

# REMBLAIS EN MATERIAUX DEGRADABLES PLUS OU MOINS FRAGMENTABLES

Y. GUERPILLON & M. VIROLLET  
SCETAUROUTE, SEYSSINS, ISERE (38), FRANCE  
[y.guerpillon@scetauroute.fr](mailto:y.guerpillon@scetauroute.fr)

## RESUME

Après avoir analysé les principales déformations pouvant survenir sur des matériaux sensibles à l'eau et éventuellement dégradables mis en remblai, nous avons abordé successivement les mécanismes qui les génèrent et certaines dispositions constructives permettant de diminuer les effets néfastes.

La saturation des remblais réalisés en matériaux sensibles voire dégradables, après leur réalisation, est sans nul doute, à l'origine des désordres observés.

Les principaux mécanismes sont alors développés, avec les différentes manifestations qu'ils peuvent engendrer en fonction des paramètres d'état : densité, teneur en eau de mise en œuvre.

A partir de cette réflexion, des méthodes de réalisation déjà mises en application sur des ouvrages autoroutiers importants,  $H > 25$  m, sont proposées.

Il est clair que cette analyse ne concerne que les matériaux pour lesquels le GTR (Guide pour les Terrassements Routiers) mentionne la nécessité d'études spécifiques pour des matériaux particuliers à partir de hauteurs définies de remblais ; ce sont d'ailleurs ces derniers qui ont été traités dans le document présenté.

**MOTS CLES : REMBLAI, GONFLEMENT, EFFONDREMENT, SATURATION.**

## I 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 pour les matériaux jugés jusqu'à présent impropres au réemploi. De ce fait, les constructeurs rencontrent de plus en plus fréquemment des situations qui se situent en marge, voire qui échappent au domaine de prescription du GTR.

De plus, 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, conditions qui peuvent être préjudiciables au comportement de l'ouvrage en service.

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

Un tel phénomène peut induire des risques à l'égard de la stabilité des ouvrages en service.

## II RISQUES INDUITS PAR L'EMPLOI DE MATERIAUX SENSIBLES

### II.1 Phénomènes constatés

Les phénomènes constatés, notamment sur l'autoroute A 62, où les remblais sont constitués de sols marneux, fortement surconsolidés en place, sont de plusieurs types :

- Fissuration longitudinale des chaussées, généralement au voisinage du contact BAU – chaussée, mais qui peut affecter pour les remblais de très grandes hauteurs, toute la largeur de la plateforme. C'est l'aspect le plus visible des désordres.
- Affaissements au contact des ouvrages hydrauliques.
- Déformation des talus, pouvant démanteler les dispositifs d'assainissement (descentes d'eau).
- Glissement des talus ; c'est la phase finale des déformations, qui constituent un réel danger pour la circulation, si la surface de glissement débouche sur la plateforme.
- Modification des dévers suffisamment significative pour induire un risque d'aquaplaning en période humide.
- Perte de portance de la chaussée par suite d'une diminution du module des remblais.

### II.2 Sols concernés

Deux types de matériaux sont essentiellement concernés par cet article :

1. Les sols fins du type A3 ou A4 ; 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 : leur évolution conduit à un changement de granulométrie, donc de volume global.

Nous excluons de cet article les matériaux présentant des comportements particuliers (Terres noires ou schistes carton du Jurassique, par exemple) qui contiennent des pyrites ; leur oxydation par la mise à l'air en présence d'un modeste pourcentage d'humidité les transforme en sulfates et produit une dislocation de la structure, accompagnée d'un gonflement

### II.3 Mécanisme de génération des désordres

Pour les matériaux, dont nous avons spécifié la nature, les déformations en service proviennent schématiquement 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. Evolution 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, PST.

Lorsqu'ils sont détériorés, les ouvrages d'assainissement peuvent alimenter en quantité significative ; c'est le cas, notamment, du drain central, lorsqu'il est bouché par la végétation du TPC.

Les premières migrations d'eau, à la mise en service, se font généralement dans le sens de l'imbibition, surtout si les matériaux ont été compactés du côté sec. Le fait que l'eau percole de l'extérieur vers l'intérieur du remblai et qu'elle imbibe des matériaux éventuellement hétérogènes, par leur nature ou par leur état de compacité, induit des déformations différentiels.

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

- Gonflement en zone peu chargée – en tête –
- Effondrement éventuel des zones fortement chargées – à la base –
- Distorsions de cisaillement au voisinage des talus. La chute de résistance au cisaillement associée à l'imbibition est propice au développement des ruptures sur les talus.

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

## **III CONSEQUENCES DES PROPRIETES DES SOLS NON SATURES SENSIBLES A 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 de l'état de contraintes, qui est fonction de la position considérée dans le remblai (partie centrale ou proximité des talus).

### III.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 sur-compactage n'est pas forcément une garantie de meilleur comportement. Un sol surcompacté, peut gonfler sensiblement plus que le même sol compacté à une énergie correspondant à sa charge de service.

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

- 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.
- Pour un matériau compacté du côté sec, les phénomènes sont nettement plus marqués :
  - ◆ Au voisinage de l'axe du remblai, c'est à dire là où l'état de contraintes est « modérément anisotrope », on peut observer que :
    - En partie supérieure, la charge appliquée est faible, ce qui équivaut généralement à un surcompactage fort. L'imbibition pour effet de faire gonfler le matériau ; une grande partie de ce gonflement est réversible.
    - 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, il y a 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 de remblais de grande hauteur en matériaux très humides ;
      - \* Si la teneur en eau est proche de celle de l'optimum de compacité sous charge de service, le remblaiement ne produit pas de surpressions interstitielles et l'imbibition ultérieure produit un léger gonflement.
      - \* Si la teneur en eau est sensiblement plus faible que celle de l'optimum de compacité, l'imbibition ultérieure produit un effondrement irréversible.
  - ◆ Dans les zones de talus, c'est à dire là où l'état de contrainte est « fortement anisotrope », l'imbibition se traduit par l'apparition de distorsions génératrices de mouvements intempestifs qui sont, semble-t-il, 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 lorsque ces derniers sont naturellement secs et au souci de rendement, directement lié à la traficabilité, rendement qui baisse dès qu'apparaissent les surpressions interstitielles de compactage qui produisent le matelassage. Le GTR est d'ailleurs clair à ce propos, lorsqu'il stipule que l'état d'humidité moyenne ( $m$ ), en général compris entre  $0,9 w_{OPN}$  et  $1,1 w_{OPN}$ , est « l'état d'humidité optimum (minimum de contraintes pour la mise en œuvre) ».

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.

### III.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 les 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  $n$  (ou l'indice des vides  $e$ ), caractérisant les espaces entre blocs, est supposée invariable tant que les vides francs ne sont pas remplis, ce qui revient à admettre que le volume des vides varie mais que leur forme est peu modifiée par l'altération ;
- Le poids total du matériau est conservé ;
- Le poids volumique de la matrice est supposé constant ce qui revient à supposer que la nature de la matrice est insensible aux effets du temps ; 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 (modèle de Barcelone) ;

Soit les paramètres d'état définis ci-dessous :

	Blocs rocheux (indice $r$ )	Matrice (indice $m$ )	Vides francs (indice $v$ )	Ensemble
Poids volumique	$\gamma_r$	$\gamma_m$	0	$\gamma$
Poids	$(1-x)P$	$x P$	0	$P$
Volume	$V_r$	$V_m$	$V_v$	$V$
Volume relatif		$n_m$	$n_v$	

Les poids volumiques  $\gamma$  intègrent l'eau contenue dans chaque phase constitutive (blocs et matrice) et les vides francs sont supposés secs, ce qui simplifie les équations sans limiter la portée du modèle.

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

$$n_m = V_m / V$$

$$n_v = V_v / V$$

La porosité désigne le volume relatif des espaces entre blocs :

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

A 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 espaces entre blocs  
des vides francs existent
- $n_m = n_c$                         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 addimensionnels suivants :

$$\rho = \frac{\gamma}{\gamma_m}$$

$$\rho_\gamma = \frac{\gamma_r}{\gamma_m}$$

Tout calcul réalisé on obtient :

$$\text{➤ } 0 \leq n_m \leq n_c$$

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

$$\text{➤ } n_m = n_c$$

$$x_c = \frac{\rho_r - 1}{\rho_r - 1} \quad \text{et} \quad \rho_c = n_c + \rho_c (1 - n_c)$$

$$\triangleright n_c \leq n_m$$

$$\rho = \frac{\rho_r}{xc(\rho_r - 1) + 1}$$

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 francs, les blocs sont écartés par la matrice et il y a gonflement ; cette phase est cependant contrariée par le confinement de la matrice et présente, a priori, moins de risque d'occurrence que la précédente ;

Il est à noter, par ailleurs que la variation de volume est fortement sensible :

- A la compacité initiale des blocs,
- A 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 s'exprime par :

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

En pratique, ce modèle confirme clairement qu'il y a 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 lors de la mise en œuvre.

#### **IV CONDUITE DE LA QUALIFICATION DES SOLS A REEMPLOYER**

Les études visent à déterminer les quantités disponibles et les propriétés des matériaux appartenant à chaque catégorie typique donnée. Au regard des sols sensibles à l'eau, le GTR retient comme paramètres de qualification :

- \* Les paramètres de nature : granularité (déterminée par granulométrie, sédimentométrie), argilosité (déterminée par mesure de  $I_p$  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 pour mieux cerner les dispositions à prendre au regard du choix et des conditions de mise en œuvre des matériaux, afin de limiter autant que faire se peut l'incidence des variations différées de teneur en eau.

Lorsque l'on craint d'être en présence de sols susceptibles de présenter de fortes variations de volume sous l'effet d'une variation de teneur en eau, il y a lieu d'ajouter aux essais classiquement prévus, les mesures et essais suivants :

- Mesure du gonflement lors de l'immersion entre phases d'essais IPI et CBR ; les résultats sont à analyser à la lumière des propriétés décrites plus haut : plus l'échantillon est saturé, moins il doit subir de gonflement.
- Essais de gonflement à l'œdomètre, selon la norme XP P 94-091, ou selon le mode opératoire mis au point par le LRPC de Toulouse. Ces essais sont pour l'instant les seuls applicables en pratique dans le cadre d'un projet, qui donnent une idée du comportement du sol sous imbibition différée.

Ces essais sont à pratiquer aussi sur les sols traités pour les matériaux qui seront à améliorer.

## **V 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.

### **V.1 Profils en travers**

La stabilité constatée sur des remblais anciens de relativement faible hauteur, dont les talus sont à 2V/3H, ne doit pas servir de prétexte pour étendre le concept géométrique aux remblais de grande hauteur. De tels remblais tiennent généralement grâce à la capillarité. Les matériaux utilisés ont généralement un angle de frottement de l'ordre de 30°, 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. C'est cette pente qu'il faut rechercher dans les projets neufs.

### **V.2 Disposition de contrôle des migrations d'eau**

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

- de 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 ; on prévoira systématiquement un dispositif drainant transversal au contact déblai-remblai. La *figure 6* présente un exemple de disposition tel que proposé pour l'autoroute A20.
- Collecter toutes les eaux superficielles.
- Apporter un soin particulier à la conception des assainissements pour éviter tout risque de dislocation en service : on multipliera les joints souples chaque fois que nécessaire.
- 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. On prendra garde de caler la côte du toit de ce matelas suffisamment au dessus du niveau des plus hautes eaux, de sorte qu'il ne serve pas de zone d'alimentation du remblai en période de crue.

### V.3 Zonage

#### V.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, que l'on assimile à un tronc de pyramide, dont les faces sont à une pente de  $2V/1H$ . Parmi les solutions possibles, deux sont jugées aptes à répondre à cet objectif :

a/- 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 (figure 7).

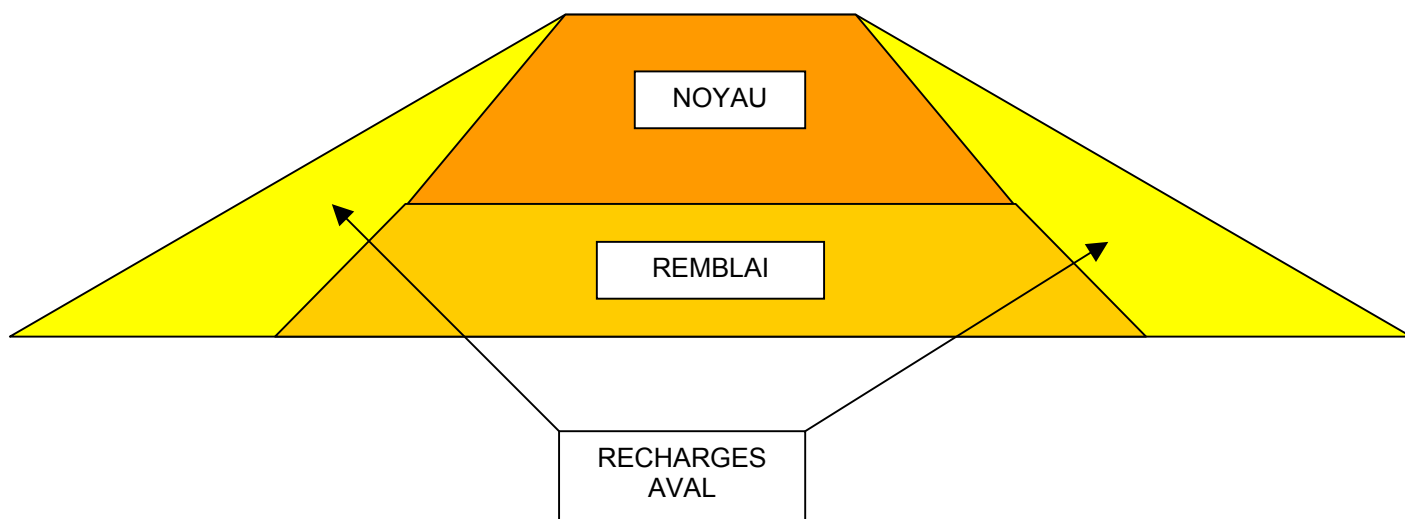


figure 7 : Structure à noyau

b/- Encagement du remblai par une carapace dont la fonction est de limiter les mouvements de distorsion des talus sous imbibition, afin d'assurer notamment la stabilité des talus à l'égard des glissements potentiels, et de confiner l'extension latérale de la zone centrale du remblai (figure 8).

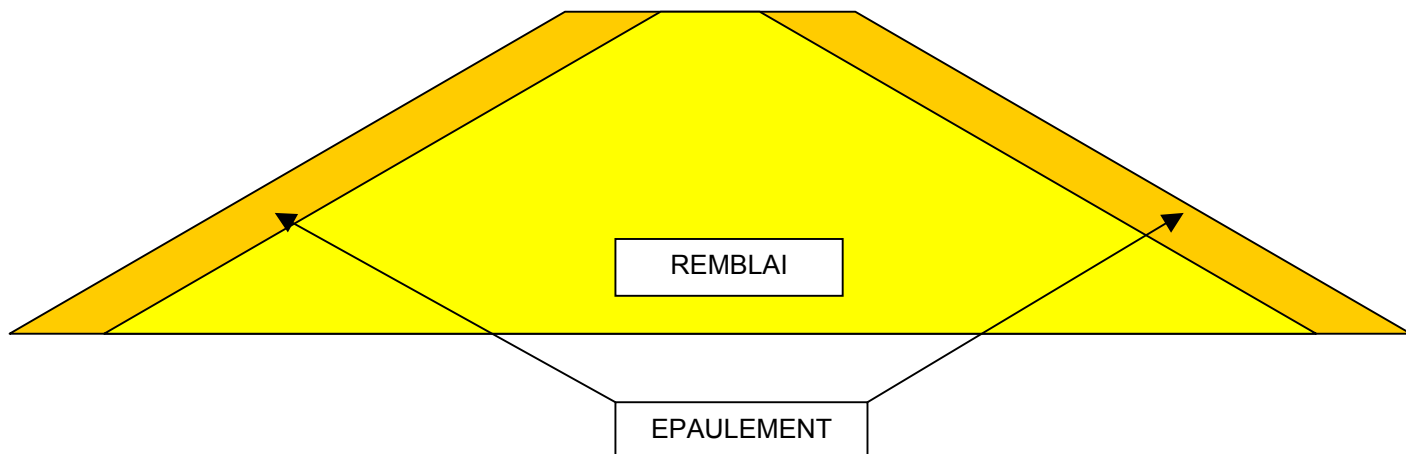


figure 8 : Encagement du remblai

Sous réserve d'informations plus précises sur le comportement des ouvrages existants, on admet actuellement que le zonage se justifie pour les remblais dont la hauteur sous l'emprise des chaussées dépasse 10 mètres, c'est à dire les remblais de grande hauteur. Cette règle schématique s'assortit de quelques précisions :

- Le zonage ne dispense pas d'appliquer les prescriptions du GTR, 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 pour que le risque de déformations y soit significatif et pour qu'une mise en oeuvre spécifique soit économiquement acceptable.
- Si la variation de hauteur de remblai est rapide entre la section de hauteur nulle et la section  $H = 10$  m, il peut être plus économique de traiter le remblai sur toute sa longueur.

### V.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 de la connaissance 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.

Les essais de gonflement sur échantillons permettent de répondre en partie à cette question.

- 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 mètres.

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 :

- à volume de matériau comparable, plus le remblai est haut, plus le traitement par noyau est efficace par rapport au traitement en carapace.
- à volume égale, le traitement en noyau est préférable, du fait qu'il concentre les matériaux traités sous la fondation de la chaussée.

### V.3.3 Risques non couverts

Selon la solution adoptée, certains risques sont peu ou non couverts.

La solution "noyau" ne met pas à l'abri de :

- Effondrement : Pour limiter les effondrements en profondeur, à l'égard desquels le traitement proposé n'a aucun effet, il est conseillé de se rapprocher au maximum des conditions de teneur en eau les plus humides compatibles avec les conditions de chantier (quantités d'eau économiquement raisonnables et traficabilité assurée) dans la tranche des 10 mètres inférieurs. Cette prescription concerne surtout les remblais de plus de 25 mètres de hauteur.

- Distorsion des parements de talus : Le parement des talus est soumis au risque de reptation par distorsion. Lorsqu'il se produit, ce phénomène a une incidence forte sur la fissuration longitudinale en tête de talus. Il est sans conséquence sur le comportement du noyau et de la chaussée si la zone traitée déborde de l'emprise de la BAU et si la zone de transition noyau-recharges n'est pas strictement verticale mais 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 ».

## **VI CONCLUSIONS**

Au cours de cet article, 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 densité (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.

Suivant les ressources en matériaux, d'autres méthodes doivent certainement pouvoir être mise en œuvre.

Nous mentionnons que les techniques présentées s'appliquent à des climats tempérés, en zone aride, d'autres considérations sont à prendre en compte.

Enfin il convient de remercier tout particulièrement, F. Blondeau (consultant), avec qui nous avons très largement coopéré, pour analyser les problèmes, développer les théories et les méthodes confortatives.