

DIMENSIONNEMENT D'INCLUSIONS RIGIDES SOUMISES A DES POUSSEES LATERALES

IMPACT OF HORIZONTAL STRAIN ON RIGIDS INCLUSIONS

Elodie MEYER¹, Viet-Nam TRINH¹, Hugo RAVEL¹

¹ SYSTRA, Paris, France

RÉSUMÉ – La modélisation des efforts horizontaux sur les inclusions rigides a été réalisée à l'aide d'une méthode classique réglementaire et d'un modèle Plaxis 2D. La comparaison des deux méthodes a permis de mettre en évidence l'importance de la modélisation de la déformée du sol pour évaluer l'impact sur les structures de fondation.

ABSTRACT – The impact of the horizontal deformation of soil on the rigids inclusions is studied using a classical analytic method and a Plaxis 2D model. The comparison between the methods reveals the major role of the soil deformation modelling to evaluate the deformation of the foundations structures.

1. Présentation du projet

Dans le cadre de la construction de la LGV Maroc, il a été mis en évidence la présence de sols compressibles sur des épaisseurs localement importantes, notamment dans les zones environnantes d'oueds. Le présent article traite plus particulièrement d'un ouvrage hydraulique de décharge situé dans l'environnement de l'oued Drader.

Au droit de cet ouvrage, il était initialement prévu la mise en œuvre de remblais de préchargement permettant de consolider l'horizon de sols compressibles et de s'affranchir des tassements futurs. En effet, les critères de tassement au droit des ouvrages d'art prévoient un tassement à court terme inférieur à 2cm sous l'ouvrage hydraulique et un tassement à long terme sous ses blocs techniques inférieur à 1cm/an.

Une des particularités de cet ouvrage est qu'il se situe à la limite entre deux zones qui font l'objet de préchargements différents. Côté nord, il est prévu la mise en œuvre de 9m de remblais de préchargement, composés de 7,5m pour atteindre la cote projet et 1,5m pour représenter la surcharge ferroviaire future de 30kPa. Ces remblais sont mis en œuvre en une seule phase et le temps de consolidation prévisionnel est de 12 mois. Côté sud, il est prévu un préchargement en 3 phases : 5m, 9m puis 12m. La durée cumulée de consolidation pour ces 3 phases est de l'ordre de 18 mois.

Des difficultés d'approvisionnement en matériaux retardent la mise en œuvre des remblais de préchargement ce qui a pour impact le décalage des dates de fin prévisionnelle de consolidation. Au départ de l'étude, on relevait ainsi, côté nord une hauteur de remblais de 2m contre les 9m prévus initialement à la même date et, côté sud, une hauteur de 8m contre les 9m prévus. Ces retards impactent également la construction des ouvrages d'art.

La nécessité de limiter le retard global du chantier conduit à rechercher une solution technique permettant de s'affranchir de ces temps de consolidation au droit de l'ouvrage hydraulique et de ses abords. La solution proposée est une solution de renforcement de sol à l'aide d'inclusions rigides.

La figure 1 présente l'ouvrage, les remblais de préchargement prévus ainsi que la zone à renforcer. La zone globale à renforcer s'étend donc sur une longueur de 73m pour une largeur de 46m, soit une surface de plus de 3300m².



Figure 1 : Coupe schématique de l'ouvrage à renforcer

2. Contexte géotechnique de l'ouvrage

Il existe, au droit du futur ouvrage, un sondage pressiométrique à 15m de profondeur, soit relativement court et insuffisant pour le dimensionnement de ces inclusions rigides.

Les sondages réalisés à proximité du futur ouvrage sur l'oued Drader et présentant une profondeur plus importante (30m environ) sont intégrés à l'étude afin d'obtenir plus de données sur les horizons pressentis pour l'ancrage des inclusions.

Le modèle géotechnique défini à partir de ces sondages est présenté dans le tableau 1.

Tableau 1 : modèle géotechnique

Couche	Z _{base} /tête sondage (m)	Cote (m NGM)	γ_h (kN/m ³)	γ_v (kN/m ³)	E_M (MPa)	p_i^* (MPa)	α	E_{Young} (MPa)	qs (kPa)	Effort de pointe	Ktan δ pieu foré
Sable vasard	-8.0	-4.4	17	8.1	2.2	0.28	1/2	4.4	0		0.15
Sable limoneux à marneux	-13.8	-10.2	20	10.2	14.0	1.18	1/2	28.1	65	ple* = 1.2 kp = 1.1	0.45
Sable grésifié	-15.5	-11.9	21	11.2	52.5	3.05	1/2	105.0	80	ple* = 2 kp = 1.1	1
Sable marneux	-20	-16.4	21	11.2	18.0	1.59	1/2	35.9	75	ple* = 1.6 kp = 1.1	1

Les valeurs de qs présentées dans le tableau ci-dessus sont obtenues en considérant des inclusions forées simples et déterminées à partir du fascicule 62 titre V, code de calcul référent pour le projet de la LGV Maroc.

L'analyse géotechnique confirme ainsi l'existence d'un horizon compressible, sur une hauteur d'environ 8m à partir du terrain naturel. Elle met également en évidence l'existence d'un horizon plus résistant à partir de 14m de profondeur environ et qui pourra servir d'ancrage aux inclusions rigides.

3. Présentation du renforcement et impact du phasage travaux

Le renforcement de sol prévu est un maillage d'inclusions rigides ancrées dans l'horizon de sable grésifié.

Les caractéristiques géométriques du renforcement sont les suivantes :

- Longueur : 11.5m à partir de la cote 0.65m avec un ancrage de 60cm dans l'horizon de sable grésifié

- Diamètre : 0.4m
- Maillage : 1.3m x1.3m
- Module à long terme : 10043MPa

Compte tenu de la problématique de retards rencontrée sur ce projet, l'exécution des inclusions s'intègre dans un phasage travaux complexe, permettant d'optimiser les délais. Il est ainsi prévu de réaliser les inclusions au plus vite, puis de poursuivre la mise en œuvre des remblais de préchargement en parallèle de la construction de l'ouvrage.

Un tel phasage des travaux entraîne obligatoirement la génération d'efforts transversaux importants sur les inclusions. En effet, le tassement de l'horizon compressible sous la charge de remblai génère un déplacement horizontal du sol vers la zone non chargée. Ce déplacement du sol génère des efforts horizontaux sur le système de renforcement. Ces efforts sont à considérer dans les calculs lors du dimensionnement des inclusions rigides.

4. Contraintes particulières de dimensionnement

Les contraintes particulières de ce dimensionnement résident dans les critères de tassement à respecter et dans la prise en compte des efforts latéraux générés par le tassement du sol compressible sous le poids du remblai de préchargement.

4.1. Critères de tassements

Les critères de tassement sont de 2cm maximum de tassement total sous l'ouvrage et ses abords et de 1cm/an maximum de tassement de fluage sous bloc technique.

Le maillage d'inclusions défini permet de répondre à ces critères de tassement. Cependant, les inclusions définies doivent également permettre la reprise des efforts horizontaux.

4.2. Reprise du déplacement horizontal du sol

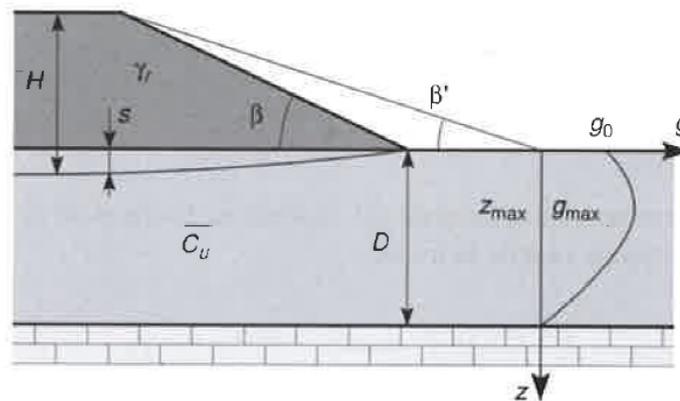


Figure 2 : Extrait du fascicule 62 titre V – annexe G.3 – paragraphe 4

Le déplacement horizontal du sol se produit dans le cas du chargement dissymétrique, en pied de talus de remblai par exemple, d'un horizon compressible (figure 2).

On constate alors qu'il existe un déplacement horizontal de l'horizon compressible qui se produit de la zone chargée vers la zone non chargée. La valeur de ce déplacement horizontal est directement liée à la valeur du tassement du sol compressible sous la charge de remblai. Ce déplacement horizontal engendre des efforts de flexion importants sur un élément de fondation profonde fiché à proximité du pied de talus du remblai et traversant

l'horizon compressible pour s'ancrer dans un horizon plus résistant. Les inclusions n'étant pas dimensionnées pour reprendre les moments de flexion, la solution est alors de mettre en place une cage d'armatures afin de reprendre les efforts de flexion.

La réponse préconisée par les règlements est de retarder la mise en œuvre des éléments de fondation ou de renforcement après la mise en œuvre des remblais à proximité. Cependant, le phasage travaux de l'entreprise ne permet pas toujours de mettre en application cette préconisation, comme c'est le cas dans ce renforcement de sol au Maroc. Il revient alors au dimensionnement de prendre en compte ces contraintes d'exécution.

5. Prise en compte du déplacement horizontal du sol

La méthode retenue pour la prise en compte des efforts horizontaux est celle intitulée détermination de $g(z)$ dans la couche compressible dans les règlements. Le $g(z)$ est le déplacement horizontal libre du sol, en l'absence de tout élément structural. La formule utilisée ici est celle présentée dans le fascicule 62 titre V, référent sur ce projet.

$$g(z, t) = G(Z) \cdot g_{max}(t) \quad (1)$$

Elle se compose d'un terme polynomial fonction de la profondeur :

$$G(Z) = 1,83 \cdot Z^3 - 4,69 \cdot Z^2 + 2,13 \cdot Z + 0,73 \quad (2)$$

Et d'un terme représentant la valeur maximale du déplacement horizontal du sol compressible dans les conditions du projet.

$$g_{max}(t) = g_{max}(0) + \Delta g_{max}(t) \quad (3)$$

Cette valeur maximale est elle-même composée d'un terme dépendant de la cohésion non drainée du sol compressible et de son épaisseur, du niveau de charge de remblai ainsi que de l'angle d'inclinaison du talus du remblai, et d'un terme relié aux tassements calculés à l'axe du remblai en section courante, dépendant du temps.

5.1. Calcul de $g_{max}(0)$

Le terme $g_{max}(0)$ se calcule, entre autres, en fonction de la cohésion non drainée C_u . En l'absence d'essai adapté au droit du futur ouvrage, la valeur de C_u est basée sur la corrélation de Ménard (Cassan, 2005) : $C_u = p_l^*/5,5 = 65$ kPa.

Le calcul mené pour un élément de fondation situé à proximité directe du pied de remblai, mène à une valeur de $g_{max}(0)$ égale à 3cm.

5.2. Calcul de $\Delta g_{max}(t)$

Il s'agit du terme dépendant du temps, calculé en fonction du différentiel entre le tassement à la fin de la construction du remblai et le tassement à l'instant t . Dans le cas d'une fondation réalisée avant le remblai, le déplacement considéré est celui entre l'état initial (fin de la construction du remblai) et l'état à l'infini. Le tassement final est évalué en considérant le tassement de consolidation et le tassement de fluage. Le tassement de consolidation de l'horizon compressible sous le poids du remblai, en section courante, est évalué par la méthode de l'élasticité unidimensionnelle de Boussinesq avec un remblai de 7m.

Le tassement de consolidation déterminé est alors égal à 21cm. Le tassement de fluage calculé en fonction du temps de consolidation est inférieur au cm. On obtient ainsi un tassement total à t infini de 22cm.

Pour évaluer le tassement initial, la méthode retenue est d'évaluer le pourcentage de consolidation à l'issue de la montée du remblai, afin de déterminer le tassement de consolidation déjà consommé. L'analyse du temps de consolidation se fait à partir des abaques et formules de Carillo-Barron (Bru, 1981), en tenant compte des drains mis en place précédemment dans la zone.

Caractéristiques des drains :

- Largeur : 10 cm
- Epaisseur : 5 cm
- Maillage : 2,5m x 2,5m

Coefficients de consolidation :

- $C_v = 3,4 \cdot 10^8 \text{ m}^2/\text{s}$
- $C_r = 3,4 \cdot 10^7 \text{ m}^2/\text{s}$ (consolidation radiale)

En supposant une durée remblaiement de 1 mois, l'analyse du temps de consolidation indique une consolidation de 30%, ce qui correspond à un tassement de 6.6cm. La valeur de Δg_{max} (infini) ainsi déterminée est de 2cm, ce qui amène à $g_{\text{max}}(\text{infini}) = 5\text{cm}$.

5.3. Application de la déformation aux inclusions

Cette déformée horizontale est appliquée aux inclusions par le biais de la formule citée précédemment et à l'aide du module Piecoef+ du logiciel Foxta de Terrasol. La modélisation est réalisée sur un élément isolé (sans prendre en compte le réseau d'inclusions rigides). La figure 3 présente les courbes de déformation et d'efforts sur l'inclusion calculée.

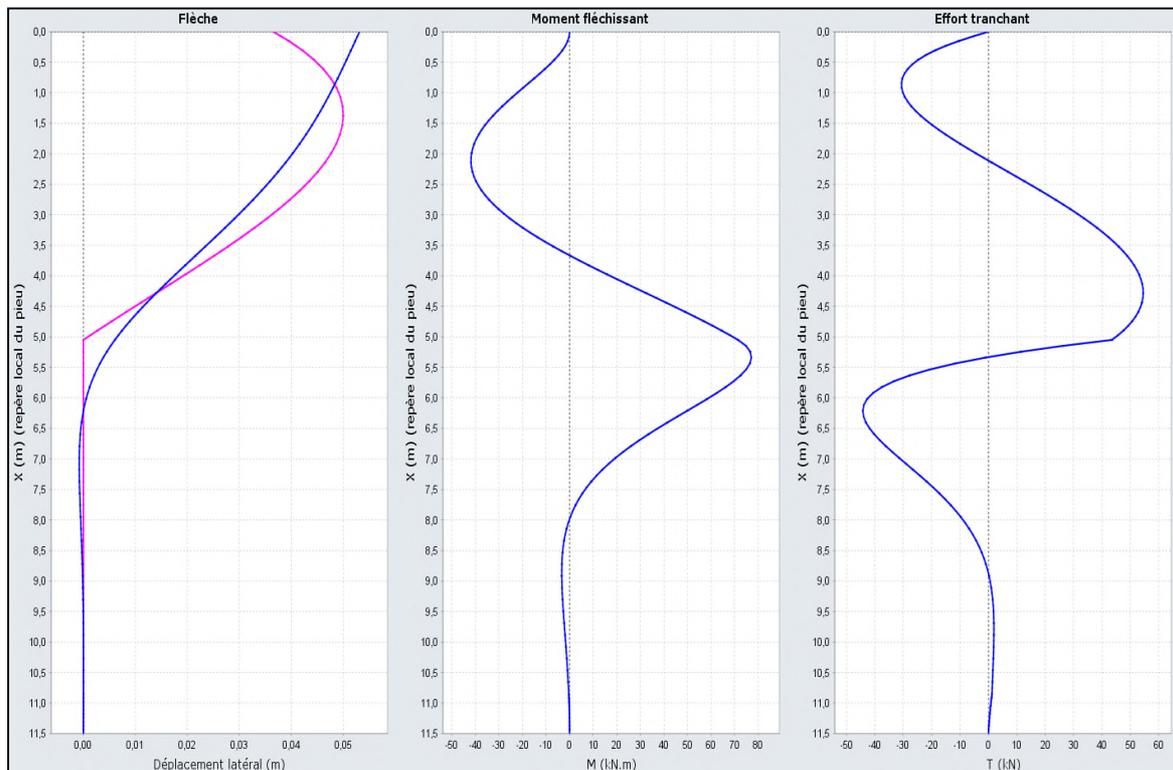


Figure 3 : courbes de déformation et d'efforts

Le tableau 2 présente les efforts résultant de l'action du sol sur les inclusions.

Tableau 2 : Efforts sur les inclusions

Moment (kN.m)		Effort tranchant (kN)	
min	max	min	max
-42	77	-44	55

Les efforts obtenus sont incompatibles avec une section de béton non armé. Le ferrailage des inclusions est donc nécessaire. Les valeurs du tableau ci-dessus sont utilisées pour déterminer le ferrailage à mettre en place dans les inclusions. Il s'agit de valeurs importantes au regard du diamètre des inclusions ce qui implique un taux de ferrailage supérieur à 2% (taux maximal souhaité par l'entreprise).

6. Proposition d'une solution alternative

Afin de répondre à l'ensemble des critères de dimensionnement, une nouvelle géométrie des inclusions a été envisagée afin de réduire les efforts auxquelles elles sont soumises. Si la logique aurait voulu que le phasage des travaux soit revu, ce n'était pas possible ici.

La méthode alors proposée consiste à réduire progressivement la longueur des inclusions à mesure qu'on s'éloigne de l'ouvrage et de ses critères de tassement. En effet, l'importance des efforts résulte notamment de l'encastrement des inclusions sur une hauteur conséquente dans un sol plus raide que l'horizon compressible.

Le calcul est de nouveau mené sous le module Piecoef+ du logiciel Foxta de Terrasol. La démarche est de partir du ferrailage maximal défini par l'entreprise pour définir les efforts maximaux applicables à l'inclusion (moment ELS dimensionnant) et de rechercher la longueur d'inclusion correspondante. La figure 4 présente la courbe de déformation et les courbes d'effort correspondant à une inclusion réduite.

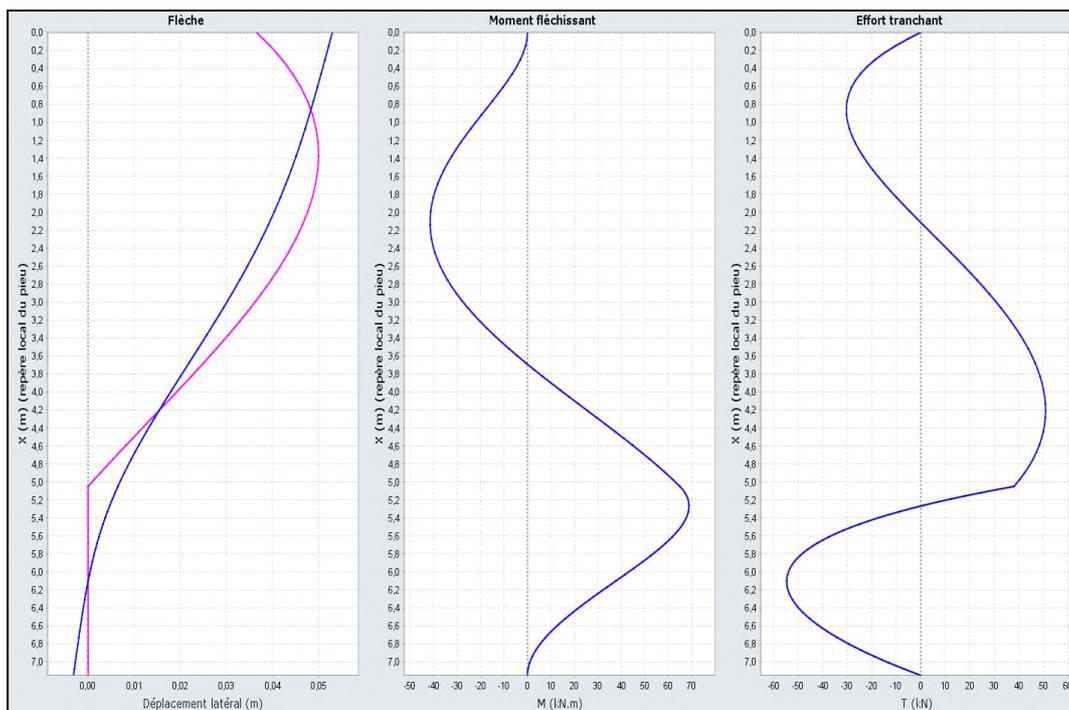


Figure 4 : courbes de déformation et d'efforts

Il est nécessaire de réduire l'inclusion à une longueur de 6,5m pour obtenir les valeurs souhaitées d'efforts, pour la zone en pied de remblai. Le même calcul est mené sur plusieurs coupes entre le pied de remblai et l'ouvrage permettant ainsi de définir les différentes longueurs d'inclusions sur la zone où elles sont armées.

Lorsque la distance est suffisante, l'influence du remblai devient minime et il n'est plus nécessaire d'armer les inclusions. Elles conservent donc alors la longueur initiale déterminée.

La dernière vérification concerne le tassement au droit des inclusions réduites. En effet, elles doivent permettre de réduire les valeurs de tassement, comme expliqué précédemment. Les valeurs alors déterminées restent faibles par rapport aux tassements sans renforcement mais elles impliquent des valeurs résiduelles après montée des remblais de l'ordre de quelques centimètres ce qui est incompatible avec le phasage travaux souhaité (mise en œuvre de la structure de voie dès finalisation des remblais).

7. Modélisation bidimensionnelle

La solution alternative proposée ne permet toujours pas de répondre parfaitement aux contraintes du phasage travaux.

Il est donc décidé de retravailler sur la modélisation du déplacement horizontal. En effet, il est clairement identifié que la méthode de calcul retenue ne tient pas compte de la présence d'un réseau d'inclusions rigides dans le sol, qui, en toute rigueur, vient modifier la répartition et l'amplitude des déplacements du sol.

Un modèle Plaxis 2D « embedded pile » est donc réalisé afin de modéliser plus précisément le phasage des travaux et son impact sur le déplacement horizontal de l'horizon compressible ainsi que l'influence du renforcement sur ce même déplacement (figure 5).

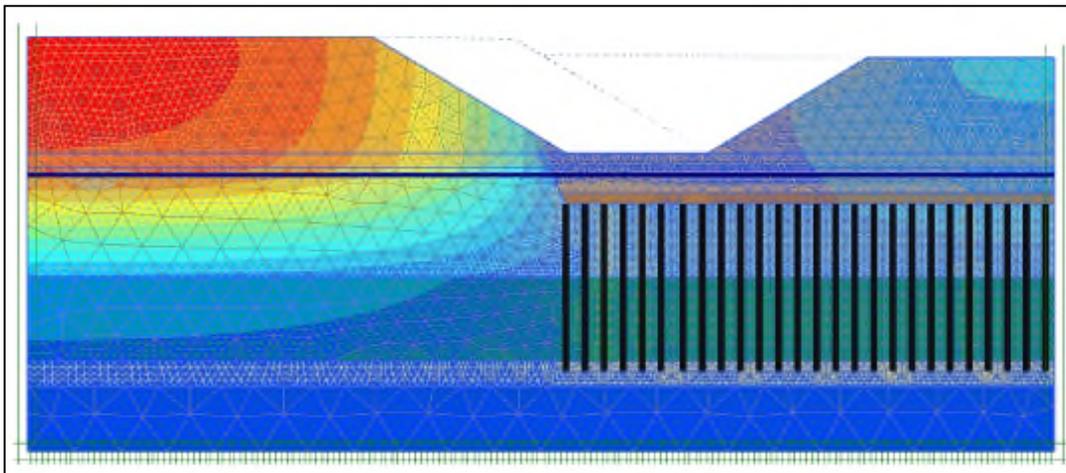


Figure 5 : extrait du modèle Plaxis 2D : phase intermédiaire de terrassement

Le modèle Plaxis est calé à l'aide d'une comparaison des valeurs de tassements entre les deux logiciels. Le tassement maximal calculé sous Plaxis est de l'ordre de 22cm hors zone renforcée par les inclusions rigides et de 3cm dans la zone renforcée. Ces valeurs sont relativement similaires à celles déterminées à l'aide du logiciel Foxta.

Dans la zone renforcée par les inclusions rigides, la modélisation permet de constater que le tassement est rapide et qu'il se produit en grande partie pendant la phase de travaux. La consolidation semble donc accélérée par la présence du réseau d'inclusions.

Le modèle Plaxis permet de constater que pour des tassements du même ordre de grandeur, la valeur maximale du déplacement horizontal est plus faible (environ 3cm contre les 5cm calculés précédemment) et plus rapidement dissipé lorsqu'on se déplace vers l'ouvrage. La différence de valeur de déplacement provient de la prise en compte de la hauteur de remblai déjà mis en place et de la présence du réseau de renforcement.

Cependant, l'intérêt majeur de cette modélisation est la mise en évidence d'une déformée de sol très différente de la déformée calculée par la formule du fascicule 62. En effet, dans le fascicule, la déformée ne s'applique que sur la hauteur de sol compressible comme si l'horizon sous-jacent ne subissait aucune déformation. L'inclusion semble alors parfaitement encastrée dans cet horizon ce qui génère des efforts importants, notamment à l'interface entre les deux horizons (moment maximal).

Or, même s'il s'agit d'un sol qui présente de meilleures caractéristiques que le sol compressible, le sol d'ancrage présente quand même un potentiel de déformation et c'est ce que met en évidence le modèle Plaxis.

L'interface entre les deux horizons s'atténue au regard du faible écart entre leurs modules de déformation. Cette déformée est extraite et réinjectée dans le modèle Foxta afin de réaliser une comparaison des efforts. La figure 6 montre les différentes courbes correspondantes (déformées du sol et du pieu, moment de flexion et effort tranchant).

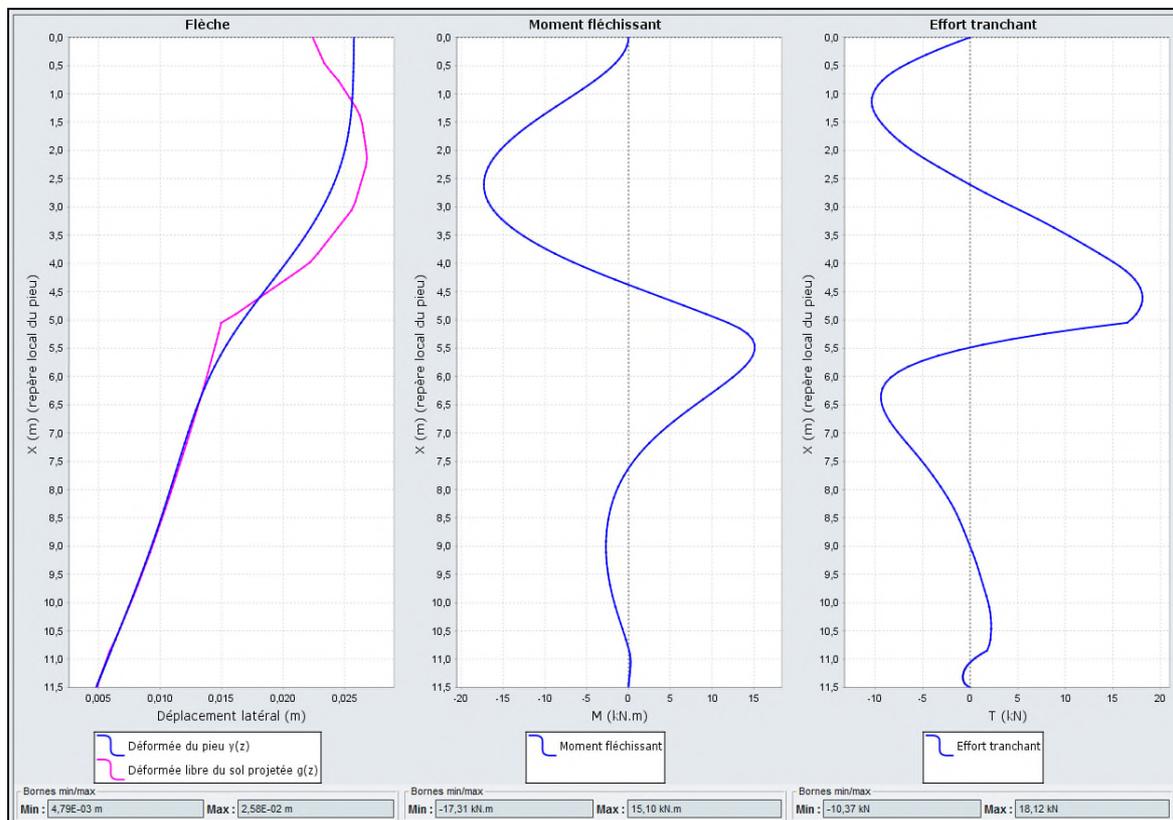


Figure 6 : déformée et efforts issus du modèle Plaxis

Le tableau 3 présente les efforts en considérant la déformée issue de la modélisation Plaxis. Les valeurs sont très inférieures à celles constatées lors des modélisations précédentes.

Tableau 3 : Efforts sur les inclusions

Moment (kN.m)		Effort tranchant (kN)	
min	max	min	max
-17	15	-10	18

8. Conclusion

L'influence de la mise en œuvre d'un chargement asymétrique sur un horizon compressible se traduit par un déplacement horizontal de la couche compressible vers la zone non chargée. Ce déplacement de sol génère sur un élément de fondation situé en pied de remblai des efforts de type moment de flexion et effort tranchant.

La méthodologie d'évaluation du déplacement libre du sol présentée dans les règlements de calcul actuels ne prend pas en compte l'existence d'un renforcement de sol.

La modélisation unidimensionnelle prévoit donc des efforts très importants et parfois à la limite des critères de dimensionnement fixés par l'entreprise.

Dans ces conditions, la modélisation bidimensionnelle peut apporter des éléments complémentaires permettant d'évaluer de manière plus précise et plus fiable les efforts attendus car elle prend en compte le modèle dans son ensemble.

La modélisation unidimensionnelle a pour avantage d'être simple et rapide mais si on sort des critères à respecter, il faut envisager une modélisation plus globale du projet qui permet d'analyser le déplacement du sol tout en tenant compte du phasage réel des travaux et de la présence du renforcement.

9. Références bibliographiques

- Cassan M. (2005). Le pressiomètre et la résistance au cisaillement des sols cas particulier des argiles saturées.
- Bru J.P. (1981). Abaques pour le dimensionnement des drains verticaux et les calculs de consolidation unidimensionnelle. *Bull. Liaison Labo P. et Ch. nov-déc. 1981 – Inf. 2641*.
- Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides. Projet national ASIRI. Presse des ponts, 2012.
- Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil. Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux. Fascicule n°62 – Titre V. Ministère de l'équipement, du logement et des transports.