soudés. Le but de cet article est de présenter un retour d'expérience sur cette technique peu courante en France.

ABSTRACT – The construction of a road bridge in Ferrières-en-Bray, Normandy, required 10 m high embankments on soft soils. A reinforcement of the soil by rigid inclusions was carried out with a particularity into its load transfer platform : steel wire meshes. The purpose of this article is to provide feedback on this unusual technique in France.

1. Introduction

La modernisation de la voie ferrée Serqueux-Gisors en Normandie a nécessité la création d'un ouvrage d'art à Ferrières-en-Bray. Une coupe schématique du projet est présentée en Figure 1.

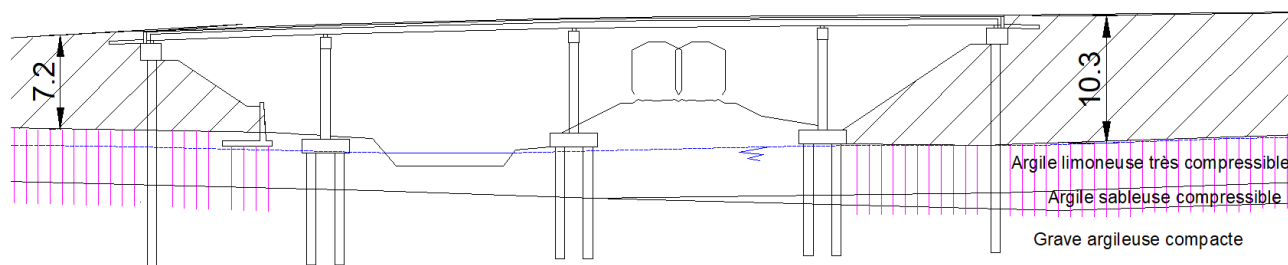


Figure 1: Profil en long schématique du projet

Les remblais, hachurés sur la figure ci-dessus, atteignent une hauteur de 10.3 m. Ils sont mis en place dans une vallée alluviale avec environ 8 m de sols compressibles. Le modèle géotechnique est le suivant :

Tableau 1. Modèle géotechnique

Nature	Ep. m	γ_h kN/m ³	C_u kPa	c' kPa	ϕ' °	E' MPa	α	GTR
F1-Argile	1	18	/	5	15	4.5	2/3	/
F2a-Argile limoneuse	5.5	15	36	5	20	1.4	1/2	A2, A3, F11/A3th, F12/A2th
F2b-Argile sableuse	2.5	17	/	5	20	9.2	1/2	
F3-Graves argileuses	5	20	/	0	35	74	1/3	B5, A2s, A3m
F4-Marnes	>7	/	/	/	/	50	2/3	/

Les caractéristiques œdométriques retenues pour la couche compressible sont les suivantes :

Tableau 2. Caractéristiques œdométriques de la couche compressible

Nature	C_c	C_s	e_0	POP kPa	C_v m ² /s	C_α	$C_{\alpha e}$
F2-Argile	0.584	0.0635	1.697	20	$9.5 \cdot 10^{-8}$	0.021	0.045

Dans le faciès F2a, le pourcentage de matière organique varie entre 3 et 13%, en moyenne autour de 8%.

Le niveau d'eau est environ au niveau du terrain naturel.

2. Solution retenue

Sans renforcement, les tassements attendus sont de l'ordre du mètre et la durée de consolidation s'étale sur plusieurs années, ce qui n'était pas envisageable. Il a été retenu une solution d'amélioration de sols par inclusions rigides, avec un matelas de répartition composé de 2 m de graves drainantes et de 2 nappes de treillis soudés. L'ensemble a été associé à des drains verticaux pour réduire la durée de consolidation de la couche compressible. Une vue en plan d'une culée est présentée en Figure 2. On y observe le maillage des inclusions (maille de 1.4 m x 1.4 m à 2 m x 2 m selon les zones) et les drains verticaux entre chaque maille.

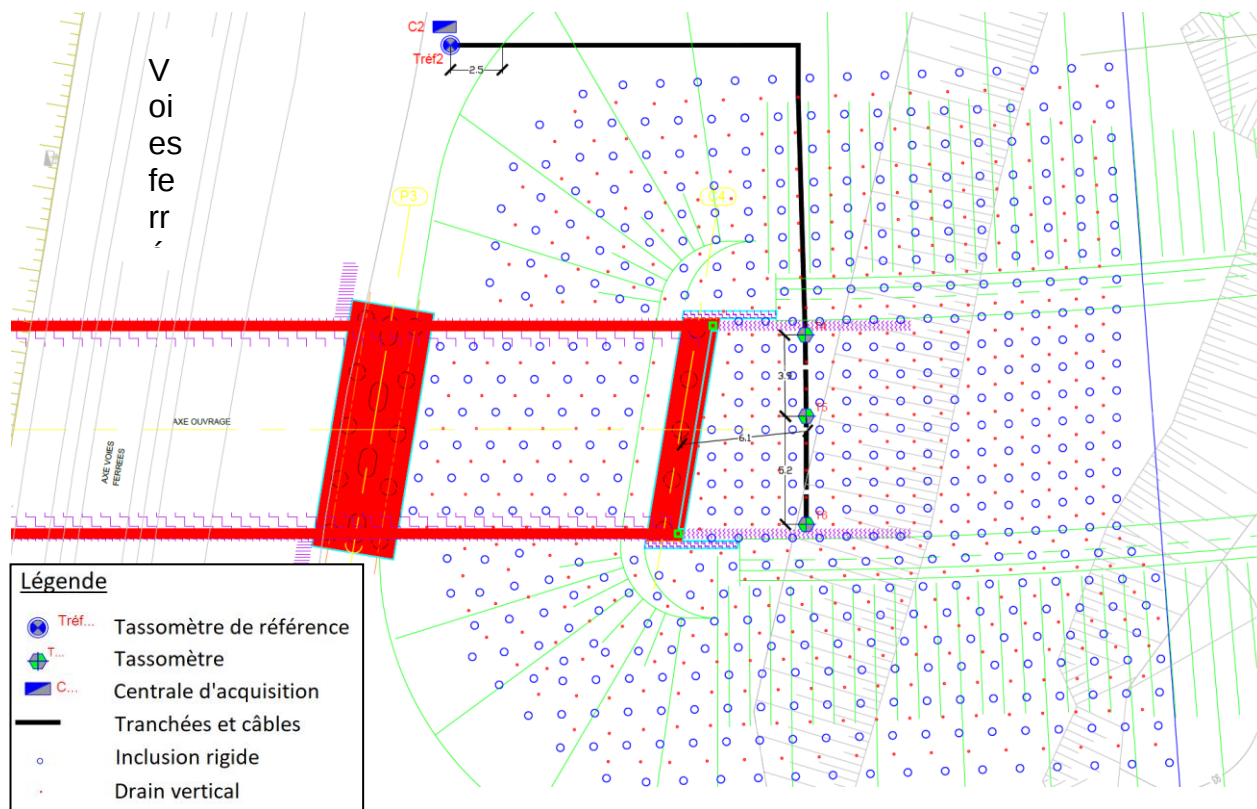


Figure 2: Disposition des drains verticaux, inclusions rigides et de l'instrumentation mise en place

La coupe type de la solution est présentée en Figure 3 (drains verticaux non représentés). Les inclusions traversent l'intégralité des couches compressibles et sont ancrées de 50 cm dans la couche graveleuse F3.

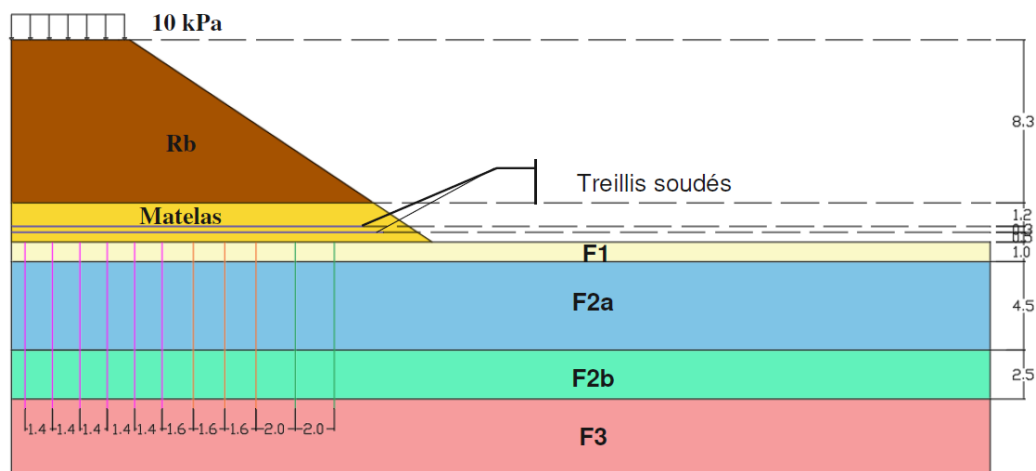


Figure 3: Coupe schématique de la solution

Les deux nappes des treillis sont espacées de 30 cm et sont disposées 50 cm au-dessus de la tête de inclusions rigides. Aucune armature n'a été mise en place dans les inclusions. D'après les modélisations aux éléments finis réalisées, les tassements maximaux attendus sous les remblais sont de 12 cm avec cette solution.

Chaque bloc technique a été instrumentalisé avec 3 capteurs de tassements hydrostatiques. Les mesures sont les suivantes au niveau des remblais de 10.3 m de hauteur :

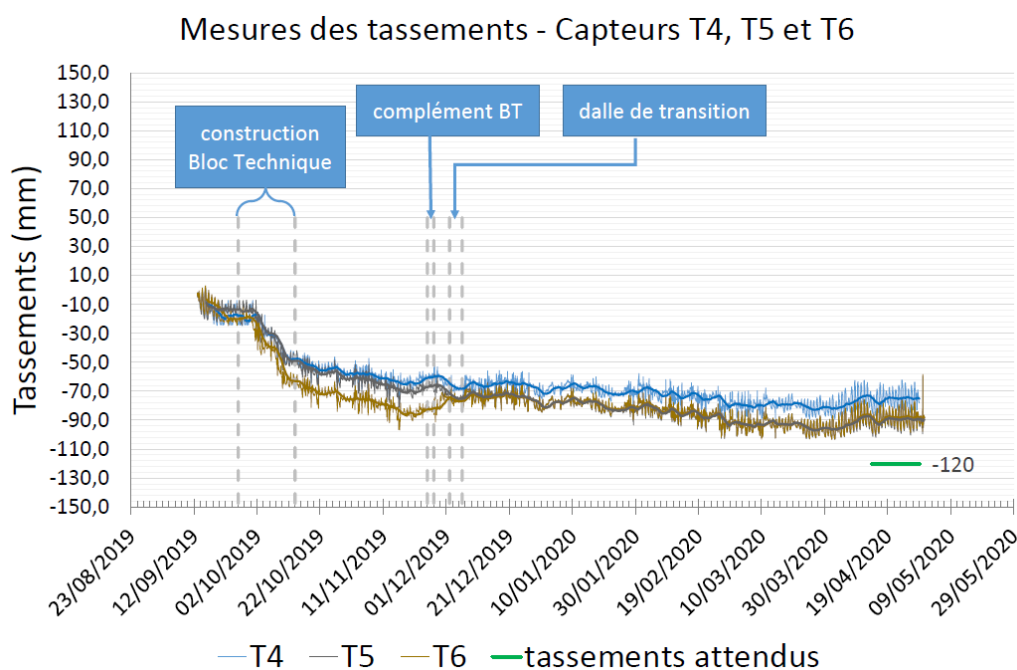


Figure 4: Tassements mesurés

Les tassements maximaux mesurés sur site sont de l'ordre de 10 cm (Figure 4), pour des tassements estimés à 12 cm par la modélisation aux éléments finis. Les drains mis en place ont permis d'acquérir 90% des tassements sur 2 mois. Les tassements obtenus sont globalement conformes aux attentes. Aucun désordre n'a été observé lors de la montée des remblais, ni jusqu'à aujourd'hui, deux ans après la fin des travaux. Il faut cependant encore attendre un tassement de fluage à très long terme, lié à la présence de matière organique.

3. Choix des treillis soudés

Bien que la géométrie choisie d'un remblai soit cohérente avec une stabilité à long terme, une fois que le sol de fondation s'est consolidé sous la charge de remblai imposée, la même géométrie peut engendrer une instabilité à court et moyen terme, avant la consolidation du sol de fondation.

Dans le sol de fondation, sous le remblai, la direction principale de la déformation est horizontale. À l'état non renforcé, cela indique un potentiel de rupture du remblai et du sol de fondation par étalement latéral. Ce mode de rupture peut être évité en introduisant une couche de renfort horizontale dans le matelas, à la base du remblai. Le renforcement doit alors présenter une rugosité de surface, une résistance à la traction et une rigidité à la traction axiale adéquates, permettant de reprendre les contraintes de cisaillement horizontales développées à la base du remblai.

Pour ce projet, les déplacements et les contraintes étaient très importants, un renforcement à la base du remblai par treillis soudé a donc été étudié. Le choix du treillis soudé fut le résultat de deux réflexions :

- Comment justifier de la stabilité du remblai avec un déplacement horizontal si important ?
- Comment limiter le cisaillement en tête d'inclusion afin d'éviter de les armer ?

Un renforcement en géogridde aurait sûrement permis justifier l'intégrité du remblai, mais la mise en place de nappes en acier, au lieu de nappe géotextiles plus classiques, a permis d'éviter l'étalement de l'ouvrage et de reprendre les efforts horizontaux (parasites pour les inclusions) grâce à la forte résistance de l'acier aux efforts de traction.

Avant toute chose, il est nécessaire de rappeler le vocabulaire :

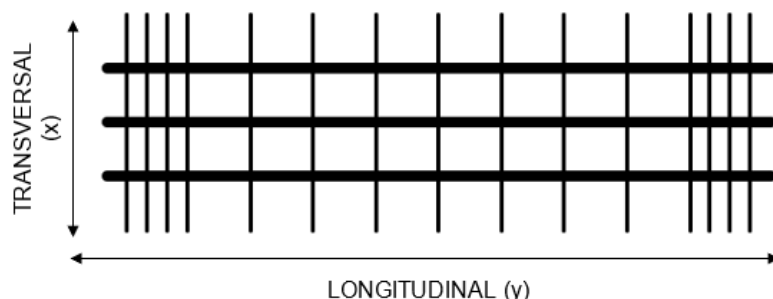


Figure 5: Représentation schématique d'un treillis soudé

Le sens longitudinal du treillis soudé (Figure 5) correspond au sens transversal du remblais (Figure 6). Aussi lorsque l'on résonne en mètre linéaire de nappe de treillis soudé, cela sera dans le sens longitudinal du remblai.

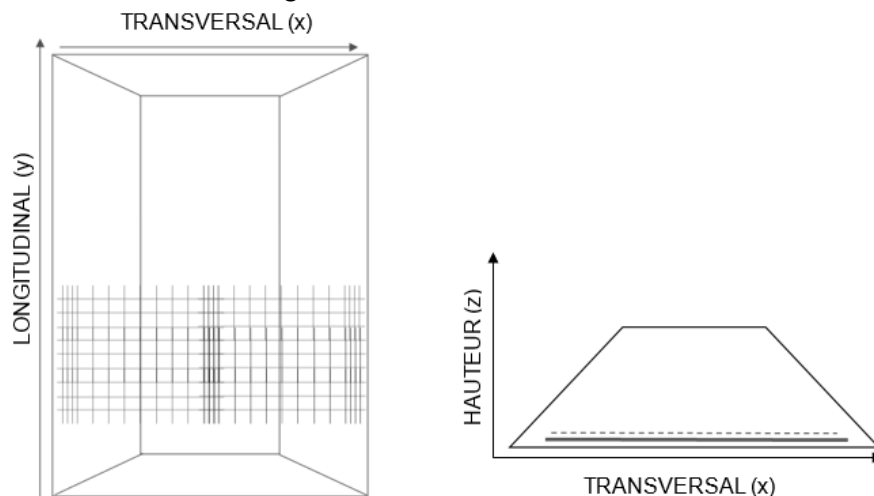


Figure 6: Vue de haut et vue en coupe d'un remblai renforcé en pied par treillis soudé

4. Dimensionnement des treillis soudés

Les contraintes de cisaillement horizontales développées à la base du remblai sont transférées à l'armature. Pour dimensionner le treillis, trois vérifications doivent être réalisées :

- la résistance de l'armature aux efforts de traction,
- la résistance du frottement sol/armature,
- la résistance des recouvrements.

Pour ces vérifications, un certain nombre de paramètres sont dépendants de données intrinsèques au remblai. Il est donc important de discuter et définir ces paramètres avant toutes tentatives de dimensionnement :

- Géométrie du remblai
- Composition des matériaux du remblai (c', ϕ', γ , granulométrie)
- Surcharge d'exploitation.

Résistance de l'armature en traction $R_{t,d}$

Il faut vérifier que les efforts horizontaux en pied de remblais soient repris en traction pure par le treillis soudé. Cela se traduit par :

$$F_H < R_{t,d} \quad (1)$$

F_H correspond à la force horizontale au niveau du treillis soudé. On estime F_H , en première approche, de manière analytique [Cf. équation (2)], puis par modélisation aux éléments finis par la suite.

$$F_H = K_a \cdot H_a (\gamma_G \cdot \gamma \cdot \frac{H_a}{2} + \gamma_Q \cdot q) \quad (2)$$

Avec

K_a : coefficient de poussée

H_a : distance entre le treillis soudé et le haut du remblai.

γ : poids volumique des remblais

γ_G et γ_Q : facteurs partiels de sécurité

q : surcharge d'exploitation

En réaction à cette force F_H , les aciers longitudinaux du treillis vont se mettre en traction. D'après la norme NF P 94-270 (2009ⁱ), la résistance ultime de traction de l'acier $R_{t,d}$ s'écrit :

$$R_{t,d} = \min \left(\rho_{deg} \cdot \frac{S_0 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} ; \rho_{deg} \cdot \frac{S_0 \cdot f_r}{\gamma_{M2}} \right) \quad (3)$$

Avec

f_y : limite élastique de l'acier

f_r : résistance à la rupture de l'acier

S_0 : section d'acier des barres longitudinales par tranche de 1 m de remblai

γ_{M0} et γ_{M2} : facteurs partiels de sécurité

ρ_{deg} : coefficient de dégradation pour prendre en compte la corrosion des barres

Ce coefficient dépend :

- De la durée de vie de l'ouvrage
- Du milieu dans lequel il se trouve : hors d'eau ou non / agressif ou non

- De la composition du remblais (granulométrie des matériaux)
- De la géométrie des treillis.

Après le calcul de ces efforts et résistances, nous avons trouvé :

$$F_H < 2 \cdot R_{t;d} \quad (4)$$

Nous en avons donc déduit que 2 nappes de treillis étaient nécessaires pour reprendre ces efforts. Dans notre cas, les barres longitudinales du treillis, en acier galvanisé, ont un diamètre de 14 mm pour reprendre les efforts de traction. À noter, la dernière version de la NF P94-270 (2020), précise en annexe F qu'il est nécessaire de prendre en compte une perte d'épaisseur au niveau de la galvanisation.

Résistance sol/armature $R_{f;d}$

Le remblai, en plus des efforts horizontaux vient appliquer son poids au niveau des armatures. Cela induit un frottement des grains le long du treillis qui va venir mobiliser du cisaillement aux points de contact.

D'après la norme NF P 94-270, la résistance ultime d'interaction d'un treillis soudé s'écrit :

$$R_{f;d} = \frac{\tau_{max} \cdot P_S \cdot L_S}{\gamma_{M;f}} \quad (5)$$

Avec

$P_S \cdot L_S$: surface d'adhérence sur une tranche d'un mètre de remblais

$\gamma_{M;f}$: facteur partiel de sécurité

τ_{max} : cisaillement mobilisable maximal sur la surface de contact entre le terrain et les aciers longitudinaux et transversaux, tel que :

$$\tau_{max} = \frac{\mu_{(z)}^*}{L_S} \cdot \int_0^{L_S} \sigma_{v(z,x)} dx \quad (6)$$

$\sigma_{v(z,x)}$: valeur de la contrainte verticale totale à la distance x du parement sur le treillis considéré. La contrainte étant fonction de la hauteur de terre, elle sera variable le long du talus puis constante à H_{max} .

$\mu_{(z)}^*$: coefficient apparent d'interaction sol-renforcement au niveau considéré

Ce coefficient dépend :

- Du milieu dans lequel il se trouve : hors d'eau ou non
- Du type de matériaux utilisé pour le matelas de répartition (granulométrie)
- Du diamètre et de l'espacement des barres transversales
- De la hauteur de sol au-dessus du treillis.

Dans notre cas, le matelas est composé de matériau drainant avec $D_{50} > 8\text{mm}$ et % pondéral inférieur à 80 $\mu\text{m} < 5\%$. Chaque panneau de treillis, de 2.5 x 12m, est constitué de 18 barres longitudinales de diamètre 14 mm et de 50 barres transversales de diamètre 8mm.

Résistance des recouvrements

Le dernier point à vérifier se situe au niveau des recouvrements. Sur le chantier, les treillis faisant la largeur d'un remblai représenteraient une difficulté technique importante (réalisation, transport, mise en place) et ne sont pas réalisables. La géométrie du treillis doit donc être adaptée à la mise en place sur site (Figure 7 : Treillis soudés en cours de positionnement à Ferrières-en-Bray).



Figure 7: Treillis soudés en cours de positionnement à Ferrières-en-Bray

Aussi, il est important de prévoir une longueur de recouvrement suffisamment importante pour assurer une continuité dans la transmission des efforts. Dans notre cas les aciers transversaux ont été rapprochés afin d'augmenter la densité d'acier et d'assurer une transmission des efforts par frottements suffisante dans les treillis adjacents.

La justification de la longueur de recouvrement a été menée en calculant la résistance d'interaction $R_{f,d}$ [Cf. équation (5)] sur la longueur des recouvrements choisie.

Finalement, la longueur des recouvrements est de 1.8m, avec des barres transversales resserrées (espacement de 12cm au lieu de 40cm).

Synthèse des vérifications

La Figure 8 ci-dessous représente :

- Une coupe transversale du remblai à sa plus grande hauteur (10.3 m)
- Les efforts repris par le treillis inférieur (extraits de PLAXIS),
- Les efforts maximaux que peut reprendre le treillis.

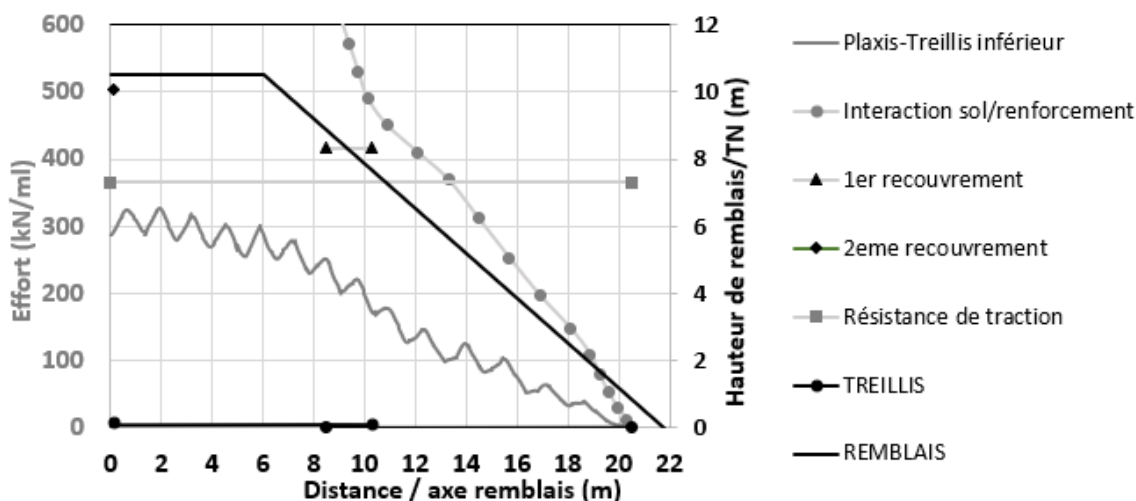


Figure 8: Vérification des efforts dans les treillis – nappe inférieure

Ce graphe permet de confirmer rapidement le dimensionnement des treillis en observant les efforts de traction, déterminés par modélisation aux éléments finis, à l'intérieur de la zone admissible (délimitée par les différentes résistances).

5. Conclusions

Pour conclure, le renforcement par treillis soudés a plusieurs avantages. Premièrement, cela limite le développement des efforts de traction à la base du remblai induisant ainsi un confinement latéral. Deuxièmement, les contraintes de cisaillement qui seraient autrement transmises directement au sol compressible sont interceptées par l'armature. Dans le cas d'un renforcement de sol par inclusions rigides, cela permet de s'affranchir des armatures parfois utilisées pour assurer l'intégrité des inclusions face à des efforts de cisaillement trop importants.

Cet exemple confirme qu'il est possible et efficace de mettre en place des treillis soudés au sein du matelas dans un contexte de sols compressibles. Deux ans après la fin des travaux, l'ouvrage montre un comportement conforme aux attentes. Un suivi à plus long terme des remblais, et un retour sur d'autres chantiers également, seraient intéressants pour obtenir plus de recul et améliorer notre savoir-faire français sur cette technique.

6. Références bibliographiques

- ASIRI (2012). Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales, Presse des Ponts – IREX Paris
- AFNOR (2009)ⁱ. NF P94-270 – Calculs géotechnique – Ouvrages de soutènement – Remblais renforcés et massifs en sol cloué

ⁱ Il existe une version plus récente (2020), mais le chantier a été réalisé en 2019, donc selon la version de 2009.