



HAL
open science

Conception et exécution des grands remblais : Synthèse du séminaire de Nantes (janvier 2001)

Bernard Bescond, Hervé Havard, Jean Pierre Magnan, Claude Mieussens

► **To cite this version:**

Bernard Bescond, Hervé Havard, Jean Pierre Magnan, Claude Mieussens. Conception et exécution des grands remblais : Synthèse du séminaire de Nantes (janvier 2001). BLPC - Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2003, 243, pp 3-18. <hal-05224240>

HAL Id: hal-05224240

<https://hal.science/hal-05224240v1>

Submitted on 26 Aug 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Conception et exécution des grands remblais

Synthèse du séminaire de Nantes (janvier 2001)

Bernard BESCOND

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées
d'Aix-en-Provence

Hervé HAVARD

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Jean-Pierre MAGNAN

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Claude MIEUSSENS

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées
de Toulouse

RÉSUMÉ

Au-delà d'une quinzaine de mètres de hauteur, les grands remblais présentent des particularités techniques qui ne sont plus totalement couvertes par les règles techniques applicables aux terrassements routiers (RTR puis GTR en France). Le séminaire organisé par le LCPC à Nantes en 2001 a inventorié les difficultés rencontrées lors de la conception et de l'exécution de ces grands ouvrages : les grands remblais sont plus qu'un empilement de couches bien compactées. Leurs déformations peuvent être importantes et évoluer au cours du temps. Ils sont le plus souvent hétérogènes, parfois constitués de matériaux évolutifs, et toujours soumis à des circulations d'eau. Ils comportent des ouvrages transversaux et longitudinaux. Les cadences de construction dépassent souvent les vitesses de contrôle des matériaux tassés et leur entretien doit être organisé avec soin. Les auteurs font le point de l'expérience acquise et suggèrent des orientations de recherche pour faire progresser la conception et l'exécution des remblais de grande hauteur.

DOMAINE : Géotechnique et risques naturels.

ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF LARGE EMBANKMENTS: SUMMARY NOTES FROM THE NANTES SEMINAR (JANUARY 2001)

Beyond a height of fifteen meters, large-scale embankments present unique technical constraints not entirely addressed in the applicable technical rules and guidelines for road-related earthwork / grading work (known in France as "RTR" and then "GTR"). The seminar organized by LCPC at Nantes in 2001 focused on inventorying the difficulties encountered during the design and construction of these major civil engineering structures: large embankments are more than a stacking sequence of heavily-compacted layers. Their deformations may prove to be sizable and changeable over time. In most instances, they are heterogeneous, sometimes composed of alterable materials and always submitted to water flows. They contain both transversal and longitudinal structural elements. The pace of embankment construction often exceeds the speed with which controls can be performed on the compacted material; moreover, maintenance programs must be carefully coordinated. The authors provide an assessment of available experience and suggest future research orientations in order to improve the design and construction of large embankments.

FIELD: *Geotechnical engineering and natural hazards.*

Introduction

La conception et l'exécution des remblais s'appuient en France sur les préconisations du Guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme » (en abrégé : le GTR) édité par le LCPC et le SETRA en 1992, cette édition constituant en fait une révision de la « Recommandation pour les terrassements routiers » (LCPC-SETRA éditeurs), elle-même publiée en 1976 et figurant en annexe du fascicule 2 du Cahier des clauses techniques générales (en cours de révision), comme référence pour les marchés de terrassement de l'État.

Le GTR propose des règles précises pour définir les sols acceptables en remblai, ainsi que les méthodes de mise en œuvre (essentiellement le compactage) à respecter pour s'assurer d'un niveau de qualité démontré comme satisfaisant par l'expérience. Toutefois, les préconisations du GTR conduisent implicitement à définir les paramètres jugés nécessaires et suffisants pour assurer la qualité du rem-

blai au niveau élémentaire (en fait, au niveau d'une couche remblayée durant un poste), mais ne donne pas d'indications sur la conception globale du remblai (interactions entre couches élémentaires, conditions aux limites, précautions vis-à-vis des actions de l'environnement, etc.) conduisant à définir les pentes de talus, les dispositifs de drainage, les précautions à prendre dans le cas de sols hétérogènes... Ces dernières indications sont généralement assez secondaires pour des remblais ne dépassant pas une hauteur moyenne, car les dimensionnements correspondants sont le plus souvent déduits de l'expérience locale des géotechniciens sans étude consistante. C'est pourquoi le GTR est considéré comme le document de référence pour des remblais n'excédant pas une quinzaine de mètres de hauteur environ.

Au-delà de quinze mètres de hauteur, on ne peut plus se contenter d'appliquer simplement le GTR. Or, pour des raisons de coût et de contraintes liées au respect de l'environnement, de grands remblais sont assez souvent réalisés pour des infrastructures routières ou ferroviaires et il a paru intéressant de réunir en séminaire les géotechniciens des LPC ainsi que d'autres partenaires externes (géotechniciens, maîtres d'œuvre et entrepreneurs expérimentés) pour débattre des problèmes posés par ces ouvrages et de l'intérêt des méthodes actuellement utilisées pour concevoir et exécuter ces grands remblais, qui peuvent dépasser quarante mètres de hauteur. Le séminaire a réuni durant deux jours 37 personnes, dont 12 externes à l'administration française. Après des exposés introductifs, quatre ateliers ont débattu des diverses préoccupations liées à la conception et à l'exécution des grands remblais.

Le présent article vise à restituer les principales tendances qui se sont dégagées du séminaire.

Particularités techniques des grands remblais

Contraintes et déformations dans un grand remblai

Dans un grand remblai, le tassement est d'autant plus important que l'énergie de compactage est faible par rapport à la charge statique des couches sus-jacentes. Cette évidence est toutefois assez mal étayée et quantifiée dans la pratique. Le tassement différé, en particulier, peut aussi être dû à des variations de teneur en eau ou à des phénomènes de fluage (déviatorique ou non).

Le chargement provoque un tassement significatif si la « surconsolidation » créée par le compactage est inférieure à la charge appliquée. On admet généralement que l'énergie du Proctor normal apporte une « surconsolidation » équivalente à une hauteur de dix mètres de remblai, soit une contrainte équivalente de 200 kPa, bien que l'évaluation de l'énergie développée par l'essai Proctor normal corresponde en fait à 500 kPa, d'après Alonso et *al.* (1990). On remarque que ce seuil de 10 à 15 mètres est précisément celui au-delà duquel on retient la qualification de « grand remblai », auquel le GTR ne peut s'appliquer directement.

Des mesures de tassement en place pendant la construction du remblai de la Jorle (site instrumenté et suivi par le LRPC de Toulouse sur l'autoroute A62, depuis 1980) confirment que le tassement « immédiat » devient relativement plus important à partir d'une charge excédant 150 à 200 kPa ; ces tassements se corrélaient assez bien avec ceux prévisibles par l'essai oedométrique. Des mesures du tassement différé (non prévisible par les essais classiques) ont montré que celui-ci est du même ordre de grandeur que le tassement immédiat dans l'axe de la voie, mais s'étend sur quatre ans. La figure 1 présente les tassements ainsi mesurés.

Cependant, les déformations se poursuivent toujours près de vingt ans plus tard en talus et en crête de talus sur le même site, avec une amplitude en crête de talus sensiblement plus importante (de l'ordre de 50 %) que celle obtenue dans l'axe et un tassement à mi-talus encore plus élevé (de l'ordre de 150 % de celui mesuré dans l'axe de la voie). Ces tassements ne traduisent pas nécessairement un état pathologique du remblai, mais ces tassements différentiels peuvent générer des fissures de flexion en bord de remblai. Ce constat doit rendre particulièrement vigilant sur le compactage des bords de remblai, dont un défaut peu prononcé constitue un facteur aggravant pour ces tassements différentiels.

Il faut aussi noter l'existence de déformations cycliques. La figure 2 donne les résultats des mesures de tassements en bord de voie pour un remblai de 12 mètres de haut, dont la construction était terminée 12 années environ avant la première mesure de référence. Outre une amplitude relativement

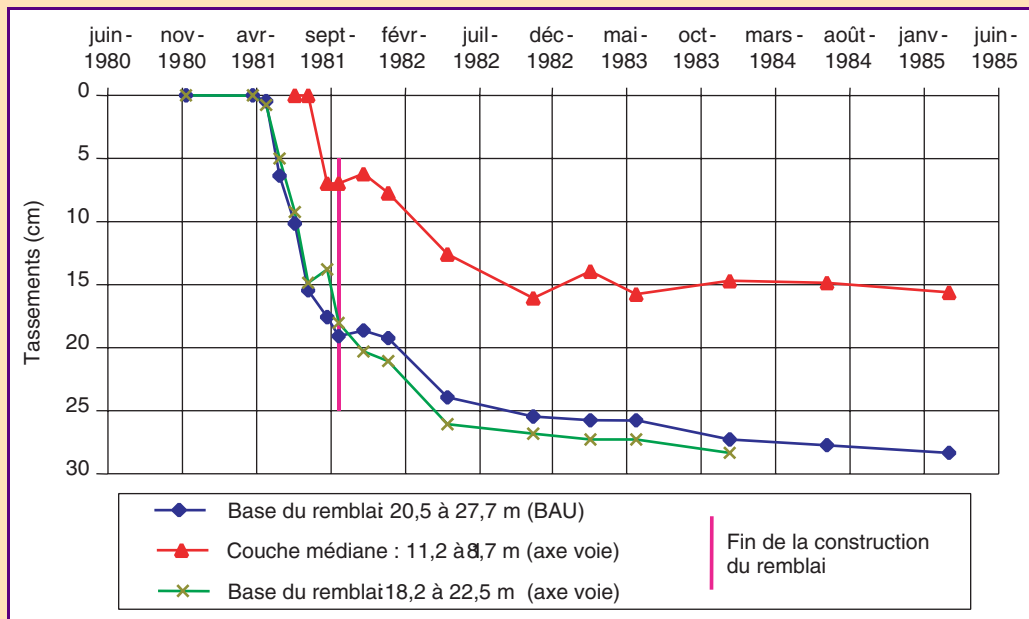


Fig. 1 - Tassements par couche, pendant et après la construction du remblai de La Jorle (Mieussens, 2001).

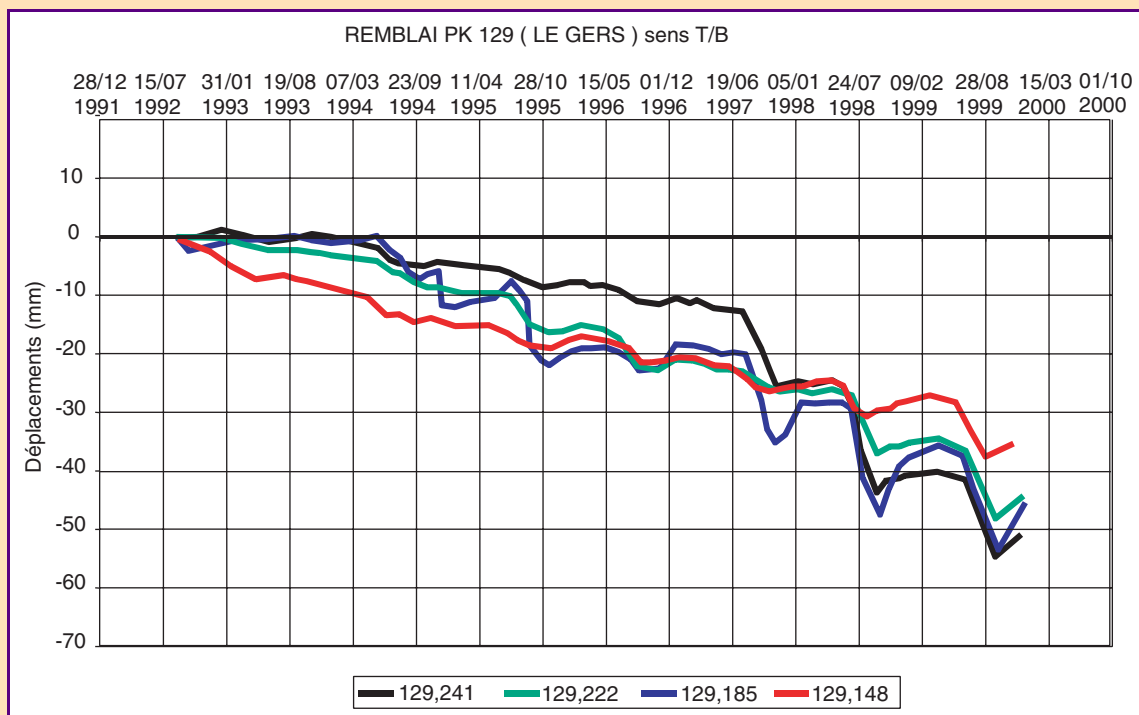


Fig. 2 - Effets des saisons sur les mesures de tassement par topographie (Mieussens, 2001).

importante, ce graphique met aussi en évidence un phénomène de déformation cyclique, assez bien en phase avec les saisons. Des mesures sur le remblai de la Jorle ont montré que l'amplitude du tassement réversible sur un cycle pouvait atteindre 30 mm à deux mètres de profondeur en talus et environ 10 mm à quatre mètres de profondeur. Sur certains sites, on a aussi pu observer des tassements relativement importants, associés à l'existence de sols très humides lors de la mise en œuvre ou devenus trop humides à la faveur de circulations d'eau mal maîtrisées dans le remblai, surtout s'il était mal compacté et donc plus perméable. Ces tassements, parfois appelés « effondrement de structure » semblent souvent minimes en début d'exploitation du remblai et sont découverts après plusieurs années, mais ils se poursuivent encore de nombreuses années plus tard.

La stabilité d'un sol compacté en remblai peut s'évaluer d'après la géométrie de l'ouvrage en connaissant les caractéristiques de résistance au cisaillement du sol. Il s'avère que l'angle de frottement ϕ' obtenu en remblai peut être nettement plus faible que celui qu'avait le même matériau avant extraction et que la cohésion du sol dépend du degré de saturation. On en déduit donc que les caractéristiques mécaniques d'un sol argileux mis en remblai peuvent parfois être médiocres, surtout si les circulations d'eau sont mal contrôlées.

Le comportement des sols non saturés

Le comportement des ouvrages en terre est particulièrement difficile à introduire dans un modèle prédictif déterministe, du fait de l'incidence du degré de saturation et donc de la teneur en eau du sol. La mécanique des sols raisonne habituellement sur le sol saturé mais cette simplification n'est pas pertinente pour les ouvrages en terre, car elle ne peut rendre compte des tassements observés ni de l'effet du compactage, et elle conduit de toute façon à des surdimensionnements (pentes de talus) inacceptables.

Alonso et *al.* (1990) ont proposé un modèle (dit de Barcelone) explicatif du comportement des sols non saturés. Ce modèle définit une courbe gauche propre à chaque sol dans un système de coordonnées orthogonales tridimensionnel (v , p , s) où v est le volume unitaire du sol, paramétrant en particulier l'indice des vides du sol (et donc le degré de compactage), p est la contrainte moyenne nette par rapport à la pression de l'air occlus et s la succion de l'eau interstitielle dans l'échantillon non saturé. La succion est reliée à la teneur en eau par une courbe qui présente une hystérésis, mais qui est négligée dans ce modèle. Un point de la courbe gauche propre au sol représente ainsi un état d'équilibre du sol. Ce modèle assez complexe permet de comprendre le changement d'équilibre du sol lorsque l'on modifie l'un des paramètres, par exemple le degré de compactage ou la succion. On retrouve ainsi par exemple les courbes Proctor. On peut aussi montrer, grâce à ce modèle, qu'un sol compacté trop sec et fortement chargé en service s'effondre sous imbibition différée, et qu'il s'effondre d'autant plus nettement que le sol compacté était plus sec (c'est l'« effondrement de structure » évoqué au § « Contraintes et déformations dans un grand remblai »). On peut de même observer des risques de tassement sensibles sur des sols insuffisamment densifiés lorsque la succion diminue (donc lorsque la teneur en eau augmente) à charge appliquée égale.

Ce modèle de Barcelone a été perfectionné depuis pour améliorer sa représentativité en y introduisant les caractéristiques thermiques du site (température, tension de vapeur, etc.) et en développant un logiciel informatique pour cette modélisation (Alonso, 1998). L'intérêt de ce modèle est évidemment de mieux comprendre les phénomènes de déformation des remblais. Il semble cependant d'une mise en œuvre difficile compte tenu de la multitude des paramètres à y introduire de la difficulté qu'il y a à les mesurer, ainsi que de leur forte variabilité sur un même chantier et au cours du temps. On peut cependant en retenir au moins de grands enseignements et, en particulier, que 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 sur la courbe Proctor.

La faisabilité des grands remblais

Quelques réflexions préliminaires semblent nécessaires avant de décider de franchir une vallée par un grand remblai. Le tracé soumis à l'avis de la population lors de l'instruction du projet n'est pas le même si l'on franchit la vallée par un viaduc ou par un remblai. En général, si l'on veut franchir une vallée par un remblai, on va ajuster le profil en long de telle sorte que l'on trouve dans les déblais encadrant la vallée les ressources nécessaires pour constituer le remblai, en évitant au maximum le recours à l'emprunt ou des distances de transport prohibitives entre déblais et remblai. Si l'on retient l'option du viaduc, on évitera par contre de créer des déblais dont on n'a pas l'usage et, en général, le profil en long sera nettement plus haut. Il en résulte qu'il n'est généralement plus possible, après concertation et déclaration d'utilité publique (DUP), de transformer un viaduc en remblai ou vice-versa, sauf si les deux éventualités ont été soumises à concertation. La solution « grand remblai » ressort généralement en France comme la plus avantageuse, mais il faut naturellement s'assurer au préalable que ce remblai est réalisable dans des conditions techniques et économiques acceptables. Même si ce séminaire a conduit à se poser beaucoup de questions sur la qualité des ouvrages en terre, une enquête récente (Auriol et *al.*, 2000) montre qu'il y a finalement peu de pathologie sur les grands remblais et que ceux-ci ne semblent guère plus vulnérables que les autres remblais. La tendance

semble être cependant de considérer la solution viaduc comme plus sûre. En ce sens, il faut reconnaître que les conséquences des pathologies sur les grands remblais ne sont pas les mêmes que sur les remblais moyens ou petits. D'un autre côté, les travaux de construction d'un remblai pour franchir une vallée sont effectués plus rapidement que pour un viaduc.

Le choix entre viaduc ou remblai doit aussi tenir compte de la ressource disponible pour l'édification du remblai. Même si de grands remblais ont déjà été construits sans désordre ultérieur avec des matériaux peu sûrs, comme les marnes rocheuses, les connaissances dont on dispose actuellement ne permettent pas d'écarter tous les risques de désordre ultérieur, mais seulement de prendre un maximum de précautions, parfois coûteuses, pour prévenir des situations jugées à risque. En simplifiant, des déblais dans une roche saine permettront de constituer un remblai de grande hauteur aussi sûr que n'importe quel remblai, alors que des déblais dans des argiles plastiques hétérogènes sont *a priori* peu favorables, voire incompatibles avec l'exécution d'un grand remblai de qualité.

Un autre élément de choix déterminant est la nature du sol constituant le fond de vallée. S'il s'agit d'un sol compressible, les coûts et les délais d'exécution risquent d'être fortement affectés. On peut considérer que les connaissances développées par la mécanique des sols sur ce type de problème permettent d'éclairer de façon sûre le choix à effectuer au niveau de la faisabilité. La conception et l'exécution de remblais sur pente méritent cependant une attention particulière et constituent de toutes façons une difficulté technique à ne pas sous-estimer, surtout si cette pente est peu stable.

La conception des grands remblais

Nous n'évoquerons ci-après que certains points, plutôt spécifiques des grands remblais.

Les sols utilisables et la stabilité du corps de remblai

Le GTR ne fournit pas de réponse à ce sujet, même s'il fournit des éléments. Les sols rencontrés dans les déblais du chantier peuvent être réutilisés s'ils sont peu argileux, si les éléments qui les constituent sont suffisamment résistants à l'écrasement et si leurs caractéristiques mécaniques n'évoluent pas après la mise en œuvre (par exemple, le rocher sain). Cependant, il n'est pas possible de déplacer les sols utilisés en remblai sur de grandes distances et il faut donc s'accommoder des matériaux disponibles. Cela doit inciter les projeteurs à adapter très tôt le tracé, pour éviter d'avoir ensuite à prendre des risques excessifs sur la qualité des matériaux employés.

Pour s'accommoder des matériaux hétérogènes effectivement disponibles (ce qui est le cas le plus fréquent), il est acquis aujourd'hui qu'il faut en optimiser et en maîtriser l'emploi par une affectation choisie par zone dans le remblai (fig. 3). Un remblai dont on n'a pas maîtrisé l'hétérogénéité est, en effet, potentiellement à risque (§ « Prise en compte du support du remblai »). Ce « zonage » consiste à affecter les matériaux disponibles dans les différentes parties du remblai (les talus, le noyau, la base et la PST ou « partie supérieure des terrassements », soit le dernier mètre environ sous le fond de la couche de forme...), de telle sorte que cette zone ait ensuite les qualités nécessaires pour s'accommoder des sollicitations qu'elle reçoit, ainsi que des circulations d'eau prévisibles dans le remblai. Pour que le sol disponible soit compatible avec son affectation dans une partie de remblai donnée, on a très fréquemment recours à un traitement par des liants.

Toutefois, si cette approche dite par « zonage » est reconnue comme nécessaire et rationnelle, il faut bien reconnaître que les justifications techniques avancées pour prendre des décisions sont souvent un peu faibles. Beaucoup de dispositions ont été testées pour faire face aux contraintes des projets et très peu d'échecs ont été constatés, ce qui tendrait plutôt à prouver que les dimensionnements pèchent sans doute par excès.

Il est aussi reconnu que les études géotechniques préalables des grands remblais sont insuffisantes et le plus souvent trop peu représentatives des difficultés effectivement rencontrées. Mais l'augmentation des moyens et des délais consacrés à ces études n'est pas toujours suffisante. La conception par « zonage » du remblai nécessite en effet une bonne connaissance des déblais pour assurer la pertinence du cahier des charges. En site hétérogène, cet objectif ne peut pas toujours être atteint et, s'il reste toujours nécessaire de piloter l'étude géotechnique en fonction des objectifs du projet, il faut également tenir compte des difficultés prévisibles de conduite du chantier.

Il est admis que les matériaux à squelette rocheux non évolutifs ne posent pas de problèmes (pour les calcaires, il convient toutefois de s'assurer de la résistance du squelette calcaire à l'effet d'une



Fig. 3 - Grand remblai édifié avec zonage des matériaux (Photo Guintoli).

éventuelle fraction argileuse gonflante) mais il n'en est pas de même des roches diagénétiques profondes. Ainsi, certaines marnes du Trias, fortement consolidées en profondeur avec un indice des vides très faible en place, sont nécessairement à l'état sec une fois extraites et remaniées, car leur densité avant extraction est très supérieure à la densité de l'Optimum Proctor. Après extraction, elles deviennent très sensibles aux arrivées d'eau, qui peuvent conduire à une chute brutale de leur résistance initiale.

Rappelons (§ « Le comportement des sols non saturés ») que les sols secs insuffisamment compactés (ce qui est assez fréquent car, plus le sol est sec, moins il est compactable, hormis le cas, exceptionnel en France, où il a une teneur en eau voisine de zéro) peuvent être à l'origine de désordres importants. L'humidification des sols trop secs sur chantier est difficile : d'une part, une humidification brutale fait perdre la portance du sol et le rend non traficable (l'ajout par arrosage d'un point de teneur en eau à une couche de sol superficielle de 30 cm d'épaisseur équivaut à une pluie voisine de 6 mm d'eau, ce qui correspond au seuil retenu par la Recommandation « Météorologie et terrassements » (SETRA-LCPC, 1986) pour prévoir l'arrêt d'un chantier pour intempérie en période estivale, sachant qu'en plus le déversement d'eau est ici instantané et qu'il n'y a pas de perte d'eau par ruissellement et évaporation) ; d'autre part, la ressource en eau pour arroser le chantier est le plus souvent contingentée, voire inaccessible à l'époque où l'on voudrait pouvoir en disposer. On notera qu'une argile très surconsolidée et saturée en place aura paradoxalement le comportement d'un sol sec, après extraction et fracturation.

Les matériaux qui sont dans un état humide posent moins de problèmes pour la pérennité de l'ouvrage, mais leurs conditions de mise en œuvre (traficabilité et compactage) rendent le chantier plus difficile. Ces problèmes peuvent être dans une certaine mesure plus facilement maîtrisés par la réduction de la pente de talus ou par un traitement adapté.

L'intérêt d'essais de fragmentabilité et de dégradabilité pour caractériser les sols susceptibles d'évoluer après mise en œuvre n'est pas mis en doute. Par contre, les essais actuels sont jugés critiquables (spécialement du fait que le nombre de cycles d'immersion-séchage retenu par le mode opératoire de la dégradabilité est borné et traduit incomplètement la sensibilité de certains matériaux, qui se manifeste au-delà de ce nombre de cycles). Ils mériteraient d'être approfondis et améliorés.

La prévision du comportement mécanique des sols au cours du temps est mal assurée par les essais d'identification du type de ceux préconisés par le GTR, quand ces matériaux sont plus ou moins argileux et *a fortiori* lorsqu'ils sont extraits en blocs au déblai (cas des argilites, des marnes rocheuses, etc.). Il est souvent intéressant de réaliser des essais triaxiaux (Mieussens, 1993), des essais œdométriques et des essais de perméabilité sur ces matériaux pour mieux cerner leur comportement dans le temps, lorsque les sols disponibles s'y prêtent (Serratrice, 1995a,b). Pour certains matériaux délicats (argiles plastiques, surconsolidées ou indurées, etc.), il est nécessaire d'en généraliser l'usage. Ces essais montrent, en particulier, que les pentes courantes des talus de remblai peuvent être incompatibles avec leur tenue dès qu'il y a risque de saturation.

Pour les matériaux non compatibles avec l'essai Proctor, tels que les marnes, les calcaires tendres, les craies, etc., seuls des essais en vraie grandeur permettent de définir la teneur en eau optimale de compactage.

La démarche suivante a cependant été proposée pour permettre une approche en laboratoire dans les cas favorables :

- échantillonnage du matériau destiné au corps de remblai, écrêtage de la fraction grossière de l'échantillon à 30 %. Si ce prélèvement ne permet pas de réaliser d'essai triaxial (D_{\max} supérieur à 10 à 20 % du diamètre de la cellule), c'est que l'on a trop de gros éléments et le matériau échappe à la mécanique des sols courante ;
- réalisation d'un essai de cisaillement à l'appareil triaxial sur matériau saturé ;
- choix des caractéristiques de cisaillement (avec ou sans cohésion) ;
- modélisation et calculs de stabilité : valeur du coefficient de sécurité recherché ($F > 1,5$?).

Dans la pratique, deux approches peuvent être utilisées en fonction des matériaux et de la connaissance régionale que l'on en a :

- pas d'étude spécifique lourde si les matériaux utilisés et le site ne posent pas de problèmes particuliers. Le géotechnicien opte alors pour des pentes « classiques » de 2V/3H, 1V/2H ou tout autre géométrie, sans la vérifier ;
- étude spécifique lourde, si le comportement du matériau apparaît comme incertain vis-à-vis des contraintes subies pour la hauteur projetée ou si le site présente des indices d'instabilité. Dans ce cas, la caractérisation mécanique du matériau de remblai pose souvent de sérieux problèmes de mesure et de méthodologie.

Ces études peuvent conduire à définir des spécifications de compactage assez notablement différentes de ce que préconise le GTR.

Prise en compte du support du remblai

Il convient de vérifier le comportement du sol support sous la charge qui lui sera appliquée par le remblai. Les études géotechniques préalables des sols support de remblai doivent classer les sols dans la classification LCPC-USCS pour permettre aux mécaniciens des sols de disposer de leurs références habituelles. À cette fin, l'étude géotechnique doit comporter :

- une reconnaissance des terrains incluant le substratum (recherche de couches de caractéristiques faibles),
- l'identification et la mesure des caractéristiques mécaniques des sols,
- la reconnaissance du contexte hydrogéologique,
- des calculs de stabilité intégrant des valeurs de performances réalistes (non « bloquantes » pour le chantier) à atteindre par le remblai,
- une prévision à long terme du comportement des matériaux (bien qu'il n'existe pas actuellement de référentiel opérationnel sur ce sujet).

Le décapage de la terre végétale et le dessouchage sont jugés « techniquement » inutiles sous un remblai de grande hauteur. L'absence de dessouchage doit cependant s'accompagner d'une vérification que les souches situées sous remblai ne risquent pas de repartir en végétation.

Le compactage du sol support de remblai est souhaitable mais irréaliste quand la portance du terrain naturel est trop faible (résistance de pointe au pénétromètre $q_c < 1$ MPa, voire 3 MPa) puisque, dans ce cas, aucun engin ne peut accéder au site sans interposition préalable d'une couche portante qui sera évidemment la première compactable.

La base des remblais sur pente doit être protégée contre les écoulements. Ceux-ci peuvent être très réduits par des drains interceptant les écoulements à l'amont et conduisant l'eau à travers le remblai.

La seule exigence de redans (fig. 4) comme garantie d'accrochage du remblai sur un sol support en pente assez raide (le nouveau fascicule 2 du CCTG à paraître stipule 15 % comme valeur maximale au-delà de laquelle des redans sont imposés) ne fait pas l'unanimité. Le seuil de 15 % est reconnu comme devant être modulé suivant les sols rencontrés (ce que prévoit d'ailleurs le nouveau fascicule 2 du CCTG) et l'exécution de redans n'est sans doute pas la seule disposition à prendre pour les différents cas rencontrés. Certains pensent, par exemple, que le drainage efficace de l'interface remblai-sol support est une précaution nettement plus importante que la seule exécution de redans systématique. En cas d'intercalation d'un géotextile, on devra vérifier qu'il ne constitue pas un plan de glissement privilégié si les caractéristiques de frottement de contact ne sont pas satisfaisantes. Certains points particuliers doivent faire l'objet d'investigations, comme la sismicité locale et les risques qu'elle pourrait générer, en particulier par l'effet de site (grande taille des ouvrages) et par la nature des matériaux utilisés (sols sablo-graveleux). La présence d'éventuelles cavités peut justifier des études approfondies du fait de la charge importante apportée par le remblai.



Fig. 4 - Redans au contact du sol de fondation en pente et d'un remblai (Photo ADM).

La maîtrise des circulations d'eau dans le remblai

Un article récent relatif à la pathologie des remblais (Auriol et *al.*, 2000) permet de constater que « les défauts de drainage et d'assainissement superficiel de l'emprise routière constituent la première cause des pathologies recensées » par les enquêtes menées en France et au niveau international. Dans la partie française de l'enquête, un drainage ou un assainissement superficiel défectueux était l'une des causes diagnostiquées des désordres de 33 cas de remblais sur les 54 recensés présentant des pathologies (soit environ 60 %).

Nous verrons plus loin que l'entretien du réseau de drainage de beaucoup d'ouvrages mériterait plus d'attention. Cette préoccupation doit aussi être prise en compte à la conception, en favorisant les dispositifs demandant peu d'entretien (pentes assez fortes, dimensionnement assez large, qualité des exutoires, etc.) et en facilitant l'inspection et l'entretien (privilégier les ouvrages non enterrés, assurer l'accessibilité aux regards et aux exutoires, optimiser l'espacement des regards, etc.).

Les matériaux drainants ne sont pas actuellement bien définis. Il semble que les matériaux drainants les plus sûrs soient dépourvus de fines (fraction d/D) ou en contiennent moins de 5 %. En fait, un matériau est défini comme drainant par rapport à un autre sol et il doit donc être nettement plus perméable que le sol à drainer ; d'autre part, il doit assurer un transit d'eau et, si le débit est élevé, il

faut rechercher des matériaux très perméables à fort pourcentage de vides ; enfin, si le matériau drainant contient des éléments fins (par exemple, du sable fin), il pourra développer une succion et donc conserver un stock d'eau à écoulement non gravitaire, dont il convient de vérifier les conséquences sur la fonction attendue.

Le drainage de la base des remblais par une couche drainante est certainement justifié dans les cas où les matériaux constituant la base du remblai sont sensibles à l'eau et où l'on craint des remontées d'eau par capillarité dans la base du remblai (qui est la plus chargée), en particulier quand le sol support est compressible ou que l'on s'attend à des circulations d'eau superficielles. Il semble cependant que cette pratique tende à se généraliser sans que sa justification en soit toujours évidente. Compte tenu du coût de ces couches drainantes dans les régions pauvres en granulats, l'intérêt de cette disposition mériterait sans doute d'être examiné de façon approfondie. Ainsi, on n'a que rarement une justification de la nécessité d'utiliser des matériaux insensibles à l'eau en zone inondable alors que, par exemple, les concepteurs de barrage ne traitent jamais les pieds des barrages homogènes.

La zone de transition du déblai au remblai (fig. 5) doit toujours être analysée pour prévoir les dispositions nécessaires, car c'est un point faible lié à la présence des matériaux superficiels altérés. Les préoccupations portent sur l'éventuelle présence d'eau et la portance qui en résultera, ainsi que sur la stabilité (le problème est du même type que celui des remblais sur pente). Une reconnaissance permettant de localiser d'éventuelles arrivées d'eau serait sans doute justifiée ; à défaut, on pourrait imposer au moins d'aller observer le terrain. L'objectif est de réaliser une coupure drainante dans cette zone très importante au plan technique. Le nouveau fascicule 2 du CCTG et le guide technique « Drainage des plates-formes routières » (à paraître) préconisent des dispositions particulières. Lorsque la pente du talus des terrains en place auxquels le remblai se raccorde est trop importante, il convient aussi le plus souvent de réaliser des redans dans le talus, comme dans le cas des remblais sur pente transversale (§ « Prise en compte du support du remblai »).

Les circulations d'eau à l'intérieur d'un remblai doivent être prévues et maîtrisées. La chaussée, bien que peu perméable, laisse passer des quantités d'eau de pluie non négligeables, qui ne seront plus reprises par évaporation. De l'eau s'infiltré également aux transitions déblai-remblai, par les accotements et les talus et aussi trop souvent à cause des défaillances fréquentes des systèmes de drainage et d'assainissement. L'objectif est d'éviter qu'il existe des zones de remblai où le sol puisse se saturer (§ « Particularités techniques des grands remblais ») et d'éviter ainsi des tassements du corps de remblai, d'une part, et une baisse de la cohésion et donc des coefficients de sécurité sur la stabilité géométrique de l'ouvrage, d'autre part. Un remblai en matériaux hétérogènes constitué de façon anarchique comporte des poches de matériaux plus perméables que les sols qui les entourent. Ces matériaux plus perméables (une différence de perméabilité d'une puissance de 10 suffit à expliquer ces phénomènes) constituent un « drain » pour le matériau encaissant et vont donc se saturer puis laisser partir progressivement leur eau vers le matériau encaissant, lorsque celui-ci veut s'assécher. Les poches ainsi constituées étant distribuées de façon anarchique, il est

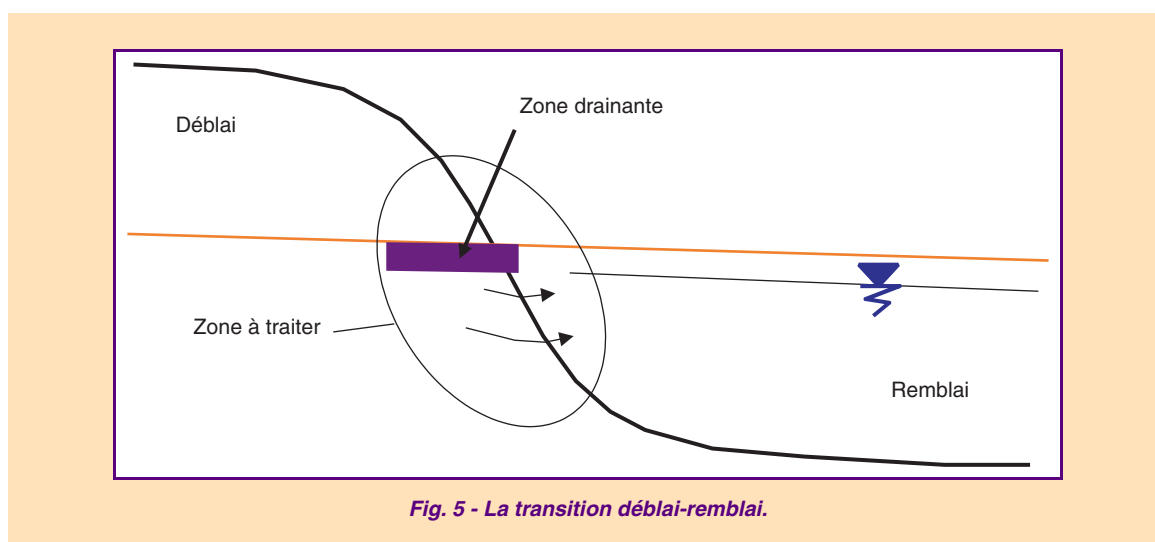


Fig. 5 - La transition déblai-remblai.

impossible d'aller les rechercher de façon rationnelle après la fin des travaux par des systèmes drainants (par exemple, à l'aide de drains subhorizontaux). De ce fait, on ne sait plus très bien remettre en état de tels remblais. La conception du corps de remblai, et en particulier du « zonage » évoqué au § « Les sols utilisables et la stabilité du corps de remblai », doit prévoir une émergence latérale (au niveau des talus ou de systèmes drainants) des matériaux plus perméables et des interfaces entre matériau plus perméable et matériau moins perméable, afin d'éviter toute accumulation d'eau. Le débouché en talus de telles arrivées d'eau peut provoquer des désordres dans le talus, mais ceux-ci peuvent être maîtrisés en adoucissant la pente ou en mettant en œuvre des dispositifs drainants tels qu'éperons ou masques.

Prise en compte de l'environnement du remblai

Les ouvrages transversaux dans le remblai (fig. 6)

L'implantation systématique des ouvrages transversaux en fond de vallon conduit à des ouvrages longs, généralement soumis à des surcharges importantes (hauteur maximale de remblai). Dans les thalwegs suffisamment secs, le rétablissement peut être recherché en s'adaptant à la topographie (accrochage latéral sur les versants). Pour assurer un calage d'ouvrage de bonne qualité, on peut envisager de monter le remblai jusqu'à une hauteur suffisante au-dessus de l'ouvrage prévu, puis de le décaisser ensuite au droit de l'ouvrage.

La pose en dépression (pose des structures transversales de telle façon qu'un effet de voûte se développe au-dessus dans le remblai) ne semble pas poser de problème important : l'emploi d'un matériau déformable (Pneusol, polystyrène, etc.) pour maîtriser l'effet Marston est bien connu et de mise en œuvre bien définie. Il n'y a pas de pathologie constatée suite à l'utilisation de cette technique.

L'exécution d'ouvrages poussés pose, pour le matériau encaissant, des problèmes similaires à ceux rencontrés lors du creusement des tunnels, avec les conséquences connues en déformations et évolutions à terme des matériaux concernés.



Fig. 6 - Exemple d'ouvrages transversaux dans un grand remblai (Photo Guintoli).

Les ouvrages longitudinaux dans le remblai

Les réseaux d'assainissement des eaux de surface sont déterminés par les débits à écouler. Les considérations hydrauliques permettent de choisir entre des ouvrages de petit diamètre et des ouvrages visitables. Pour les petits ouvrages, le choix s'oriente plutôt pour des matériaux « sans entretien » et présentant peu de raccords (PVC...). L'imperméabilisation du terre-plein central est préconisée.

Les ouvrages posés sur le remblai ou accolés au remblai

Les fondations des dispositifs de signalisation verticale posent souvent problème car elles combinent proximité de la pente (talus) et appui sur un remblai (dont la qualité doit être suffisante). Depuis novembre 1999, un Guide technique sur le « dimensionnement des massifs de fondation pour les portiques, potences et hauts mâts » (SETRA, 1999), permet d'optimiser le dimensionnement par rapport aux pratiques antérieures. Il reprend les méthodes du fascicule 62-titre V du CCTG (MELT, 1993) après modification de certains coefficients de sécurité, par référence au guide relatif aux fondations des remontées mécaniques (STRMTG-CEBTP, 1993).

Les dépôts accolés aux talus du remblai nécessitent pour chaque cas une étude de stabilité spécifique. Le matériau mis en dépôt doit être compacté comme le remblai (ce qui suppose qu'il est dans un état compactable) et il convient, dans la plupart des cas, d'assurer un drainage entre le dépôt et le remblai pour éviter les échanges hydriques entre les deux, sauf s'ils sont de nature et d'état identiques.

En cas d'élargissement ultérieur des remblais, la qualité du dossier de récolement est primordiale. Pour les remblais de grande hauteur, l'élargissement de la plate-forme s'effectue souvent par construction d'un mur de soutènement (Magnan *et al.*, 1999) ; on est alors ramené à un problème de fondations. Lorsque les talus présentent des signes d'instabilités, on peut également élargir la plate-forme en réalisant une sur-largeur de remblai (rôle de banquettes) ou par raidissement du talus existant (ouvrage renforcé par géotextile, substitution partielle en talus par un matériau de caractéristiques mécaniques plus élevées) (Magnan *et al.*, 1999).

La protection superficielle des parements

L'entretien des risbermes, et en particulier leur drainage, doit être pensé dès le stade du projet, sinon elles finissent par disparaître. Le recours aux risbermes est une technique intéressante pour la stabilité globale (elles diminuent nécessairement la pente) et peut éviter l'ouverture de zones de dépôts. Elles permettent également de diminuer la longueur de ruissellement de l'eau le long du talus et contribuent ainsi à la prévention de l'érosion et des ravinements, surtout dans le cas de matériaux sableux. Une configuration adaptée des risbermes facilitera également la maintenance des talus. Par contre, la stabilité locale d'une berme est plus faible que la stabilité générale d'un talus de pente uniforme, à emprise constante. On exclura donc cette solution dans le cas de sols trop sensibles aux variations de teneur en eau.

Pour la mise en végétation des grands remblais, il est souvent difficile de trouver la terre végétale (gros volume nécessaire) et de « l'ancrer » au talus (emploi de géotextile). L'idéal consiste à végétaliser au fur et à mesure de l'avancement du chantier, pour éviter les ravinements et pour fournir des « talus verts » dès l'ouverture de l'infrastructure. Le choix des espèces dépend des sols (agronomie) et du profil en long (déblai/remblai) : il s'agit d'un travail de spécialiste.

Provisoirement, pendant la durée du chantier, la récupération des eaux météoriques peut se faire par utilisation de descentes souples (PVC, géomembrane) associées à des bourrelets de terre. Ce point, important pour tous les remblais, l'est encore plus pour les remblais de grande hauteur où un défaut de conception ou de réalisation conduit toujours à des pathologies difficiles à traiter.

Lorsque certains matériaux constituant le corps de remblai sont de « mauvaise qualité » ou trop sensibles à la météorologie, un encagement par des matériaux adaptés peut être envisagé : c'est une solution utilisée systématiquement au Maroc suite aux pathologies constatées sur des ouvrages anciens. Il s'agit de soustraire les sols sensibles à l'effet des agents atmosphériques, par un encagement de l'ordre de 1,50 m d'épaisseur.

L'exécution des travaux

Les travaux préparatoires

Bien que cela n'ait pas été évoqué lors du séminaire, l'accès à la base du futur remblai pour y apporter les premières couches du remblai pose parfois problème. La pente des pistes d'accès ne peut

excéder certains seuils propres aux types d'engins et il est parfois nécessaire de disposer de surlargeurs d'emprise ou de servitudes de passage pour l'exécution des pistes d'accès depuis les déblais. Les grands remblais étant souvent situés dans des zones à fort relief, ils sont aussi fréquemment implantés sur pente transversale assez raide, ce qui complique encore les méthodes d'accès.

Comme déjà mentionné au § « Prise en compte du support du remblai », le décapage de la terre végétale n'est généralement pas justifié, sauf si l'on veut récupérer cette terre. De même, le dessouchage n'est généralement pas nécessaire, sauf si l'on craint une reprise de la végétation arbustive sous le remblai. Le compactage du sol support de remblai, bien que souhaitable, n'est pas toujours possible si sa portance est trop faible.

La réalisation de redans pour les remblais sur pente assez accusée permet d'éviter la création d'un plan de glissement privilégié, par défaut de compactage de la zone de transition entre le matériau rapporté pour constituer le remblai et celui déjà en place. Ces redans doivent être assainis pour récupérer et évacuer l'eau qui peut s'infiltrer entre le sol en place et le sol rapporté. Plusieurs dispositions semblent adaptées pour cette collecte, mais on doit éviter les concentrations d'eau possibles sous l'ouvrage (élimination de l'eau gravitaire latéralement) ainsi que des pentes trop accusées sur les redans, susceptibles de provoquer des transits d'eau trop rapides pouvant générer de l'érosion interne. Ces redans, pour assurer leur rôle, doivent permettre le compactage simultané du remblai et du matériau en place et donc offrir une largeur suffisante (au moins 4 m) pour le passage des engins.

La mise en place de traversées ou de buses sous remblai a aussi été évoquée au § « Prise en compte de l'environnement du remblai ». On peut rappeler que la meilleure mise en œuvre semble obtenue par l'exécution préalable d'une hauteur de remblai excédant la hauteur de la traversée à poser, puis le décaissement de ce remblai au droit de l'ouvrage sur une largeur permettant l'accès d'un petit compacteur à main ou d'un compacteur automoteur suivant l'importance de l'ouvrage, puis le remblaiement autour de la traversée avec un compacteur adapté jusqu'à rattraper le niveau de la plateforme en attente. Par ailleurs, l'expérience a montré que la pose en dépression des traversées sous haut remblai, avec des matériaux permettant de maîtriser l'effet Marston, donne des résultats satisfaisants.

Le remblaiement en grande masse

La principale difficulté pour exécuter un travail de qualité est de bien gérer le mouvement des terres quand les sols disponibles sont hétérogènes. La conception aura alors prévu un « zonage » avec différentes catégories qu'il serait dangereux de ne pas respecter. À l'échelle du chantier, deux points semblent importants à prendre en compte pour pouvoir gérer le réemploi de ces déblais :

- il faut pouvoir classer rapidement et sans approximation les sols dans les catégories prédéfinies par la conception, pour permettre à l'entreprise de s'organiser et d'atteindre les cadences généralement élevées prévues à la remise des offres. Cela nécessite que l'on puisse distinguer plusieurs sols peu différents à l'œil avec des essais rapides (par exemple des teneurs en eau ou des essais au bleu de méthylène ou des mesures de granularité) ou mieux que la catégorie du sol soit discernable à l'œil nu. Cela n'est pas le cas général et, par exemple, dans le cas des argiles rouges de décalcification de plasticité variable (se classant entre A2 et A4 dans le GTR), il est parfois utopique d'espérer les séparer sur un chantier à cadence élevée ;
- les volumes minimaux de chaque catégorie de sol dans une même zone de déblai doivent être en rapport avec les matériels de chantier et les cadences atteintes (couramment de 4 à 8 000 m³/jour). Il n'est pas possible de déplacer sans arrêt l'atelier d'extraction ou la destination des déblais en fonction de l'analyse des sols. Une continuité d'au moins une demi-journée et mieux d'une journée pour un atelier d'extraction et pour la destination des matériaux extraits semble raisonnable et déjà lourde à gérer. Cela signifie qu'au-delà d'une certaine hétérogénéité, le déblai utilisé doit pouvoir être considéré comme homogène, éventuellement sous réserve de quelques dispositions réalistes telles qu'extraction en front de plusieurs mètres de hauteur, constitution d'un dépôt intermédiaire alimenté en couches et extrait en front pour assurer son homogénéisation...

Il n'y a pas unanimité pour définir la part d'initiative qu'il convient de laisser à l'entreprise dans l'exécution des grands remblais. Une tendance serait de « verrouiller » le mouvement de terres correspondant, compte tenu de la rigueur nécessaire à l'exécution de tels ouvrages et des conséquences désastreuses qu'amèneraient des désordres. La tendance opposée est de laisser le choix du mouvement des terres à l'entreprise, en s'assurant de sa conformité aux exigences de la conception. La

deuxième alternative est jugée peu crédible car c'est toujours la recherche de l'optimum économique qui l'emporte sur l'optimum technique (et sans doute d'autant plus facilement que le premier se mesure de façon beaucoup plus fiable que le second). Un compromis semblant raisonnable a été proposé, consistant à spécifier à quelle classe doivent répondre les sols utilisés dans chaque zone de remblai et à laisser à l'entreprise l'initiative de proposer le mouvement de terre le plus avantageux pour satisfaire à ces spécifications. Sans doute faut-il reconnaître aussi que chaque projet a ses spécificités et qu'il est normal de ne pas retenir une méthode unique.

Ce point serait cependant sans doute d'autant plus aisé à résoudre que la rémunération de tels remblais, avec des matériaux différents suivant les zones, serait correctement assurée. Il semble en effet souhaitable que la rémunération de ces remblais, qui conduisent parfois à des pistes de pente inhabituelle, à une maîtrise assez fine des rotations d'engins, à des difficultés inhabituelles de réglage de talus... soit propre à chaque grand remblai, voire à chaque zone de ces remblais, et en tous cas distincte de celle des remblais courants.

Des pistes provisoires sont souvent nécessaires pour l'édification des grands remblais, comme indiqué au § « Les travaux préparatoires ». L'expérience prouve que ces pistes doivent être systématiquement détruites et ôtées au fur et à mesure de leur perte d'usage. Leur incorporation dans le corps du remblai conduit très généralement à des désordres. car leur cinétique de déformation est trop différente de celle du remblai courant.

Comme déjà indiqué au § « Prise en compte de l'environnement du remblai », les matériaux mis en dépôt contre les talus du remblai doivent être compactés avec la même rigueur que le remblai lui-même et ce dépôt doit avoir fait l'objet d'une étude spécifique préalable.

On peut aussi rappeler ici que la grande hauteur de ces remblais rend particulièrement difficile les interventions ultérieures en talus et il est donc important d'engazonner un grand remblai au fur et à mesure de son édification pour faciliter l'accès du matériel d'engazonnement et pour prévenir les effets de ravinement possibles.

Les contrôles d'exécution

Hormis les contrôles géométriques et ceux relatifs aux ouvrages de drainage et d'assainissement, les méthodes de contrôle courantes actuellement sont :

- la méthode du Q/S ;
- la mesure des densités *in situ* par gammadensimètre ;
- l'emploi du pénétro-densitographe PDG 1000.

Ces contrôles sont destinés à relever les non-qualités qui concernent essentiellement la maîtrise de la nature des matériaux, leur état hydrique et les conditions de mise en œuvre (compactage, réglage) au niveau d'une couche. Il est admis que ces contrôles sont quantitativement nombreux, mais sans doute insuffisants.

Les objectifs de l'assurance qualité sont de vérifier le respect, lors de l'exécution, de l'ensemble des critères issus de l'étude de conception. Les contrôles actuels se limitent au respect de spécifications préétablies, sans laisser la possibilité d'ajustements, qui pourraient s'avérer nécessaires dans le cas d'ouvrages non courants. Dans certains cas, il est même souhaitable de caler les caractéristiques par un chantier d'essai.

D'aucuns pensent même qu'il est nécessaire d'imposer pour les grands remblais des contrôles non courants (par exemple : pressiomètre, pénétromètre), dont les objectifs de performance devraient découler de l'étude de conception.

Certaines méthodes de reconnaissance (en particulier, les méthodes géophysiques) devraient être développées pour permettre la recherche des anomalies dans le remblai, celles-ci étant ensuite testées par des essais en place susceptibles de mettre en évidence leur éventuel caractère « pathogène ».

On peut penser que l'identification des matériaux suivant la classification de la norme NF P 11-300 (GTR) n'est pas nécessairement bien adaptée pour caractériser assez finement les sols utilisés dans les grands remblais. Cependant, actuellement se pose surtout le problème de la vérification de la destination des sols identifiés, pour s'assurer que le « zonage » effectivement réalisé correspond à celui de la conception (nous avons souligné l'importance de ce point dans la qualité au § « Le remblaie-

ment en grande masse »). Si, en théorie, la méthode du Q/S prévoit une traçabilité, celle-ci est rarement rigoureuse, entre autres par défaut d'un outil informatique adapté permettant d'intégrer :

- la nature du matériau,
- sa destination,
- la position des engins,
- etc.

De même, la connaissance de l'état hydrique se fait à l'aide des essais classiques :

- teneur en eau w_n à caler suivant la nature du matériau (V_{BS} , limites d'Atterberg, w_{OPN} , etc.),
- essai au cône,
- I_{PI} ,

mais il n'est pas toujours facile d'apprécier le problème des échanges d'eau entre les blocs et la matrice du matériau de remblai.

En définitive, la qualité des contrôles repose sur leur aptitude à vérifier la conformité de l'exécution vis-à-vis de critères et de points critiques mis en évidence par les études de conception. Ces critères peuvent être variés : pression limite pressiométrique, résistance au cisaillement (c' , ϕ'), compressibilité, etc.

Le contrôle extérieur doit relever et traiter les anomalies ou les points délicats à l'aide de ces contrôles et de points critiques dont il serait souhaitable que la définition soit issue de l'étude de conception. Il est à noter que les points critiques devraient pouvoir conduire à des adaptations du projet en phase de travaux, pour tenir compte d'autres facteurs découverts en cours de chantier : délais, hétérogénéité des terrains, météo, etc.

La maintenance des grands remblais

Pour assurer correctement la maintenance, il convient que le gestionnaire de l'ouvrage ait une bonne connaissance des points de l'ouvrage jugés sensibles, qu'il dispose d'un point zéro complet pour pouvoir ensuite détecter des évolutions anormales de l'ouvrage, d'un éventuel plan de surveillance si celle-ci est jugée opportune, mais aussi que l'ouvrage soit conçu pour faciliter l'inspection et l'accès aux zones à entretenir. Le § « La maîtrise des circulations d'eau dans le remblai » propose quelques orientations pour faciliter l'entretien du réseau de drainage et de l'assainissement superficiel. Pour l'entretien des talus, il est souvent conseillé de réaliser des risbermes accessibles à des engins pour la fauche, ainsi que pour d'éventuelles petites réparations du talus de remblai ou tout simplement pour pouvoir y accéder en cas de désordre.

Le point zéro peut contenir les éléments suivants :

- ① le dossier de récolement,
- ② un relevé topométrique adapté, avec par exemple des nivelles (les repères de nivellement simples peuvent d'avérer insuffisants), des alignements de repère, des relevés GPS, des photos numériques, etc.,
- ③ une vérification du bon fonctionnement du drainage :
 - inspection des ouvrages d'assainissement et de leur exutoire,
 - prise en compte des conditions environnementales extérieures et de leur possible évolution (déboisement, création de fossés d'assainissement à proximité de l'ouvrage),
- ④ les mesures mécaniques réalisées dans le remblai : caractéristiques pressiométriques, piézométriques, mise en place de tubes inclinométriques, etc.,
- ⑤ un état zéro des teneurs en eau *in situ* : les méthodologies proposées doivent être adaptées (utilisation de méthodes de diagraphie).

Les grands remblais sont à considérer comme des ouvrages sensibles, pour lesquels il faut préconiser un point zéro systématique pour pouvoir en vérifier l'évolution, même sans pathologie apparente. Dans l'état actuel de la réglementation (MELT, 1979), au même titre que pour les chaussées et les ouvrages, le point zéro est nécessaire pour permettre la surveillance ultérieure de « ...tout ouvrage (remblai, déblai, digue, etc.) susceptible d'être affecté d'instabilités ou de glissements... ».

Un plan de surveillance assez réduit durant les premières années de l'ouvrage (une fois par an pendant 5 à 10 ans) peut porter sur les points suivants, préconisés par Scétauroute :

- les mouvements de surface,
- les déformations en profondeur (mesure par inclinométrie),

- l'évolution des teneurs en eau *in situ*,
- le fonctionnement et l'intégrité des ouvrages d'assainissement.

Ce dernier point mérite une attention toute particulière, compte tenu de la proportion importante des pathologies de remblai dues à des défauts dans les réseaux de drainage et d'assainissement. Des efforts particuliers seraient sûrement justifiés sur cet aspect de la maintenance, compte tenu des enjeux qu'il représente pour maintenir la qualité de l'ouvrage.

Lorsque des anomalies apparaissent dans l'ouvrage, un plan de surveillance renforcé et ciblé peut être décidé. Il sera souvent nécessaire également d'équiper ou de compléter l'équipement du remblai en dispositifs de suivi pour comprendre les déformations de l'ensemble du remblai et en rechercher la cause dans un premier temps, puis en surveiller l'amortissement après d'éventuelles réparations. Parmi les dispositifs de suivi, on peut citer :

- les inclinomètres verticaux,
- les tassomètres multipoints,
- les extensomètres ,
- les inclinomètres horizontaux mis en œuvre à la construction du remblai,
- les nivelles, en complément d'inclinomètres,
- etc.

Ces mesures peuvent être couplées avec des relevés GPS.

Conclusion

Bien que la hauteur des remblais ne présente pas de relation directe avec les pathologies recensées (Auriol et *al.*, 2000), la maîtrise technique de la conception et de l'exécution des grands remblais mérite d'être améliorée, ainsi que les moyens de contrôle mis en place pour s'assurer de l'obtention de la qualité. On peut cependant remarquer que 90 % environ des désordres relevés dans les remblais déficients recensés en France proviennent de « défauts de projet (drainage mal dimensionné, pente des talus inadaptée) ou d'exécution (manque de compactage, drainage déficient, mise en œuvre en conditions météorologiques inadaptées) » et devraient donc pouvoir être évités par une amélioration des compétences ou de la rigueur des pratiques en cause. Les travaux de ce séminaire ont permis de faire le point de l'expérience acquise, qui est déjà importante, et d'identifier les orientations de recherche les plus pertinentes pour faire progresser ces techniques.

Remerciements. *Les auteurs ont pour l'essentiel compilé et organisé les informations et avis formulés par les participants au séminaire, qu'ils tiennent à remercier de leur coopération.*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALONSO E.E., (1998), Suction and moisture regimes in roadway bases and subgrades. *Proceedings of International symposium on subdrainage in roadway pavements and subgrades*, Grenade (Espagne), 11-13 novembre, pp. 57-64.

ALONSO E.E., GENS A., JOSA A., (1990), A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, vol. 40, 3, pp. 405-430.

AURIOL J.-C. et *al.*, (2000), Résultats d'enquête sur la pathologie des remblais en service, *Routes/Roads*, 306, pp. 57-74.

MAGNAN J.-P., MIEUSSENS C., MORBOIS A., (1999), Utilisation d'ouvrages en sol renforcé dans des élargissements d'autoroutes, *XXI^e Congrès Mondial de la Route*, Kuala Lumpur, Section C12.1 « Techniques d'élargissement des autoroutes faisant appel à la terre renforcée », 11 pages.

MELT, (1993), Fascicule 62-Titre V Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil, Cahier des clauses techniques générales pour les marchés de travaux publics, *Bulletin Officiel du MELT*, 93-3, 182 pages.

MELTM, (2003), Fascicule 2 Terrassements généraux, *Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés de travaux publics*, Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et de la Mer.

- MIEUSSENS C., (1993), *Détermination de la sensibilité des sols aux variations de teneur en eau en laboratoire. Essais à l'œdomètre sur des sols compactés*, Projet d'essai LPC, Rapport interne du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Toulouse.
- MIEUSSENS C., (2001), *Les grands remblais*, Rapport du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Toulouse.
- Ministère des Transports, (1984), *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art d'octobre 1979*, 2^e partie, Fascicule 52 : « Déblais, remblais », Direction des Routes, 37 pages.
- NF P 11-300, (1992), *Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisés dans la construction des remblais et couches de forme d'infrastructures routières*, AFNOR, 21 pages.
- SERRATRICE J.F., (1995a), Comportement d'une argile compactée, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **200**, pp. 13-23.
- SERRATRICE J.F., (1995b), Comportement d'une craie compactée, *Congrès « Craies et schistes »*, Bruxelles, pp. 1.1.71-1.1.80.
- SETRA-LCPC, (1976), *Recommandations pour les terrassements routiers (RTR)*, Fascicules 2 (46 pages) et 3 (18 pages), (*fascicule 1*), 34 pages.
- SETRA-LCPC, (1986), *Recommandation « Météorologie et terrassements »*, 41 pages.
- SETRA-LCPC, (1992), *Guide technique, Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR)*, Fascicules 1 (98 pages) et 2 (102 pages).
- SETRA, (1999), *Guide technique, Dimensionnement des massifs de fondations pour les portiques, potences et hauts mâts*, 23 pages.
- STRMTG-CEBTP, (1993), *Guide pratique des fondations de remontées mécaniques*, 168 pages.