

Remblais en matériaux dégradables plus ou moins fragmentables

Embankments made of degradable materials

Y. Guerpillon & M. Virollet

SCETAUROUTE, Département Géotechnique et Matériaux, Seyssins, France

RÉSUMÉ

Après avoir analysé les principales déformations pouvant survenir sur des matériaux sensibles à l'eau et éventuellement dégradables mis en remblai, on a abordé les mécanismes qui les génèrent et certaines dispositions constructives permettant de diminuer les effets néfastes. La saturation des remblais, après leur réalisation, est à l'origine des désordres observés. À partir de cette réflexion, des méthodes de réalisation, déjà mises en application sur des ouvrages autoroutiers importants, sont proposées.

ABSTRACT

After analysis of deformations that can happen on embankments built with water-sensitive materials, eventually degradable, we will discuss mechanisms controlling deformations as well as certain technical dispositions for decreasing potential negative effects. Saturation of embankments after their construction, is obviously the cause of observed disorders. Based on this comprehension, techniques already used for important motorway fills, are exposed.

1 INTRODUCTION

Le réemploi de matériaux sensibles à l'eau, tels que certaines argiles, les marnes et les craies, est rendu obligatoire par la difficulté, voire l'interdiction, d'ouvrir des emprunts de bons matériaux et de trouver des zones de dépôts.

Ces sols, qui présentent une chute de portance élevée pour une faible augmentation de la teneur en eau, ont tendance à être mis en œuvre plutôt du côté sec, afin d'assurer des conditions de traficabilité correctes en cours de chantier, qui peuvent être préjudiciables au comportement de l'ouvrage en service.

En effet, l'expérience acquise ces dernières années sur des remblais de grande hauteur ($H > 10$ m), réalisés en matériaux sensibles, a permis d'observer certains défauts de comportement, consécutifs à l'imbibition différée de ces matériaux.

2 RISQUES INDUITS PAR L'EMPLOI DE MATÉRIAUX SENSIBLES

2.1 Phénomènes constatés

Les phénomènes constatés, notamment sur l'autoroute Toulouse-Bordeaux, où les remblais sont constitués de sols marneux, fortement surconsolidés en place, sont de plusieurs types :

- fissuration longitudinale des chaussées, généralement en bord de voie, mais qui peut affecter, pour les remblais de très grandes hauteurs, toute la largeur de la plate-forme ;
- affaissements au contact des ouvrages hydrauliques ;
- déformation des talus, pouvant démanteler les dispositifs d'assainissement (descentes d'eau) ;
- modification des dévers pouvant induire un risque d'aquaplaning en période humide ;
- perte de portance de la chaussée par suite d'une diminution du module des remblais ;
- glissement des talus, c'est la phase finale des déformations.

2.2 Sols concernés

Deux types de matériaux sont essentiellement concernés par cette communication (selon la classification du Guide Français sur les Terrassements dénommé GTR).

1. Les sols fins argileux du type A3 ($25 < I_p < 40$) ou A4 ($I_p > 40$) ; ils peuvent subir des variations de volume et/ou des déformations par distorsion sous l'effet des variations hydriques postérieures à la mise en œuvre. Ces variations sont d'autant plus importantes que la teneur en eau de mise en œuvre est éloignée de la saturation.

2. Les matériaux rocheux évolutifs de type R1 (craie) ou R3 (marnes) : leur évolution conduit à un changement de granulométrie, donc de volume global.

Sont exclus de cette communication les matériaux présentant des comportements particuliers (Terres noires ou schistes carton du Jurassique, par exemple) qui contiennent des pyrites.

2.3 Mécanisme de génération des désordres

Pour les matériaux, dont on a spécifié la nature, les déformations proviennent de trois phénomènes.

1. Tassement et/ou gonflement sous l'effet des cycles d'hydratation – dessiccation.
2. Reptation par distorsion - éventuellement suivie de rupture – dans les zones de talus.
3. Évolution de la granulométrie pour les matériaux évolutifs.

Les désordres proviennent de l'effet de la migration de l'eau au sein du remblai, L'eau entre ou sort par les frontières du remblai : base, talus, couche de forme et les ouvrages d'assainissement lorsqu'ils sont détériorés.

Les premières migrations d'eau, à la mise en service, se font généralement dans le sens de l'imbibition.

Les propriétés des sols sensibles non saturés sont telles que les déformations internes d'un remblai sont a priori envisageables sous toutes les formes :

- gonflement en zone peu chargée – en tête ;
- effondrement des zones chargées – à la base ;
- distorsions de cisaillement au voisinage des talus ;

- rupture de talus par chute de résistance au cisaillement associée à l'imbibition.

À l'imbibition peut succéder une période de dessiccation qui produira les phénomènes inverses, une partie des déformations étant irréversible.

3 CONSÉQUENCES DES PROPRIÉTÉS DES SOLS NON SATURÉS SENSIBLES À L'EAU

Pour comprendre le comportement des ouvrages, il est utile de rappeler certaines propriétés fondamentales des sols sensibles à l'eau. Le comportement de ces matériaux, réemployés en remblai – c'est à dire non saturés - est très complexe et dépend, entre autres, des paramètres suivants :

- nature du matériau (argile, marne, craie etc.) ;
- compacité et teneur en eau de mise en œuvre ;
- charge de service ;
- anisotropie des contraintes suivant la position dans le remblai.

3.1 Matériaux non évolutifs

D'une façon générale, les déformations des sols non saturés, sous l'effet d'une imbibition différée, sont d'autant plus fortes que le matériau aura été compacté du côté sec.

Le surcompactage n'est pas forcément une garantie de meilleur comportement. Un sol surcompacté peut gonfler sensiblement plus.

Les considérations théoriques et les observations pratiques montrent que les comportements du sol varient selon sa nature et sa position au sein du remblai ; les effets des variations de teneur en eau diffèrent en conséquence.

1. Pour un matériau compacté du côté humide, le seul risque en cas d'imbibition différée est un léger gonflement, réversible, accompagné de distorsions faibles au voisinage des talus.

2. Pour un matériau compacté du côté sec, les phénomènes sont nettement plus marqués :

Au voisinage de l'axe du remblai là où l'état de contraintes est peu anisotrope :

- en partie supérieure, la charge appliquée est faible, ce qui équivaut généralement à un surcompactage fort. L'imbibition a pour effet de faire gonfler le matériau ;

- en partie inférieure, si le remblai est suffisamment haut pour que la charge de service y soit supérieure à la pression statique équivalente de compactage [p_{eq}], il y a alors :

si la teneur en eau est suffisamment forte pour amener le sol à l'état saturé sous charge de service, création de surpressions interstitielles pendant le remblaiement et initialisation d'un phénomène de consolidation. Cette situation peut créer une instabilité de type « court terme » si la montée des remblais se fait trop rapidement au regard de la vitesse de consolidation. C'est le seul risque attaché au terrassement en matériaux très humides ;

si la teneur en eau est proche de l'optimum de compacité, le remblaiement ne produit pas de surpressions et l'imbibition ultérieure induit un léger gonflement ;

si la teneur en eau est plus faible que celle de l'optimum de compacité, l'imbibition ultérieure produit un effondrement irréversible.

Dans les zones de talus là où l'état de contrainte est « fortement anisotrope », l'imbibition se traduit par l'apparition de distorsions génératrices de mouvements qui sont à l'origine de l'apparition d'une flexion transversale de la partie supérieure des remblais. Ce phénomène serait la cause

de la plupart des fissures longitudinales observées sur remblai. Au delà d'un certain stade, ces distorsions – associées à une réduction de la résistance au cisaillement – peuvent conduire à de véritables glissements.

En conclusion, pour limiter l'apparition de déformations sur ouvrages en service, il y a intérêt à compacter systématiquement du côté humide.

Malheureusement ces prescriptions se heurtent au coût et à la difficulté d'humidifier les matériaux et au souci de rendement, directement lié à la traficabilité, et qui baisse avec les surpressions interstitielles produisant le matelassage.

En pratique, les prescriptions doivent composer entre le souci de bonne conduite du chantier et la nécessaire préoccupation du bon comportement des ouvrages en service.

3.2 Matériaux évolutifs

La question concerne les matériaux constitués de deux fractions à granulométrie nettement différenciées : des blocs et une matrice plus fine qui remplit plus ou moins complètement les vides entre blocs. En se dégradant sous l'effet de l'imbibition, les blocs se transforment en matrice et des variations de volume se produisent.

Pour appréhender ce problème, les hypothèses ci-dessous ont été faites :

- le matériau est constitué de blocs fragmentables par altération et d'une matrice ;
- initialement, les espaces entre blocs sont partiellement remplis de matrice ;
- les éléments fins produits par l'altération s'intègrent à la matrice, en remplissant progressivement les vides francs ;
- la porosité n caractérisant les espaces entre blocs, est supposée invariable tant que les vides francs ne sont pas remplis : le volume des vides varie mais leur forme est peu modifiée par l'altération ;
- le poids total du matériau est conservé ;
- le poids volumique de la matrice est pris constant, dans le cas de sols dont la matrice est gonflante et/ou effondrable, l'effet de l'hydratation doit être traité par un autre modèle (Barcelone).

Les paramètres d'état sont définis dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Paramètres d'état

	Blocs rocheux (indice r)	Matrice (indice m)	Vides francs (indice v)	Ensembl
Poids volumique	γ_r	γ_m	0	γ
Poids	$(1-x)P$	xP	0	P
Volume	V_r	V_m	V_v	V
Volume relatif		n_m	n_v	

Les poids volumiques γ intègrent l'eau contenue dans chaque phase constitutive (blocs et matrice) et les vides francs sont supposés secs.

Le volume relatif est le rapport entre le volume d'un constituant et le volume total :

$$n_m = V_m / V \quad (1)$$

$$n_v = V_v / V \quad (2)$$

La porosité est le volume relatif des vides entre blocs :

$$n = n_m + n_v (= 1 - V_r / V) \quad (3)$$

À la forme des blocs et à une énergie de compactage donnée, est attachée une porosité caractéristique n_c correspondant à la porosité d'un ensemble de blocs supposés

en contact les uns les autres. Ceci permet de définir les trois situations suivantes :

$n_m < n_c$ les blocs sont en contact, la matrice ne remplit pas complètement les vides ;

$n_m = n_c$ les blocs sont en contact, la matrice remplit les espaces entre blocs, il n'y a pas de vide franc ;

$n_m > n_c$ les blocs ne sont pas en contact la matrice est prédominante, il n'y a pas de vide franc.

Pour simplifier la présentation des équations, on adopte les paramètres adimensionnels suivants :

$$\rho = \frac{\gamma}{\gamma_m} \quad (4)$$

$$\rho_\gamma = \frac{\gamma_r}{\gamma_m} \quad (5)$$

Tout calcul réalisé, on obtient :

$$0 \leq n_m \leq n_c \quad (6)$$

$$\rho = \frac{\rho_c (1 - n_c)}{1 - x} \quad (7)$$

$$n_m = n_c \quad (8)$$

$$x_c = \frac{\rho_c}{\rho_r - 1} \quad (9)$$

$$\rho_c = n_c + \rho_c (1 - n_c) \quad (10)$$

$$n_c \leq n_m \quad (11)$$

$$\rho = \frac{\rho_r}{x_c(\rho_r - 1) + 1} \quad (12)$$

Le modèle exposé ci-dessus traduit les propriétés que dicte le bon sens, à savoir que :

- il y a effondrement potentiel tant que les vides entre blocs ne sont pas remplis de matrice, c'est à dire tant que le poids de la matrice ne constitue pas 30 % environ du poids total.

- si le processus d'altération des blocs se poursuit après remplissage des vides, les blocs sont écartés par la matrice et il y a gonflement. Cette phase est contrariée par le confinement de la matrice et présente moins de risque d'occurrence.

D'autre part, la variation de volume est fortement sensible :

- à la compacité initiale des blocs ;
- à la densité relative des blocs et de la matrice ;

Le rapport entre le volume V et le volume final V_f du matériau entièrement transformé en matrice est :

$$\frac{V}{V_f} = \frac{\left[\frac{P}{\gamma} \right]}{\left[\frac{P}{\gamma_m} \right]} = \frac{1}{\rho} \quad (13)$$

En pratique, ce modèle confirme clairement l'intérêt à fermer au maximum la structure initiale des matériaux évolutifs en produisant une proportion de fines non altérables de l'ordre de 30 % du poids total.

4 CONDUITE DE LA QUALIFICATION DES SOLS À RÉEMPLOYER

Les études visent à déterminer les quantités disponibles et les propriétés des matériaux de chaque catégorie typique donnée.

Le GTR (1992) retient comme paramètres de qualification :

- les paramètres de nature : granularité (granulométrie, sédimentométrie), argilosité (I_p et VBS) ;
- les paramètres d'état : w_n , w_{OPN} , I_c , I_{PI} ;
- les paramètres d'évolution : coefficient de fragmentabilité (FR) et de dégradabilité (DG).

Les propriétés de comportement décrites ci-dessus incitent à rechercher des données complémentaires :

- gonflement lors de l'immersion entre phases d'essais I_{PI} et CBR. Les résultats sont à analyser à la lumière des propriétés décrites plus haut. Plus l'échantillon est saturé, moins il subit de gonflement ;
- gonflement à l'œdomètre, selon la norme XP P 94-091, ou selon le mode opératoire du LRPC de Toulouse. Ces essais sont pour l'instant les seuls, à caractériser le comportement du sol sous imbibition différée.

Ces essais sont à pratiquer aussi sur les sols traités.

5 CONCEPTION DES OUVRAGES

Les risques d'évolution sont attachés aux variations de teneur en eau. Il est exclu de prétendre éviter toute déformation des remblais après mise en service. Les migrations d'eau sont inéluctables et l'on peut seulement viser d'en limiter les effets.

5.1 Profils en travers

Les matériaux utilisés ont généralement un angle de frottement de l'ordre de 30 degrés, voire moins s'ils sont très plastiques. En cas de saturation, la stabilité des talus ne peut être assurée que si la pente est au maximum de l'ordre de 1V/2H.

5.2 Disposition de contrôle des migrations d'eau

Les variations de teneur en eau au sein d'un remblai peuvent provenir :

- des phénomènes d'imbibition-dessiccation cycliques, par les talus et les couches drainantes sous chaussées ;
- d'échanges d'eau entre zones de remblai de nature et/ou de compacité, donc de succion initiale, différentes ;
- d'imbibition par la base du remblai, en contact avec le sol support.

On s'attachera donc à :

- couper toute alimentation en eau intempestive sous chaussée. Un dispositif drainant transversal au contact déblai-remblai sera prévu ;
- collecter toutes les eaux superficielles ;
- apporter un soin particulier à la conception des assainissements pour éviter tout risque de dislocation en service ;
- mettre en place un matelas anticapillaire à la base des remblais susceptibles d'être alimentés par le sol support (zones inondables ou remblai sur versant). Ce matelas sera constitué de matériau drainant ou d'un matériau traité insensible à l'eau.

5.3 Zonage

5.3.1 Objectifs du zonage

La difficulté de disposer de bons matériaux en quantité suffisante peut conduire à zoner les remblais, de façon à rentabiliser au mieux le volume des meilleurs matériaux. L'objectif est d'assurer un bon comportement de la partie « active » du remblai, c'est à dire la partie située dans la zone d'influence de la chaussée, assimilée à un tronc de pyramide, dont les faces sont à une pente de 2V/1H. Deux solutions sont possibles pour répondre à cet objectif.

1. Traitement d'un noyau sous chaussée en vue de créer un support pour celle-ci, insensible aux mouvements de tête de remblai et de talus (Fig. 1).

2. Encagement du remblai par une carapace pour limiter les mouvements de distorsion des talus sous imbibition et assurer la stabilité des talus à l'égard des glissements potentiels, confiner l'extension latérale de la zone centrale du remblai (Fig. 2).

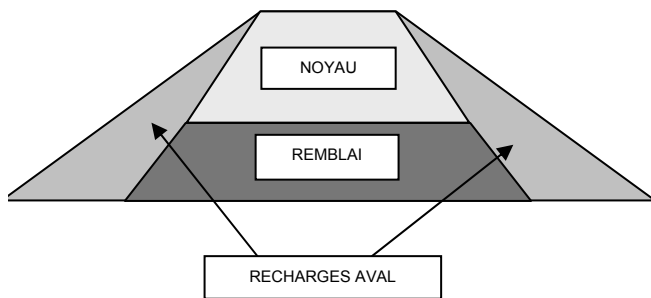


Figure 1. Structure à noyau

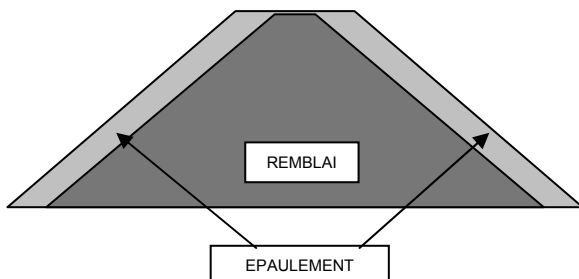


Figure 2. Encagement du remblai

Le zonage ne se justifie que pour les remblais dont la hauteur sous l'emprise des chaussées dépasse 10 m. Cette règle est à compléter :

- le zonage ne dispense pas d'appliquer les prescriptions du GTR (1992), il les complète ;
- le zonage n'a de sens pratique que si la longueur de remblai concernée par le critère $H > 10$ m est suffisamment longue.

5.3.2 Principe des dimensionnements

Il n'existe pas de modèle numérique permettant de calculer précisément les structures proposées. Il faut donc raisonner sur des critères empiriques de bon sens résultant du modèle de « Barcelone ».

Pour les noyaux : leur hauteur doit être telle que les contraintes verticales qu'ils exercent empêchent le gonflement des remblais sous-jacents. Elle est déterminée par les essais de gonflement sur échantillons.

Pour les carapaces : il est difficile de raisonner de façon simple car l'anisotropie des contraintes est maximale dans la zone des talus et joue un rôle important dans le comportement du sol lors de l'imbibition.

La carapace doit avoir une largeur minimale permettant sa réalisation par les engins de terrassement, soit 3 m. D'autre part, cette largeur doit être telle que les mouvements différés ne développent pas de fissuration sous l'emprise des chaussées proprement dites. Les mesures effectuées sur des remblais instrumentés laissent penser que la zone de déformations significatives au talus a une épaisseur verticale de l'ordre de 3 à 4 m.

La comparaison entre les deux méthodes montre qu'à volume de matériau comparable, le traitement par noyau est préférable.

5.3.3 Risques non couverts

La solution « noyau » ne met pas à l'abri des événements suivants :

- effondrements. Pour limiter les effondrements en profondeur, il est conseillé de se rapprocher au maximum des conditions de teneur en eau les plus humides compatibles avec les conditions de chantier ;
- distorsions des parements de talus. Le parement des talus est soumis au risque de reptation par distorsion. Ce phénomène est sans conséquence si la zone traitée déborde de l'emprise de la chaussée et est bien pentée à 2V/1H comme suggéré plus haut.

La solution « carapace » n'exclut pas l'imbibition de la zone active. Les risques les plus significatifs concernent alors le gonflement et, éventuellement, le fluage après saturation. Là encore, il est conseillé de compacter la partie haute du remblai du côté humide et de ne pas chercher à surcompacter.

6 CONCLUSIONS

Il a été montré que la saturation d'un remblai induisait des déformations complexes qui dépendent des conditions de mise en œuvre (nature des matériaux, teneurs en eau et densités, énergie de compactage) et de la position au sein du remblai. Après avoir analysé les principaux mécanismes, déformation sous l'effet des variations de succion et par évolution de la granulométrie, il est proposé différentes méthodes de réalisation de hauts remblais, qui ont été mises en œuvre sur des ouvrages réels. Les techniques présentées s'appliquent à des climats tempérés.

RÉFÉRENCES

- Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A. 1990. A constitutive model for partially saturated soils - *Geotechnique* 40, n°3.
- Alonso, E.E., Gens A. and Hight D.W. 1987. Special Problem Soils. *General Report*, Proc. 9th ECSMFE, Dublin.
- Alonso, E.E. 1993. Effet des variations de teneur en eau dans les sols compactés - *Revue Française de Géotechnique* n°62.
- Auriol J.-C. et al., 2000. Résultats d'enquête sur la pathologie des remblais en service, *Routes/Roads*, 306.
- Brady, KC 1988. Soil suction and the critical state - *Geotechnique* - XXXV/III n°1 - mars 1988.
- Delage, P. 1989. Effondrement d'un matériau de remblai compacté trop sec - Symposium sur l'eau et le sol dans les infrastructures routières - *Torremolinos* novembre 1989.
- Delage P., Vicol T. and Suraj de Silva GPR 1992. Suction controlled testing of non-saturated soils with an osmotic consolidometer - 7th *Conference on Expansive soils*, Dallas.
- Delage P. 1994. Influence de la succion sur la compressibilité d'un limon non saturé - *XIII ICSMFE*, New Delhi.
- GTR 1992. *Guide Technique pour la réalisation des remblais en couche de forme*. SETRA-LCPC, Paris.
- Poulain D., Alonso E., Girard H. et Morlier P. 1995. Développement des pressions interstitielles de construction dans les barrages en matériaux argileux humides - *Revue Française de Géotechnique* n° 72.