

LES MATÉRIAUX DE REMBLAI DES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT EN SOL RENFORCÉ PAR GÉOTEXTILES ALVÉOLAIRES

FILL SOILS IN RETAINING STRUCTURES REINFORCED WITH GEOCELLS

Maxime SOUDÉ¹, Jean-Christophe PELLEZ¹, Mathilde RIOT²

¹ SOL SOLUTION – 63204 Riom, France

² AFITEX – 28300 Champhol, France

RÉSUMÉ – Qu'ils soient d'origine naturelle ou issus d'un travail d'élaboration, les matériaux de remblai utilisés en association avec des géosynthétiques de renforcement sont très nombreux. Dans le cas particulier des ouvrages de soutènement, le choix de ces matériaux suppose une compatibilité avec le géosynthétique employé et repose, le plus souvent, sur leurs caractéristiques mécaniques (poids volumique, frottement interne et cohésion) ainsi que sur leur aptitude à être compactés selon certains objectifs de densification (guide GTR). Ces données fondamentales pour la conception des ouvrages sont issues de missions géotechniques normalisées (NF P 94-500). Obtenus par mesure directe ou par mesures corrélées, les valeurs des paramètres sont déterminées et contrôlées du début jusqu'à la fin de l'élévation de l'ouvrage. L'article illustre ces différents points au travers de retours d'expérience d'ouvrages en sol renforcé par géotextiles alvéolaires, en conception et en exécution.

Mots clés : Géotextile alvéolaire, matériau de remblai, caractérisation géotechnique.

ABSTRACT – There are lots of natural and elaborated soils which can be used with reinforcement geosynthetics. For specific sustainment wall case, choosing an adapted soil depends on its compatibility with the geosynthetics used and most often on their mechanical properties (Volumetric weight, internal friction angle and cohesive strength) and its compacting ability according to GTR manual recommendations. All parameters come from Standardized Geotechnical Missions (NF P 94-500). Deduced from direct measures or correlations, values of parameters are designed and controlled from the start to the end of works. The paper also underlines all that points with several examples of soil structure reinforced with geocells.

Keywords: geocell structure, fill soil, geotechnical characterization

1. Introduction

Le renforcement de sol par géotextiles permet d'accroître les performances mécaniques d'un sol (résistance au cisaillement principalement) en l'associant à des inclusions souples que sont les géotextiles. Les massifs qui découlent de cette technique relèvent de la catégorie des ouvrages en terre. Leur justification géométrique et l'étude de leur comportement mécanique relève du domaine de l'ingénierie géotechnique.

Les métiers du géosynthétique permettant aujourd'hui un très bon contrôle de la qualité et des caractéristiques mécaniques des produits, le concepteur ou le réalisateur d'un ouvrage trouve aisément le matériau de renfort respectant un cahier des charges. La démarche n'est toutefois pas aussi aisée pour le matériau de remblai. Le sol est en effet un matériau discontinu, présentant des variabilités de forme, de nature et de comportement mécanique (selon sa mise en œuvre), tout en pouvant différer des prescriptions des marchés en phase exécution, selon les ressources disponibles de l'entreprise et les optimisations financières et techniques qu'elle parvient à réaliser. Le sol est un constituant aussi important que les géosynthétiques dans un complexe « sol-renforcé ». Par conséquent, les difficultés de contrôle et de caractérisation mécanique ont une incidence très forte sur la justification de stabilité des ouvrages.

En effet, de la conception (NF P 94-270) à l'exécution des travaux (NF EN 14-475), la prise en compte de l'influence du matériau sol au contact avec les géotextiles est omniprésente. Elle se fait au travers de l'étude des mécanismes définissant la propagation des efforts au sein d'un sol et la manière dont il y résiste. La modélisation de ces mécanismes, telle que présentée dans les normes de calcul, repose sur des modèles rhéologiques simples pour chaque matériau et fait intervenir des paramètres mécaniques couramment rencontrés que sont le poids volumique γ , l'angle de frottement interne φ et la cohésion c .

Après plus de 20 ans d'étude d'ouvrages en sol renforcé, nous nous heurtons encore fréquemment aux difficultés de connaissance et de maîtrise de ces paramètres, même lorsque le projet en est à un stade d'exécution. En d'autres termes, il subsiste toujours des manques importants quant aux données d'entrée permettant la justification de ces solutions, et de fait leur validation, alors qu'elles sont de plus en plus prescrites dans les marchés pour les avantages techniques et environnementaux qu'elles présentent.

Rappelons que la norme des missions géotechniques (NF P 94-500) définit l'enchaînement des missions à réaliser, et surtout les points géotechniques sur lesquels elles doivent statuer à chaque étape d'avancement d'un projet. Bien que la caractérisation des sols impliqués dans des travaux fasse partie des points géotechniques indispensables à la justification de la stabilité des ouvrages, la qualité de cette caractérisation (proposition d'hypothèses de valeurs de paramètres mécaniques des matériaux) est très disparate, en plus d'être souvent peu justifiée.

Si, en théorie, le géotechnicien dispose de nombre d'informations et d'éléments lui permettant d'accomplir ce travail, la pratique se confronte souvent à des réalités de modifications de projet, d'hétérogénéité importante des matériaux ou des contraintes purement économiques aboutissant à des caractérisations des matériaux sommaires, voire très discutables, quand elles ne sont pas carrément inadéquates à l'ouvrage que l'on envisage de réaliser.

La mise en service d'un projet d'infrastructure impliquant des ouvrages en sol renforcé s'étend sur des durées projetées entre 75 et 100 ans, c'est-à-dire de nombreuses décennies où l'ouvrage sera potentiellement soumis à des chargements exceptionnels ou à des épisodes météorologiques inattendus qui viendront éprouver sa conception dans ses configurations les plus critiques. La responsabilité du concepteur est non seulement engagée mais également celle de l'exploitant ou de son représentant technique assurant la validation des données d'entrée, sans oublier celle des entreprises en charge de l'exécution des travaux et du respect des règles de l'art.

Les remarques et commentaires qui suivent s'appuient sur notre expérience d'étude, de contrôle et de suivi d'exécution d'ouvrages en sol renforcé. Bien que les exemples donnés portent sur notre emploi de géotextiles alvéolaires, les points géotechniques soulevés, notamment la question des sols rencontrés qui fait l'objet de cet article, sont tout à fait transposables à n'importe quelle autre technique de renforcement de sol par géosynthétiques.

2. Les matériaux sol dans un ouvrage en sol renforcé

Lorsque l'on cherche à justifier la stabilité d'un ouvrage en sol renforcé, la normalisation en vigueur distingue les matériaux en trois zones d'influence :

- le sol qui constitue l'ouvrage et dont le rôle est d'assurer, en association avec les géotextiles, une certaine solidité mécanique interne ;
- le sol de remblai à l'arrière de l'ouvrage ou en tête d'ouvrage, qui par son poids propre exerce des efforts sur l'ouvrage, dont les efforts dits de poussées (terres, surcharges, hydrauliques, sismiques...);
- l'assise de l'ouvrage, aussi appelée « sol de fondation », dont le rôle est de résister aux sollicitations mécaniques appliquées à l'ouvrage.

Chacune de ces zones est le siège de potentielles instabilités pouvant occasionner une défaillance de l'ouvrage, soit par rupture du massif de sol réalisé, soit par déformations excessives provoquant des désordres sur des structures à proximité (autres remblais, voiries, réseaux, équipements...). De manière générale, le dimensionnement de l'ouvrage consiste donc à étudier différents équilibres mécaniques associés à ces instabilités entre les actions dites défavorables induites par les poids propres ainsi que les surcharges d'exploitation, et les actions dites favorables générés par les sols ainsi que les géotextiles utilisés.

Si les actions défavorables sont le plus souvent déduites de descentes de charges communiquées par d'autres bureaux d'étude (Infrastructure, construction...) et exprimées à l'aide d'une intensité et d'une unité en kN ou en kPa, les actions favorables impliquent des calculs géotechniques supplémentaires et reposent sur les paramètres issus de la caractérisation mécanique de chaque matériau (classiquement, γ , ϕ et c).

2.1. Influence des paramètres des sols dans les stabilités

On propose ici de balayer l'influence de chacun de ces paramètres dans les calculs de justification des ouvrages.

2.1.1. Stabilité externe – Glissement sur la base de l'ouvrage

La vérification de non glissement consiste à s'assurer que l'ensemble des efforts appliqués à l'ouvrage ne le déstabilise pas d'un point de vue « horizontal », c'est-à-dire, qu'ils n'engendrent pas un glissement vers l'avant de l'ouvrage. Le sol de fondation sur lequel il est fondé s'oppose à ce déplacement par le biais d'une résistance au cisaillement à l'interface {ouvrage – sol de fondation}.

Tableau 1. Influence des paramètres de sol sur la stabilité externe (Glissement)

SOLS	ACTIONS DÉFAVORABLES	ACTIONS FAVORABLES
Ouvrage		γ conditionne l'effort vertical de l'ouvrage et donc la résistance en cisaillement de la base φ et c conditionnent les caractéristiques de cisaillement de la base
Arrière	φ est le paramètre le plus influent de la poussée des terres et des surcharges γ influe sur les efforts de poussée à l'arrière de l'ouvrage	c réduit la poussée seulement si la tenue à long terme du remblai arrière est assurée.
Assise		φ et c conditionnent les caractéristiques de cisaillement de la base

2.1.2. Stabilité externe – Défaut de portance au niveau de la base de l'ouvrage

La vérification de non défaut de portance consiste à s'assurer que l'ensemble des efforts appliqués à l'ouvrage ne le déstabilise pas dans le sens « vertical », c'est-à-dire, qu'ils n'engendrent pas un enfoncement de l'ouvrage. Le sol de fondation sur lequel il est fondé s'oppose à ce déplacement par le biais d'une capacité portante.

Tableau 2. Influence des paramètres de sol sur la stabilité externe (Portance)

SOLS	ACTIONS DÉFAVORABLES	ACTIONS FAVORABLES
Ouvrage	γ conditionne le poids de l'ouvrage exercé sur l'assise	
Arrière	φ est le paramètre le plus influent de la poussée γ influe sur les efforts de poussées à l'arrière de l'ouvrage	c réduit la poussée seulement si la tenue à long terme du remblai arrière est assurée
Assise		q_{uk} Capacité portante de l'assise fréquemment déduite des modèles pressiométriques ou pénétrométriques

Facteur de réduction de la portance d'une assise. Lorsqu'un ouvrage est implanté dans un versant plus ou moins important, la proximité d'une pente de talus à l'aval de l'ouvrage peut engendrer une réduction importante de la capacité portante. Cette réduction est notée i_{β} et dépend non seulement de l'ancrage vertical de l'ouvrage au sein du talus mais également des paramètres φ et c des sols constituant le talus. Pour l'exemple d'un élargissement d'un remblai routier sur un talus proche d'une pente traditionnelle de 3H/2V, et en considérant des matériaux de remblai relativement bons (grave sableuse naturelle), ce facteur de réduction de capacité portante avoisine les 30% de la valeur mesurée sur « terrain plat ». Cette réduction qui concerne toutes les structures de soutènement (y compris sol renforcé) est de loin l'un des paramètres les plus dimensionnant de ce type de projet et induit le plus souvent, soit un agrandissement de l'assise de l'ouvrage (longueur des renforcements), soit un recours à des matériaux de remplissage alternatifs (par exemple caractérisés par des poids volumiques faibles).

2.1.3. Stabilité interne – Rupture des constituants de l'ouvrage

La vérification de résistance interne pour un ouvrage en sol renforcé consiste à s'assurer que les efforts développés au sein de l'ouvrage n'excèdent pas la résistance mécanique individuelle ou

combinée des éléments le constituant. De manière générale, on isole un volume d'ouvrage dont le poids est le principal facteur engendrant sa déstabilisation vis-à-vis d'un autre volume d'ouvrage considéré lui comme stable. C'est à l'interface de cette surface de rupture séparant les deux volumes qu'est évaluée une résistance au cisaillement du sol constituant l'ouvrage en incluant également les paramètres de résistance mécanique des géotextiles associés (de manière générale, fonction de la densité de géotextile interceptée par la surface de rupture + résistance à la traction).

Tableau 3. Influence des paramètres de sol sur la stabilité interne

SOLS	ACTIONS DÉFAVORABLES	ACTIONS FAVORABLES
Ouvrage	γ paramètre déstabilisant puisque responsable du glissement d'un bloc interne de l'ouvrage	φ et c conditionnent la résistance au cisaillement interne de l'ouvrage
Arrière	φ est le paramètre le plus influent de la poussée γ influe sur les efforts de poussées à l'arrière de l'ouvrage	c réduit la poussée seulement si la tenue à long terme du remblai arrière est assurée
Assise		

Compactage du matériau de remplissage. Le bon compactage du matériau constituant l'ouvrage en sol renforcé, et de fait la maîtrise de son poids volumique par rapport à un optimum Proctor, passe par la maîtrise d'un certain poids volumique γ . Rappelons qu'au-delà de l'exigence d'élever un remblai technique selon un objectif de compactage adapté à son exploitation, il s'agit surtout de limiter les déformations internes de l'ouvrage ainsi que de générer un contact sol-géotextile permettant un meilleur comportement mécanique et une meilleure transmission des efforts internes du sol vers le géotextile mais également du géotextile vers le sol (dans le cas d'un mécanisme d'ancrage).

2.1.4. Stabilités générale et mixte – Rupture du remblai attenant et du massif en sol renforcé

L'étude de la stabilité générale (et mixte) consiste à vérifier que pour chaque ligne de rupture potentielle isolant un bloc et ne traversant pas l'ouvrage (respectivement traversant l'ouvrage ainsi que le remblai), l'ensemble des actions tendant à faire glisser ce bloc est équilibré par la résistance au cisaillement du remblai ainsi que des géotextiles le long de cette surface.

Tableau 4. Influence des paramètres de sol sur la stabilité générale et mixte

SOLS	ACTIONS DÉFAVORABLES	ACTIONS FAVORABLES
Ouvrage	γ paramètre déstabilisant puisque responsable du glissement d'un bloc interne de l'ouvrage	γ influe sur l'ancrage des géosynthétiques φ et c conditionnent la résistance au cisaillement interne de l'ouvrage
Arrière	γ paramètre déstabilisant puisque responsable du glissement d'un bloc interne de l'ouvrage influe également sur les efforts de poussées à l'arrière de l'ouvrage	γ influe sur l'ancrage des géosynthétiques φ et c conditionnent la résistance au cisaillement du remblai. La cohésion est un paramètre influent dans les parties « verticales » de la ligne de rupture
Assise		φ est un paramètre influent de la résistance au cisaillement dans les parties « horizontales » de la ligne de rupture

2.2. Plage de valeurs et influence des paramètres

Comme indiqué précédemment, les paramètres mécaniques d'un sol interviennent dans la totalité des vérifications à conduire pour un ouvrage en sol renforcé. Si le poids volumique intervient principalement dans l'évaluation des efforts appliqués à l'ouvrage ainsi que ceux qu'il induit sur sa base, le paramètre de frottement (et de cohésion dans une moindre influence) sont les facteurs prédominant de toutes les résistances.

Rappelons également que, sauf dans certains cas spécifiques, le poids volumique d'un matériau sol s'étend couramment de 16 à 22 kN/m³ et que son influence sur le calcul des efforts suit une loi généralement linéaire (fonction des volumes de sols considérés en mètres cubes).

Le paramètre de cohésion, notamment pour des sols remaniés (déblayés puis remis en œuvre) évolue généralement d'une valeur de 0 kPa à 10 kPa. Notons également qu'il est fréquent de considérer sécuritairement une valeur nulle de cohésion dans le calcul des poussées appliquées à l'ouvrage bien que certains outils numériques actuels (de même que l'Eurocode 7 dans son annexe C) offrent la possibilité de la considérer dans les calculs et ainsi d'envisager une réduction de poussée par rapport à celle induite par un matériau purement frottant. La relation entre la cohésion et l'évaluation des résistances suit aussi généralement une loi linéaire (généralement fonction des surfaces de cisaillement étudiée en mètres carrés).

Le paramètre de frottement ne s'utilise quant à lui qu'au sein d'une expression de type $\tan \varphi$ dans le cas d'une résistance au cisaillement classique et de type $\tan^2 \varphi$ dans le cas des efforts de poussée. Dans les deux cas, l'influence du paramètre φ sur l'évaluation des résistances ou des efforts ne suit pas une loi linéaire. À la différence des autres paramètres, cela signifie que la variation de seulement quelques degrés pour un angle de frottement peut induire une très forte variation de l'effort calculé. Les valeurs couramment rencontrées dans les documents de marché (hors cas exceptionnel) s'étendent généralement de 25 à 39 degrés. Une plage de valeur aussi étendue souligne d'autant plus l'influence importante de ce paramètre et les conséquences sur le dimensionnement d'une appréciation « trop hypothétique ».

2.3. Caractérisation des paramètres mécaniques d'un sol associé à un géotextile

Lorsque l'on souhaite élever une structure en sol renforcé, les matériaux déjà en place comme ceux qui seront rapportés peuvent faire l'objet d'une caractérisation géotechnique. On a vu précédemment que les paramètres mécaniques d'un sol interviennent dans le calcul de toutes les actions favorables et défavorables vis-à-vis des stabilités étudiées. Si une marge d'erreur de 10% sur l'estimation du poids volumique peut induire une majoration d'effort sensiblement équivalente, la même marge d'erreur sur un angle de frottement peut induire un effort majoré de 30%. Une caractérisation des paramètres mécaniques des sols s'avère donc d'autant plus importante qu'une sous-estimation de cette étape aura une incidence directe sur les proportions de la solution qui sera projetée.

On distinguera trois types de caractérisation mécanique :

- via une mesure directe ;
- via une mesure indirecte ;
- via une rétro-analyse.

2.3.1. Mesures directes

Les essais courants. On entend par mesures directes, une évaluation des paramètres mécaniques d'un sol à partir d'essais initialement conçus dans ce but. Parmi les types d'essais existants, l'essai à la boîte de cisaillement (NF P 94-071) et l'essai triaxial (NF P 94-074) sont tous deux des essais de laboratoire. Sans rentrer dans le détail de ces deux essais, ou de la pertinence de recourir à l'un plutôt qu'à l'autre, on obtient une évaluation des paramètres de frottement φ et de cohésion c .

Représentativité de l'échantillon. Lorsqu'ils se destinent à caractériser un sol en place, chacun des essais requiert le prélèvement d'un échantillon intact à l'aide d'un sondage carotté descendu jusqu'à la profondeur souhaitée. C'est au sein des carottes prélevées qu'il est possible d'extraire un échantillon de sol « non-altéré par la réalisation du sondage » et de le préparer à l'appareillage envisagé.

Dans le cas d'un cisaillement à la boîte, le volume de sol testé correspond à un disque d'environ 60 mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur. Concernant l'essai triaxial, les dimensions de l'échantillon testé correspondent à un cylindre d'au moins 35 mm de diamètre et 70 mm de hauteur. Certaines boîtes de cisaillement peuvent également présenter des tailles beaucoup plus grandes de plusieurs dizaines de centimètres, il en est de même pour les cellules triaxiales dont la norme précise un diamètre minimal à respecter de 5 à 10 fois la taille du plus gros élément testé.

Remarques sur les données de marché disponibles. La majeure partie du temps, peu de bureaux d'études géotechniques sont équipés de dispositifs de grande taille (plutôt destinés à caractériser des éléments graveleux ou conduire des travaux de recherche spécifiques). Lorsque des résultats de cisaillement sont fournis (à la boîte ou au triaxial), ils concernent le plus souvent des matériaux à granulométrie relativement fine (allant jusqu'à 10-20 mm) ou compatibles avec le diamètre de carottage usuel de 90 mm. Sur les chantiers que nous avons réalisés, il est plutôt fréquent de rencontrer des

matériaux naturels, voire rapportés, présentant des diamètres de 60 à 80mm, ce qui supposerait de disposer de cellules triaxiales permettant le traitement d'échantillon de 40 cm de diamètre minimum. A cela s'ajoutent également les carottages traversant fréquemment des sols comportant une matrice fine et de nombreux blocs, ou des matériaux granulaires si denses qu'ils sont difficilement sécables pour les mettre en œuvre dans les appareillages. Dans ce genre de cas, la pratique opte souvent pour réaliser le cisaillement au sein des matrices fines de ces matériaux, tout d'abord parce que supposer la propagation d'une ligne de rupture le long de ces matériaux plutôt qu'au sein de blocs apparaît comme une hypothèse cohérente et sécuritaire, et, surtout, parce que la caractérisation mécanique est envisageable.

2.3.2. Mesures indirectes

Les essais courants. On entend, par mesures indirectes, une évaluation des paramètres mécaniques d'un sol par le biais d'essais normalement destinés à la mesure d'autres paramètres. On parle également dans ces cas de corrélations. Dans les études géotechniques disponibles dans les marchés, nous rencontrons usuellement des sondages pressiométriques et des essais pénétrométriques, généralement réalisés pour caractériser des portances de sol de fondation voire, dans d'autres cas, définir des valeurs de pressions limites ou résistances de pointe pénétrométriques donnant des renseignements complémentaires sur l'intégrité mécanique d'un remblai traversé.

Les corrélations avec les paramètres de cisaillement. Rappelons qu'une corrélation consiste à identifier un lien comportemental des sols entre deux paramètres. Dans la pratique, de nombreux travaux de recherche expérimentale tentent de corrélérer la valeur d'un paramètre mécanique aux caractéristiques de cisaillement d'un sol (frottement φ et cohésion c). Il est ainsi fréquent d'observer dans les documents d'études de sol le recours à des corrélations même lorsque des essais de caractérisation en laboratoire sont réalisés. Si à la base, les corrélations permettent d'apporter un regard critique aux résultats issus du laboratoire (et d'en analyser la représentativité statistique), elles sont devenues avec le temps des outils permettant de réaliser des estimations de paramètres mécaniques, même lorsqu'aucun essai de laboratoire n'est disponible. La fiabilité des estimations repose sur la pertinence des corrélations utilisées, du cadre de leur utilisation (corrélation réalisée pour un type de matériau plutôt qu'un autre) et de fait, la qualité des essais réalisés pour évaluer un paramètre. Bien qu'il existe peu de corrélations permettant d'évaluer la cohésion c d'un sol, il en existe plusieurs reliant la pression limite ou la résistance de pointe pénétrométrique à l'angle de frottement φ .

2.3.3. Rétro-analyse sur l'état actuel d'une zone de projet

Une dernière évaluation des paramètres des sols peut se faire par déduction de l'état observé sur site avant travaux, voire idéalement, pendant les terrassements.

Les photographies d'un site tout d'abord (et pas seulement d'un tas de matériau ou le fond d'une fouille) sont une donnée très instructive permettant d'apprécier le dénivelé du terrain, l'influence d'une végétation luxuriante sur la tenue des terres, les horizons géologiques affleurants, encore les zones d'érosion ou encore les zones en cours d'exploitation.

La connaissance d'une topographie du site renseigne également sur l'état de stabilité ou d'instabilité du terrain. Cet état peut ainsi faire l'objet d'une rétro-analyse, c'est-à-dire, une modélisation actuelle de sa stabilité ou de son instabilité sur la base d'hypothèses de cisaillement. Lorsque les valeurs supposées pour le frottement φ et la cohésion c conduisent à une modélisation assurant l'obtention d'un coefficient de sécurité minimal correspondant à l'objectif du géotechnicien, alors ces paramètres constituent une estimation sécuritaire des paramètres réels.

2.3.4. De l'intérêt du couplage des méthodes de détermination

L'hétérogénéité des sols constitue la principale difficulté lorsqu'un géotechnicien souhaite fixer une modélisation simple et pourtant nécessaire à ses calculs. Bien que la caractérisation des paramètres de sol puisse se faire par des méthodes de type laboratoire, ces essais présentent des limites de faisabilité (peu adapté à toutes les granulométries), ainsi qu'un coût non négligeable selon les cas (exécution d'un sondage carotté + essai de cisaillement). Les corrélations via d'autres essais géotechniques plus fréquemment rencontrés (sondage pressiométrique ou pénétrométrique) présentent également des limites de validité, toutes les corrélations n'ayant pas été construites sur l'étude des mêmes matériaux. A cela doit également s'ajouter l'implantation des reconnaissances géotechniques, plutôt destinées à l'étude du sous-sol en vue de la réalisation de bâtiment et pas forcément pour l'élaboration d'un ouvrage

de soutènement en sol renforcé. La rétro-analyse ne constitue pas toujours une réponse exhaustive mais permet dans certains cas de conforter les hypothèses du géotechnicien. Car toutes ces méthodes ont en effet pour but de permettre au géotechnicien de poser des hypothèses quant aux paramètres de sol qui seront retenus dans les calculs. Plus celui-ci dispose de source d'information et de possibilité de confronter ses méthodes d'évaluation, plus il sera en mesure de statuer sur des hypothèses raisonnables et surtout, optimales pour concevoir la géométrie d'un ouvrage en sol renforcé.

L'important est de comprendre l'influence des hypothèses et d'avoir un regard critique sur les résultats.

2.4. La normalisation et la caractérisation mécanique des sols

Si le géotechnicien dispose de nombreuses méthodes lui permettant d'estimer ou de caractériser plus finement les paramètres mécaniques d'un sol, la qualité très disparate des données géotechniques exploitables au moment de l'exécution de l'ouvrage pose la question des indications présentes au sein de la normalisation en vigueur.

Rappel sur l'enchaînement des missions géotechniques. La norme NF P 94-500 définit les missions géotechniques à conduire selon l'avancement d'un projet. Rappelons à cet égard que l'élaboration d'un ouvrage en sol renforcé peut être considéré à lui seul comme un projet.

Lorsqu'un ouvrage en sol renforcé doit être réalisé, la mission géotechnique associée est de niveau G3 et comporte 2 parties : une phase dite « Étude » consistant à dimensionner la géométrie de l'ouvrage validant l'ensemble des critères de stabilité et une phase dite « Suivi » destinée à s'assurer du respect des règles d'exécution de l'ouvrage. Une telle mission G3 fait normalement suite à une mission de niveau G2-PRO, suivant elle-même une mission de niveau G2-AVP.

L'annexe A de la norme développe la présentation générique de chaque mission et synthétise dans différents tableaux des exemples d'étude à faire à chaque phase d'une mission. En s'intéressant à la question des paramètres de sol, nous pouvons noter :

- que les caractéristiques géotechniques doivent faire l'objet d'une « Première estimation des caractéristiques importantes » au niveau G2-AVP et de « Valeurs caractéristiques proposées pour le projet » au niveau G2-PRO ;
- que la portance d'une assise pour un ouvrage en terre doit faire l'objet d'une « étude d'un cas type » au niveau G2-AVP et d'une « étude pour l'ensemble du projet » au niveau G2-PRO.

La norme NF P 94-500 introduit la question des missions géotechniques comme destinées à une meilleure maîtrise des « risques géotechniques ». Ces risques inhérents au caractère masqué de la nature du sous-sol et de son hétérogénéité supposent qu'une « bonne identification des risques impose donc nécessairement des investigations géotechniques suffisantes et pertinentes en regard des besoins des différentes phases de conception, voire des études d'exécution ».

Que précise la normalisation géosynthétique au sujet de cette caractérisation ? Au sein de la norme NF P 94-270, il est indiqué le recours à des essais de cisaillement en laboratoire, et dans le cas de difficultés ou d'une impossibilité de prélèvement in-situ, à des corrélations. Toujours au sein de cette norme, il est indiqué que « la vérification de l'angle de frottement interne du matériau doit reposer sur des résultats d'essais de cisaillement [...] en laboratoire, sur des éprouvettes reconstituées à partir d'échantillons représentatifs du matériau dans les conditions où il se trouvera après sa mise en œuvre. »

Que ce soit dans cette norme ou encore l'Eurocode 7, la question de la caractérisation des paramètres de sol repose sur l'idée de disposer de reconnaissances en nombre « suffisant » mais aucunement sur un nombre minimal de reconnaissances à conduire.

Dans la pratique. La conception et la réalisation d'ouvrages en sol renforcé par géosynthétiques n'impose pas la réalisation d'un nombre minimal de reconnaissances géotechniques avant travaux, desquelles découlent pourtant toute la phase de caractérisation des paramètres mécaniques. Il est ainsi fréquent de voir les propositions de paramètres mécaniques d'une mission G2-PRO s'avérer sécuritaires et demandant dans tous les cas une validation avec des reconnaissances complémentaires réalisées à niveau G3, ce qui ne se fait malheureusement que très rarement en pratique pour plusieurs raisons, principalement économiques.

Une exception des ouvrages en sol renforcé – Les massifs cloués. Présentées dans la même norme NF P 94-270, les parois clouées sont une autre technique de renforcement de sol dont la conception

impose la réalisation d'essais de caractérisation en précisant un nombre d'essais fonction des horizons géologiques rencontrés et de la surface d'ouvrage à réaliser (Annexe G.6).

3. Exemples de contraintes géotechniques pour la conception/réalisation d'ouvrages en sol renforcé par géotextiles alvéolaires

3.1. Aménagement du quartier Kessler-Rabanesse – Ouvrage allégé sur vestiges archéologiques

Le projet d'aménagement du quartier Kessler-Rabanesse à Clermont-Ferrand présentait une contrainte de sous-sol importante : la présence de vestiges archéologiques. Après de nombreuses années d'études du site, ce dernier avait fait l'objet de remblai en sable non compacté jusqu'à atteindre l'altimétrie basse des travaux. Le projet prévoyait l'élévation d'environ 2,50 m de remblai permettant de s'aligner sur l'altimétrie des rues entourant la zone de travaux et sur l'esplanade projetée entre l'École Supérieure d'Art d'un côté et un bâtiment neuf construit sur pieux de l'autre. Au cœur de ce remblai, une « fosse » devait être conservée car entourant un bâtiment classé et nécessitant de fait une verticalisation du remblai périphérique. Cette verticalisation demandait un ouvrage de soutènement.

La zone de projet présente néanmoins la contrainte de présenter un sous-sol très faible mécaniquement. Non seulement il existe un risque de ne pas disposer de la capacité portante mais des tassements différentiels sont à prévoir. La solution de base impliquant un mur en béton armé fondé sur micropieux représente une enveloppe financière non-négligeable, de même que la réalisation de fondations profondes au sein de vestiges archéologiques soulève un problème éthique.

La solution retenue fut de réaliser un ouvrage en sol renforcé par géotextiles alvéolaires, remblayés à l'aide d'un matériau dit « pouzzolane » et dont le principal avantage est qu'il présente un poids volumique relativement faible (voisin de 11 kN/m³). En cours de chantier, la granulométrie retenue et le compactage réalisés ont cependant conduit à une forte fragmentation des grains ayant induit la nécessité de réaliser des mesures réelles du poids volumique. La crainte que cette nouvelle donnée engendre des incréments d'efforts sur l'ouvrage en cours de montage était réelle. Les résultats ont finalement abouti à des valeurs proches de 14 kN/m³, avec des conséquences maîtrisables.

Remarques. Ici, le paramètre mécanique prédominant est le poids volumique du remblai à réaliser, aussi bien à l'arrière de l'ouvrage en sol renforcé qu'à l'intérieur de celui-ci. Le compactage d'un remblai est toujours susceptible de faire évoluer son poids volumique, ce qui dans le cas de matériaux allégés, renforce la nécessité de contrôle lors de l'exécution.



Figure 1. Vues de l'ouvrage

3.2. Élargissement de l'A31 – Sortie Jouy-aux-Arches – Ouvrage allégé en crête de talus en limite de stabilité

La construction d'une bretelle de sortie impliquait l'élargissement de l'A31 à 3 voies. Le projet présente pour principale contrainte que selon les données géotechniques à disposition, le remblai présente une stabilité critique par grand glissement. Un élargissement en tête du talus d'environ 4 m supposait donc une mise en surcharge de celui-ci (du fait du poids des terres de l'ouvrage + le trafic de la bretelle de sortie) et donc un risque de rupture selon des surfaces extérieures à toute solution d'ouvrage d'élargissement (qu'il soit en béton armé ou en sol renforcé d'ailleurs). La solution technique

naturellement envisagée consistait donc en un remblai sur les 13 m de hauteur de talus, d'une largeur de 4m et sur plusieurs centaines de mètres de longueur, soit un volume estimé à plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes (Figure 2).

La solution retenue consistait en une variante d'élargissement en tête à l'aide de matériaux granulaires ultra-légers, aussi bien en remplissage du massif alvéolaire qu'en remblai arrière à celui-ci : l'argile expansée. En procédant à une excavation de la crête de talus, on substituait un poids volumique de sol de 20 kN/m³ par un poids volumique de l'ordre 4,5 kN/m³ (près de 4 fois moins). L'écart de surcharge que le talus n'avait dès lors plus à supporter permettait de considérer les surcharges liées au trafic ainsi que la fondation d'un portique de signalisation pour ainsi revenir à l'état de contraintes initiales avant travaux.

Ajoutons que l'argile expansée utilisée a fait l'objet de nombreuses planches d'essai en laboratoire, tout d'abord pour définir une granulométrie adaptée à des travaux de remblai technique mais également, pour définir une procédure de contrôle de compactage (NF P 94-105) à l'aide d'un pénétromètre dynamique portable reproductible pendant la phase chantier.

Remarques. Ici, l'implantation d'un ouvrage allégé en tête de talus est paradoxale avec l'idée de réaliser un soutènement à l'aide d'un ouvrage poids. C'est pourquoi les pentes de terrassement ont été évaluées de sorte à tendre vers la stabilité naturelle des matériaux constituant le talus et ainsi, faire en sorte que les seules poussées des terres appliquées à l'ouvrage proviennent du remblai allégé.

Le recours original à ce type de matériau renforçait également la nécessité d'assurer un contrôle lors de l'exécution des travaux, ce qui a pu être programmé en amont.



Figure 2. Vues de l'ouvrage

3.3. Soutènement d'une plateforme de livraison – Fondation sur une assise substituée de mauvaise qualité

Le projet de construction d'un centre commercial supposait l'aménagement d'un soutènement d'une plateforme de livraison (Figure 3). Sur les quelques sondages pressiométriques réalisés dans la zone, tous sont distants du soutènement de plus de 100 m. Localement, on ne dispose que de reconnaissances à la pelle mécanique et celles-ci indiquent la présence de formations argileuses humides, laissant présager d'une très mauvaise capacité portante. Une substitution du sol d'assise de l'ouvrage a donc été envisagée à l'aide de béton concassé disponible en grande quantité sur la zone de projet. Problème : cette substitution mise en œuvre en de trop grosses épaisseurs et mal compactée ne laissait pas penser à une amélioration flagrante de la portance. Deuxième problème, impossible de la reprendre sans engendrer des coûts onéreux du fait de l'ensevelissement de réseaux à l'intérieur.

Une première étape a d'abord consisté à réaliser des contrôles de portance avant élévation de l'ouvrage, permettant de quantifier une résistance de pointe finalement analogue aux argiles substituées et confirmant une capacité portante en deçà de celle escomptée. L'adaptation sur le terrain a ensuite consisté en deux choses :

- élargir en tête l'ouvrage par la mise à disposition d'autres géométries de nappes alvéolaires, de sorte à générer un écran d'application des poussées non plus vertical mais incliné vers l'arrière. Une telle inclinaison d'écran permettait ainsi de diminuer les poussées appliquées au volume de sol renforcé ;

- renoncer à l'utilisation des matériaux argileux du site en remblai à l'arrière de l'ouvrage tels que prévu pour les remplacer par le béton concassé disponible. Là encore, une reconnaissance à l'aide d'un pénétromètre dynamique portable a permis d'évaluer par corrélation l'angle de frottement de ces matériaux. Ce dernier s'avérant nettement supérieur à celui estimé pour les argiles recompressées initialement prévues, les poussées sur ouvrage s'avéraient donc plus faibles.

Remarques. En plus de ne pas toujours disposer de données d'entrée sur les paramètres mécaniques des matériaux, la phase de préparation de l'assise de l'ouvrage peut comporter des aléas de réalisation. Ces aléas de travaux peuvent avoir une incidence très forte sur la justification de stabilité d'un ouvrage et l'adaptation sur chantier à l'aide d'outils de mesure géotechnique portables ainsi que la maîtrise géotechnique d'un problème de poussées sur écran sont des éléments clés pour éviter une interruption des travaux.



Figure 3. Vues de l'ouvrage

4. Conclusions

Parmi les paramètres mécaniques régissant le comportement d'un ouvrage en sol renforcé par des géosynthétiques, les paramètres du matériau sol sont très importants. Ceux qui le définissent dans les modélisations courantes (poids volumique γ , angle de frottement φ , cohésion c ou capacité portante q_{uk} pour la vérification de portance) interviennent dans la totalité des calculs de stabilité d'un ouvrage. Rappelons que dans la majeure partie des cas, c'est bien de ces résultats, et donc des sols présents (à l'intérieur ou à l'arrière de l'ouvrage), que découle le dimensionnement des géosynthétiques de renforcement et non l'inverse. Parmi tous les paramètres à définir, l'influence prédominante de l'angle de frottement dans le calcul des poussées (principales actions défavorables vis-à-vis des stabilité étudiées) et dans le calcul des résistances au cisaillement (principales actions favorables vis-à-vis des stabilité étudiées) en fait le paramètre le plus critique à définir.

Quand on s'intéresse aux moyens de caractériser les paramètres mécaniques des sols, on constate que de nombreuses méthodes peuvent être utilisées par le géotechnicien. Dans la pratique, ce dernier ne s'arrête que rarement à une seule d'entre elle, optant plutôt pour la confrontation des résultats obtenus par des méthodes d'évaluation directe ou indirecte, complétées par sa propre expérience du comportement des matériaux rencontrés. Au final, la qualité de la caractérisation des sols dépend intimement de la quantité d'informations dont le géotechnicien dispose pour construire son analyse et conforter les hypothèses de valeurs qu'il choisira de retenir dans le cadre d'un projet. Précisons à ce sujet qu'un écart d'estimation de quelques degrés pour un angle de frottement suffisent pour générer des sous-dimensionnements ou des surdimensionnements de plusieurs dizaines de pourcents, tant sur les proportions géométriques des solutions proposées que sur le coût global de la solution (notamment celui des terrassements associés).

Les conséquences économiques importantes résultant de l'estimation d'un seul paramètre pourraient supposer une volonté d'imposer des minimas de caractérisation ou de nombre de reconnaissances géotechniques qui lui sont dédiées, comme cela peut être fait pour un autre type d'ouvrage en sol renforcé que sont les parois clouées avec les essais d'arrachement préalables. Et pourtant, ni la normalisation géosynthétique, ni la normalisation géotechnique, n'insiste réellement sur cette nécessité. Seul un extrait de la norme des missions géotechniques NF P 94-500 rappelle que « L'expérience

montre que tout investissement fait par le maître d'ouvrage en phase de conception permet une meilleure maîtrise des risques et des coûts liés au site et aux sols ».

Nous pourrions également ajouter à cela que l'acquisition de données géotechniques peut être étendue à la phase d'exécution des travaux. Les quelques exemples abordés dans cet article montrent que les contrôles et les mesures réalisées en phase chantier permettent de non seulement confronter la réalité aux estimations faites en phase conception mais également de s'adapter aux aléas d'exécution.

5. Références bibliographiques

NF EN 1997 (2007) – Eurocode 7 : Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales et Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais

NF EN 14475 (2007) – Exécution de travaux géotechniques spéciaux – Remblais renforcés

NF P 94-105 (2012) – Sols : Reconnaissance et essais – Contrôle de la qualité du compactage – Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable – Principe et méthode d'étalonnage du pénétromètre – Exploitations des résultats – Interprétation

NF P 94-261 (2013) – Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations superficielles

NF P 94-270 (2009) – Ouvrages de soutènement – Remblais renforcés et massifs en sol cloué

NF P 94-500 (2013) – Missions d'ingénierie géotechnique – Classification et spécifications

