

UNE PISTE POUR LA PRÉSERVATION DE LA RESSOURCE EN EAU DANS LES PROJETS DE TERRASSEMENTS

E. MANIER

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 58, boulevard Lefebvre, 75732 Paris Cedex 15,
France

emmanuel.manier@lcpc.fr

V. FERBER

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, route de Bouaye, BP 4129, 44341
BOUGUENNAIS Cédex, France

valery.ferber@lcpc.fr

RÉSUMÉ

La question de la consommation d'eau dans les terrassements constitue un enjeu économique et environnemental majeur pour certains projets réalisés dans des contextes géologiques ou climatiques particuliers. La question qui se pose dans ces contextes est notamment de savoir quel risque représente l'utilisation de matériaux secs voire très secs, dont le comportement à long terme est incertain. Des résultats de chantiers et de recherches récents invitent en fait à distinguer deux problèmes : la difficulté à compacter les sols secs et le comportement à long terme, et notamment à l'humidification, de ces matériaux.

Les réponses apportées ici indiquent que, bien que nécessitant une énergie intense, le compactage des sols secs à très secs peut conduire à des taux de compactage suffisants pour éviter les risques de tassement en cas d'humidification voire d'inondation pour les sols peu à moyennement plastiques. En tenant compte de ces informations, il est possible de proposer une conception raisonnée des remblais constitués de sols secs voire très secs, tout en insistant sur la nécessité d'un contrôle accru lors de la réalisation de ces ouvrages.

1. INTRODUCTION

Dans le domaine des terrassements, les enjeux économiques portent généralement sur des sujets tels que l'extraction, les purges et substitution, la stabilisation des sols ou encore la nécessité de recourir à des matériaux d'emprunts. Pourtant dans certains cas, lorsque les matériaux disponibles dans l'emprise du projet sont dans un état sec ou très sec, il peut être nécessaire de procéder à une humidification des matériaux ce qui implique de prélever de l'eau (dans des cours d'eau ou dans des nappes) et de l'acheminer jusqu'au chantier. En période de forte sécheresse, et d'une manière plus générale, dans les pays où la ressource en eau constitue un bien précieux, il peut devenir aberrant d'un point de vue économique, environnemental ou social d'avoir recours à de tels apports d'eau. La capacité à réemployer des sols secs sans ajout d'eau devient alors un enjeu primordial.

Nous présentons dans cet article les enjeux et les limitations des recommandations actuelles quant au réemploi de sols secs et très secs, et, les résultats de travaux théoriques et expérimentaux qui permettent d'envisager de façon beaucoup plus large qu'actuellement le réemploi sans ajouts d'eau de ces matériaux en remblai. Ces résultats nous permettent de proposer une conception des remblais en sols secs qui permet d'éviter ou de limiter l'humidification des sols sans aggraver le risque de désordres ultérieurs.

2. PRATIQUE ACTUELLE

Le fait que les remblais constitués de sols fins compactés soient susceptibles de se déformer (gonflement et/ou tassement) est connu depuis longtemps. Dans l'ensemble, les désordres sont d'autant plus importants que les matériaux sont des **matériaux sensibles à l'eau**, que le **compactage est insuffisant**, que, pour les tassements, **la contrainte est forte (remblais de grande hauteur)** et que les dispositions constructives facilitent **l'imbibition** que ce soit par la surface, par les talus ou par la base des remblais (Auriol *et al.*, 2000).

Les règles de mise en œuvre des matériaux, plus ou moins développées ou codifiées selon les pays, tiennent compte de cette connaissance sur le comportement des sols fins compactés. Ainsi, en France, le GTR (SETRA-LCPC, 2000) précise ces conditions en fonction :

- de la nature des sols (granulométrie, argilosité ...) ;
- de leur état hydrique, déterminé d'après l'optimum de compactage ou l'indice portant immédiat;
- de la contrainte à laquelle sera soumis le sol : conditions sur les hauteurs de remblais autorisés - remblais de hauteur faible < 5m – remblais de hauteur moyenne < 10m .

Les conditions de compactage qui en découlent sont supposées permettre d'atteindre une compacité moyenne d'au moins 95% de l'OPN et d'au moins 92 % en « fond de couche ».

Compte tenu de l'influence présumée de l'état hydrique initial sur le comportement du sol lors d'une imbibition et, compte tenu de la grande difficulté à compacter **les sols très secs** (donc à réduire l'indice des vides initial), ceux ci **sont exclus du GTR comme des autres recommandations existantes dans les différents pays**. Pour ces matériaux (très secs, ts), le GTR recommande soit de ne pas les utiliser soit, pour certains d'entre eux, de réaliser une humidification dans la masse pour les ramener à un état s (sec) ou m (état moyen).

Une extension des spécifications du GTR aux sols arides (teneurs en eau très faibles, par exemple comprise entre 3 et 7% pour des matériaux classés A1) a été proposée par Morel *et al.* (2002). Elle reste néanmoins limitée en interdisant notamment de construire **des remblais de plus de 3m** de hauteur. Ces auteurs ont considéré qu'en l'absence d'études quantitatives spécifiques, on ne pouvait exclure en cas d'imbibition des désordres de type gonflement ou tassement et ce même avec un compactage q4 (95% OPN).

Les règles usuelles de mises en œuvre de matériaux ne prévoient donc pas la réutilisation en l'état de matériaux très secs « compactés à sec » ou seulement dans des conditions très limitées. L'obligation consécutive d'humidifier pour augmenter la teneur en eau des matériaux à un coût :

- Coût financier : dans certains contextes, le litre d'eau ajouté atteint une valeur de un euro ; s'il est nécessaire d'augmenter la teneur en eau de 4 points, par exemple, pour accepter de réutiliser le matériau, un remblai de 100000 mètres cubes conduira à consommer 8000 mètres cubes d'eau, soit 8 millions d'euros ;

- Coût environnemental : construire 250 km d'autoroute avec des sols très secs peut conduire à consommer plusieurs centaines de milliers de mètres cubes (augmenter la teneur en eau de 6 à 7% implique un volume au moins 1,5 fois supérieur compte tenu de l'évaporation) avec des conséquences sur la ressource elle-même ;
- Coût social : dans le même exemple que ci-dessus, ce volume est l'ordre de grandeur de la consommation domestique annuelle en eau d'une ville de 10 000 personnes du sud du Maroc par exemple.

3. ANALYSE TECHNIQUE ET RETOURS D'EXPERIENCES DE CHANTIERS

On rencontre ce type de matériaux, très secs, de façon régulière (et probablement de plus en plus, compte tenu de l'évolution climatique prévue) et essentiellement dans deux contextes :

- dans les pays à climat sec voire aride, la très faible humidité relative de l'air et la température élevée conduisent à ce que les sols en place soient naturellement à l'état sec. Ce cas de figure est souvent rencontré pour les sables de dunes (Cissé, 1980, Cheikh *et al.*, 1995, Ben Dhia, 1998), qui, outre leur état sec sont caractérisés par une granulométrie très homogène, ce qui les rend particulièrement difficiles à compacter;
- le second cas de figure concerne les roches évolutives du type pélites (Bernhard *et al.*, 2007) ou roches argileuses ou phylliteuses. Etant donné que ces matériaux sont très consolidés, ils contiennent peu d'eau et leur teneur en eau, une fois extraits et transformés en sol, est alors faible par rapport à la référence Proctor du sol obtenu (Figure 1). Leur état sec les rend particulièrement sensibles à l'érosion (Figure 2) et leur confère une forte succion qui est susceptible de favoriser leur humidification à long terme. De ce fait, les risques de tassements et de perte de portance sont à considérer avec la plus grande attention.

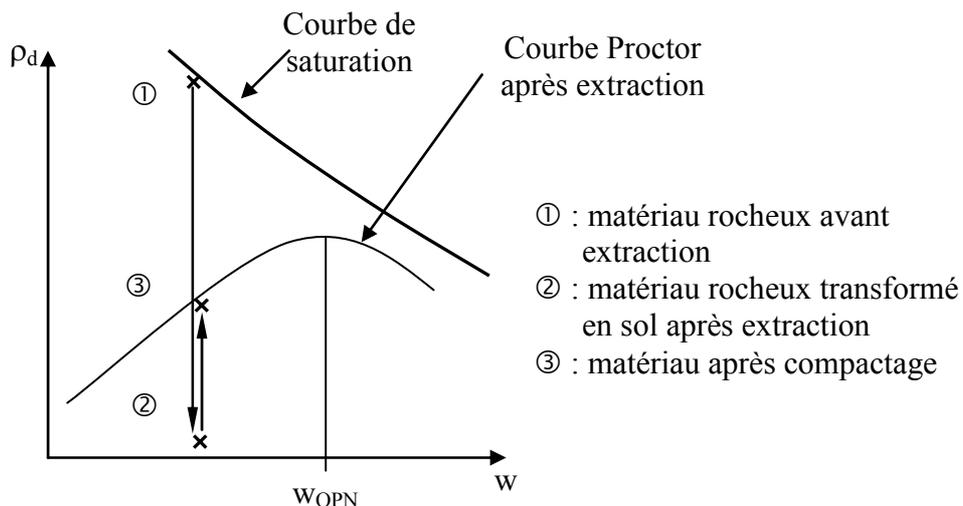


Figure 1. Evolution schématique de la position d'un matériau rocheux par rapport à la courbe Proctor de ce même matériau transformé en sol.



Figure 2. Utilisation de micaschistes à l'état très sec sur un chantier autoroutier au de la région de Marrakech (Maroc).

Le compactage des sols secs voire arides a fait l'objet de recherches et de développement méthodologiques (ISTED, 1987, Morel *et al.*, 2002) qui ont mis en évidence la forme singulière de la courbe Proctor pour les très faibles teneurs en eau (Figure 4). La diminution de la teneur en eau n'induit en effet une baisse de la masse volumique sèche que jusqu'à une certaine valeur, appelée « teneur en eau critique » (w_c), où elle atteint un minimum. Ce minimum correspond à un taux de compactage faible (inférieur souvent à 85 %). Ainsi, pour les sols secs voire très secs, l'obtention d'un taux de compactage compatible avec une réutilisation en corps de remblai passe par l'application d'une énergie de compactage intense. A titre d'exemple, pour un sol de classe A1 (plus de 35 % de fines, valeur de bleu de méthylène inférieure à 2,5 g/100 g), les préconisations en matière de compactage des sols très secs (LCPC, 2003) imposent de compacter des couches élémentaires de moins de 35 centimètres d'épaisseur, avec au moins 8 passes de compacteur V5 à une vitesse de 2,5 km/h. Pour une même épaisseur et une même vitesse de compacteur, le compactage du même matériau à l'état moyen peut être réalisé sur la même épaisseur en 3 passes à 4 km/h. La faible teneur en eau génère donc une perte de rendement au compactage d'un facteur 4.

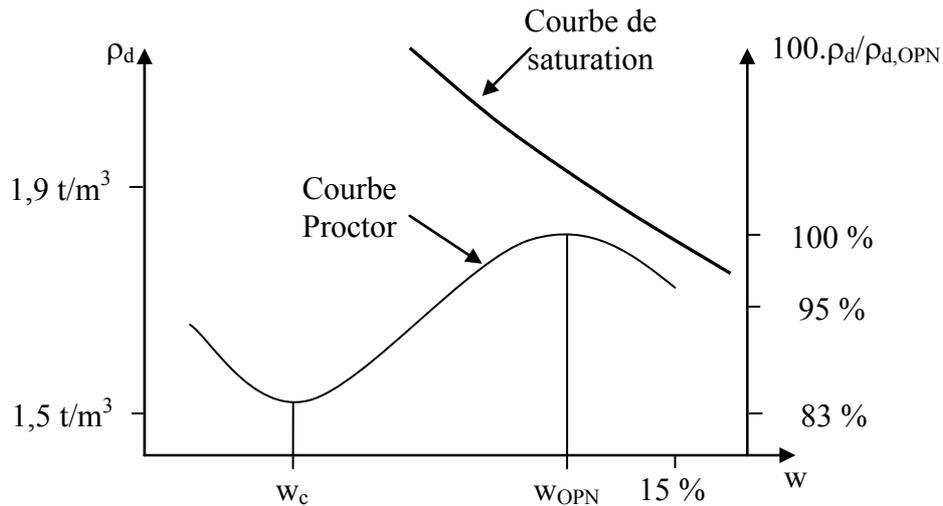


Figure 3. Courbe Proctor schématique d'un sol fin peu plastique (d'après ISTED, 1987)

Malgré ces contraintes, des expériences récentes en France (Figure 4, Bernhard et al. 2007) et au Maroc ont montré qu'effectivement, l'obtention d'un objectif de densification q4 (taux de compactage moyen supérieur à 95 %, taux de compactage en fond de couche supérieur à 92 %) était possible pour des matériaux rocheux argileux à l'état sec.



Figure 4. Compactage d'une pélite à l'état sec.

L'un des problèmes posés par les sols secs réside donc dans la difficulté à les compacter mais il s'avère possible, concrètement, d'atteindre les objectifs de densification visés en corps de remblai. La question est alors de savoir quel risque représente l'utilisation de ce type de matériaux dans une perspective à long terme. C'est l'objet de la partie suivante, qui porte sur les conséquences de l'humidification des sols fins peu plastiques.

4. COMPORTEMENT DES SOLS SECS SOUMIS A L'HUMIDIFICATION

On considère souvent en géotechnique routière que la saturation du matériau est la sollicitation la plus préjudiciable. Ce principe est même utilisé dans certaines méthodes de dimensionnement des structures routières, notamment par l'utilisation de l'indice CBR immergé. Pour les corps de remblais, ce n'est pas tant la portance qui est le paramètre fondamental que les déformations plastiques générées par la saturation.

Pour étudier cette question et quantifier les déformations possibles, des séries d'essais d'inondation ont été réalisées sur un limon moyennement plastique de Normandie (NO de la France - Tableau I). Il est caractérisé par un indice de plasticité de l'ordre de 20 et une valeur de bleu de méthylène de 3,5 g/100 g. Il appartient à la famille des sols A2 de la classification des sols en terrassements (AFNOR NF P 11 300).

Tableau I. Caractéristiques géotechnique du limon de Goderville.

w_L (%)	I_p	$C_{2\mu m}$ (%)	ρ_s (Mg/m ³)	w_{OPN} (%)	$\rho_{d,OPN}$ (Mg/m ³)	Valeur de bleu (g/100 g)
41,2	19,3	35	2,67	17	1,75	3,48

Les essais ont consisté à compacter des échantillons de sols dans des cellules oedométriques à différentes masses volumiques sèches et à deux teneurs en eau différentes : une teneur en eau proche de l'optimum Proctor normal (18,1 %) et une teneur en eau plus faible correspondant à l'état sec au sens du GTR (13,4 %). Les échantillons ont été soumis à une contrainte verticale, sans modification de leur teneur en eau, puis saturé d'eau. L'ensemble des mesures a permis de déterminer :

- l'indice des vides après compactage, correspondant à l'indice des vides qui serait obtenu sur chantier après le passage du compacteur ;
- l'indice des vides après chargement à teneur en eau constante, qui correspond à l'indice des vides qui résulterait du tassement généré par la montée du remblai et l'augmentation concomitante de la contrainte verticale ;
- l'indice des vides après inondation, qui reflète les effets de l'inondation sur les déformations du sol.

Sous une contrainte verticale donnée, par exemple 100 kPa (Figure 5), qui correspond à la charge supportée par la base d'un remblai de 5 mètres de hauteur environ, le report de l'indice des vides après inondation en fonction de l'indice des vides initial montre que :

- lorsque les échantillons sont bien compactés, c'est-à-dire à un indice des vides faible, les tassements dus à l'inondation sont très faibles voire négligeables, alors que pour les échantillons les moins compactés, c'est-à-dire aux plus forts indices des vides, les tassements sont d'autant plus importants que l'indice des vides est fort ;
- sous une contrainte verticale donnée, l'état final de ce limon ne dépend que de l'indice des vides initial, et **absolument pas de la teneur en eau initiale** ;
- pour les échantillons faiblement compactés, le tassement dû à l'inondation conduit à une valeur d'indice des vides constante, qui ne dépend ni de l'indice des vides initial ni de la teneur en eau initiale.

Ces résultats confirment bien l'importance du compactage, puisque l'obtention d'un faible indice des vides (ou d'une forte masse volumique sèche) permet de prévenir les tassements par inondation. En revanche, l'influence de la teneur en eau initiale paraît inexistante dans ce comportement, ce qui suggère que, dans le comportement à l'inondation, peu importe la teneur en eau initiale de compactage pourvu que le sol ait été compacté à une masse volumique sèche suffisante.

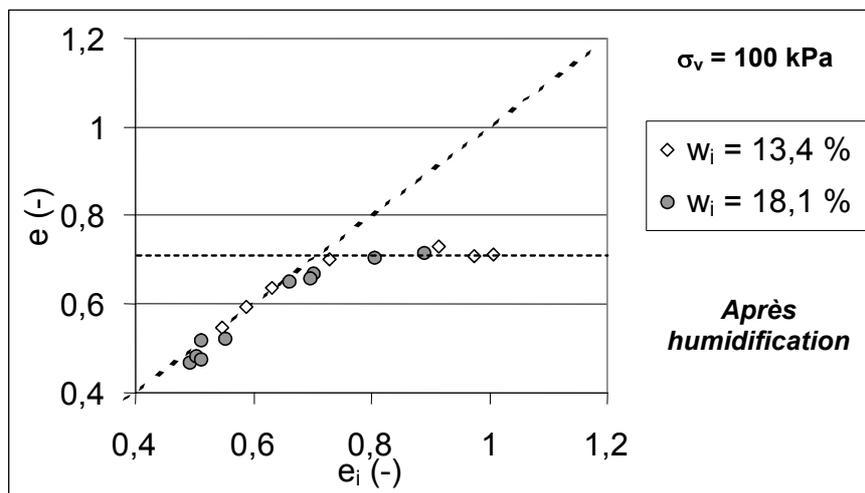


Figure 5. Influence de la teneur en eau et de l'indice des vides initial sur l'indice des vides après inondation d'un limon compacté.

Ces expérimentations ont été réalisées sous diverses contraintes verticales (Figure 6) et ce phénomène à seuil a été observé pour toutes les contraintes supérieures ou égales à 100 kPa. On peut constater que l'indice des vides après tassement par inondation diminue lorsque la contrainte augmente. Autrement dit, plus la hauteur de remblai est importante, plus la masse volumique sèche à obtenir pour prévenir les risques de tassement est importante.

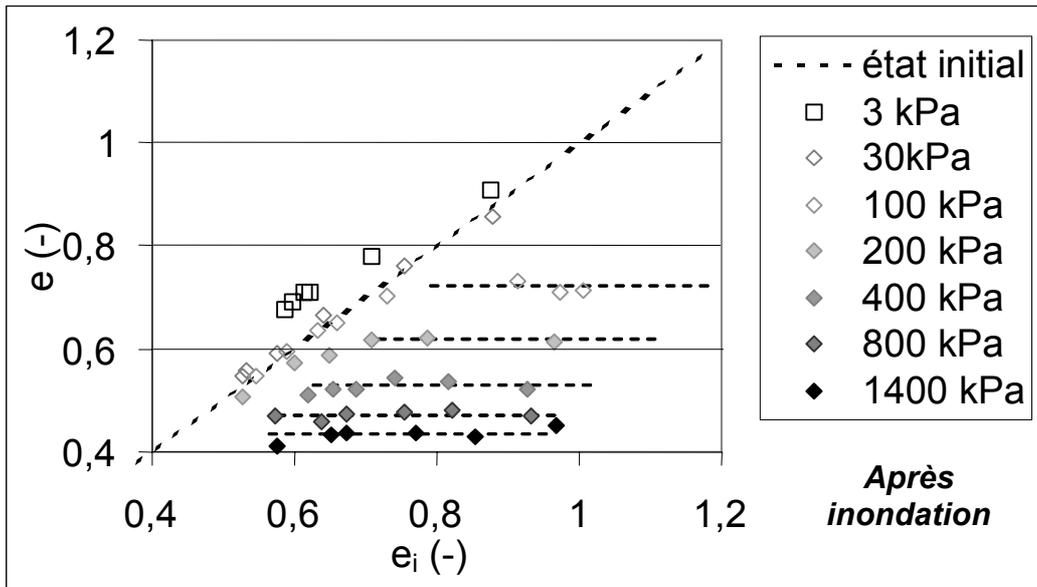


Figure 6. Influence de l'indice des vides initial et de la contrainte verticale sur l'indice des vides après inondation.

Il s'avère que l'influence de la contrainte verticale sur l'indice des vides après tassement par inondation (Figure 7) suit une loi semi-logarithmique correspondant à la courbe de compression oedométrique d'un échantillon du même sol faiblement compacté. Ainsi, un essai oedométrique réalisé sur un échantillon de sol permettrait de déterminer quel taux de compactage doit être obtenu en fonction de la hauteur de remblai pour éviter un tassement ultérieur en cas d'humidification.

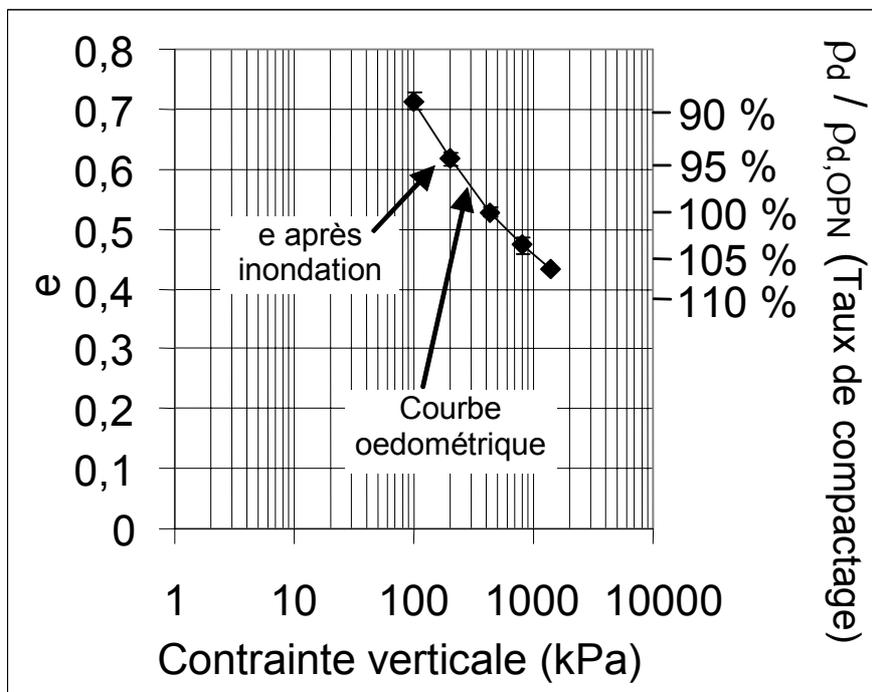


Figure 7. Influence de la contrainte verticale sur l'indice des vides après tassement par inondation.

Des essais similaires, réalisés sur d'autres sols, ont montré que le taux de compactage à obtenir pour un remblai de 10-15 mètres de hauteur était de l'ordre de 95 % (Figure 8) et que ce taux de compactage doit s'élever à plus de 100 % pour des remblais de plus de 20-25 mètres de hauteur.

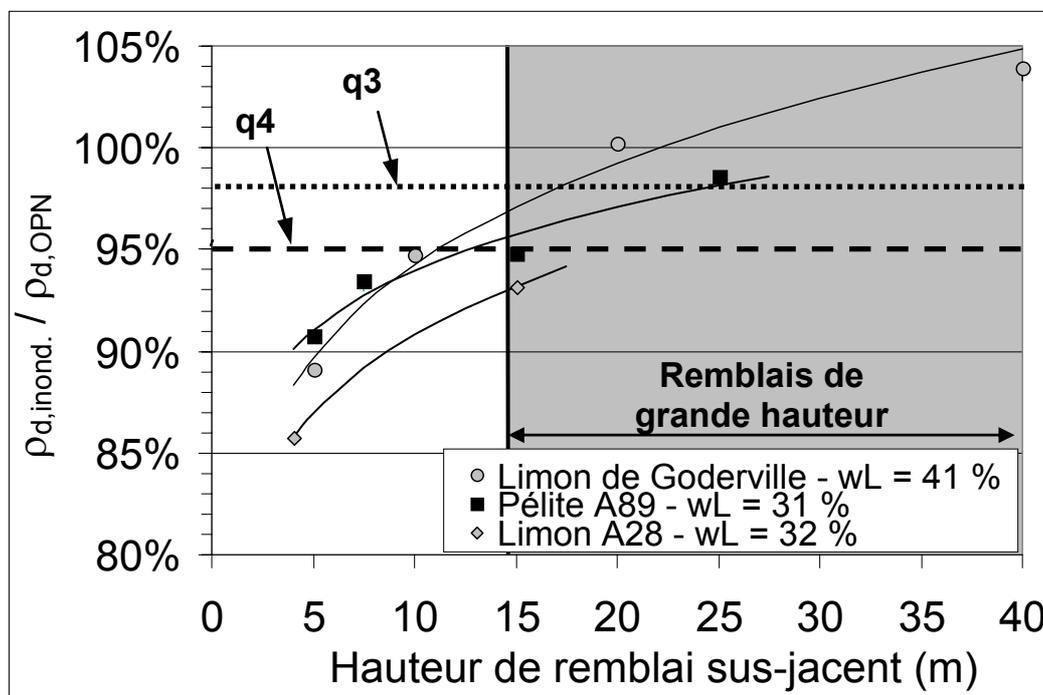


Figure 8. Influence de la hauteur de remblai sur le taux de compactage nécessaire pour prévenir les tassements par inondation.

Ces résultats constituent un appui scientifique à des observations et des habitudes concernant la conception des remblais (Puech, 1989), selon lesquelles le taux de compactage doit être adapté à la hauteur de remblai (Figure 9).

Ainsi, un sol n'est pas bien ou mal compacté dans l'absolu ; il est suffisamment compacté ou non en fonction de la hauteur de remblai qui le recouvre. Néanmoins, il est important aussi de préciser que cette remarque ne s'applique qu'au phénomène d'humidification et au corps de remblai sous la Partie Supérieure des Terrassements, et que le compactage doit de toute façon toujours faire l'objet d'une attention particulière dans la mesure où l'objectif est non seulement d'obtenir une stabilité vis-à-vis des tassements par humidification, mais aussi d'obtenir une faible perméabilité, une homogénéité et une résistance mécanique permettant d'assurer une stabilité pérenne de l'ouvrage.

Cependant, il faut noter que ce comportement à l'humidification est fondamentalement différent et beaucoup plus complexe dans les sols très argileux des classes A3 ou A4 (Ferber, 2006), pour lesquels la réutilisation sans traitement constitue une prise de risque non maîtrisée.

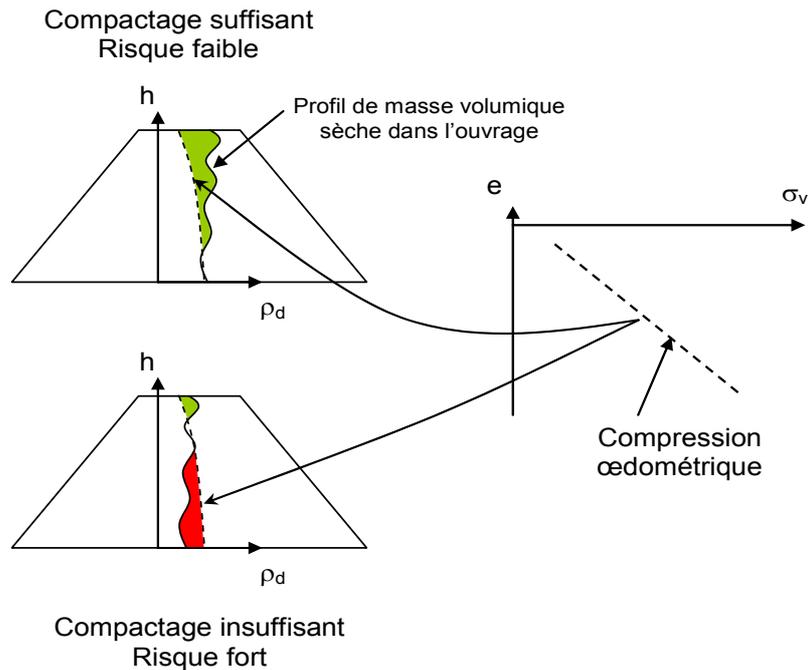


Figure 9. Schématisation du principe de diagnostic de taux de compactage en fonction de la hauteur de remblai.

5. CONSEQUENCES SUR LA CONCEPTION DES REMBLAIS EN SOLS SECS

Comme cela a été indiqué dans la partie « Problématique », l'utilisation de sols secs voire très secs peut constituer un enjeu économique et/ou environnemental majeur dans des contextes sensibles (pays peu riches en eau, périodes de sécheresse, ...). Les expériences de compactage sur les sols secs à très secs et les résultats expérimentaux présentés plus haut permettent de poser le problème sur la base des constats suivants :

- si le compactage des sols secs et très secs reste une opération difficile, il est en général possible d'obtenir des taux de compactage de l'ordre de 95 % avec les moyens de compactage modernes et une énergie de compactage importante ;
- dans des remblais de hauteur faible à moyenne, c'est-à-dire inférieure à 10-15 mètres, les conséquences de l'inondation des sols fins peu plastiques dépendent du taux de compactage initial. Si le sol est compacté au-delà de 95 % de taux de compactage, les déformations sont négligeables, quelle que soit la teneur en eau initiale.

En conséquence, il peut être envisagé de réaliser des remblais en sols secs à très secs sans ajout d'eau si la hauteur du remblai reste limitée et si les modalités de compactage (type de compacteur, nombre de passes et surtout, épaisseur des couches) permettent d'atteindre une densité de 95% de l'OPN.

Il paraît important de prendre en compte deux autres aspects dans la conception des remblais en sols secs :

- les sols secs sont notoirement plus sensibles aux phénomènes d'érosion que les sols compactés à l'état moyen voire humide, qu'il s'agisse d'érosion par le vent ou d'érosion due aux écoulements d'eau, que le remblai soit en zone inondable ou non ;
- la partie supérieure des terrassements (PST) a vocation à garder une portance pérenne, ce qui ne peut pas être assuré pour les sols secs voire très secs, qui auront plus fortement tendance à s'humidifier, du fait de leur forte succion et, par suite, à perdre leur portance.

La conception des remblais doit donc reposer sur une structuration (Figure 10) consistant à :

- placer en Partie Supérieure des Terrassements un matériau insensible à l'eau ;
- constituer les talus sur la largeur d'un compacteur avec un matériau insensible à l'érosion, c'est-à-dire par exemple un matériau granulaire 0/D, avec D compris entre 63 et 500 mm et une valeur de bleu inférieure à 0,2 g/100 g ;
- réaliser le corps du remblai avec le sol sec voire très sec.

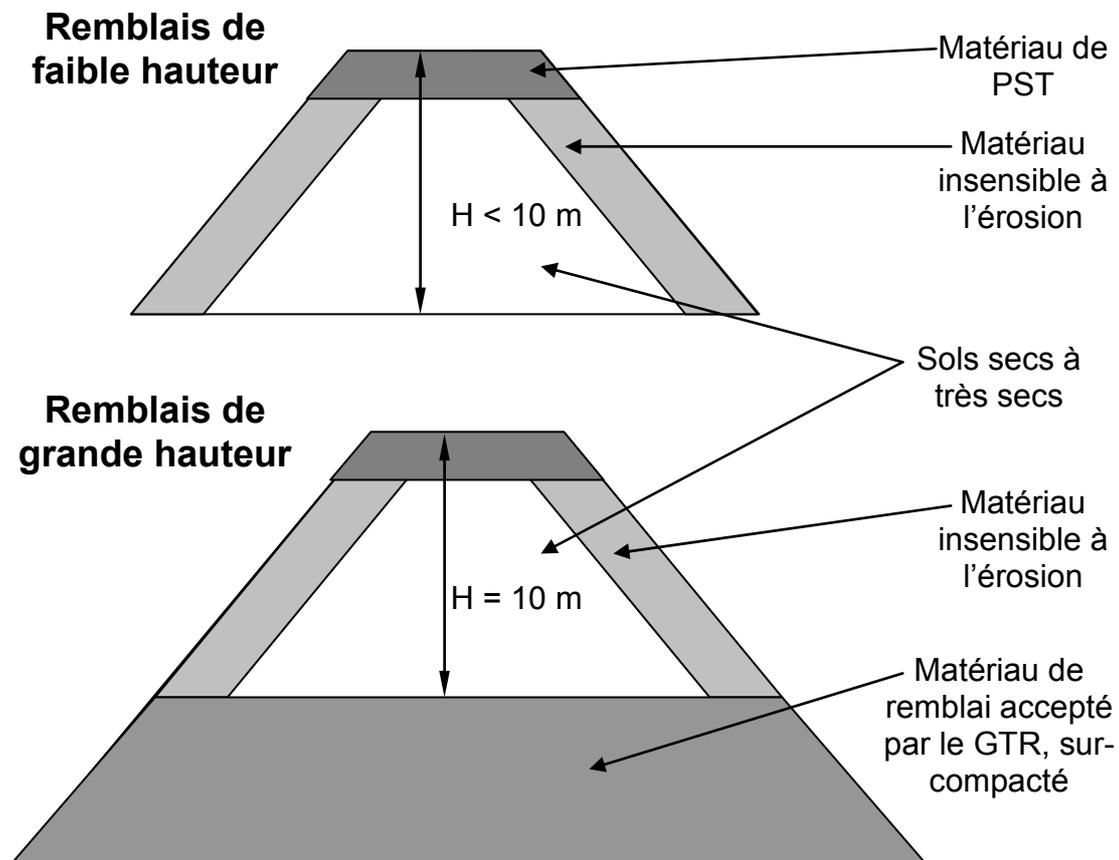


Figure 10. Exemple de conception de remblai constitué de sols secs à très secs.

Cette conception doit aussi s'accompagner, en phase de réalisation, d'un contrôle strict des conditions de compactage, afin de limiter au maximum les risques de défauts de compactage. Ainsi, le contrôle ne doit pas se limiter à l'utilisation d'une méthode globale (Q/S par exemple), mais doit aussi reposer sur des mesures ponctuelles de masse volumique sèche. Malheureusement, ce besoin de contrôler le

compactage peut s'avérer difficile si les matériaux une fois extraits présentent une granulométrie très grossière, d'une part car il n'est alors pas possible de déterminer leur courbe Proctor du fait de la forte proportion de gros éléments et, d'autre part, parce qu'il est difficile de réaliser des mesures de masse volumique sèche représentatives et significatives avec les moyens de contrôles usuels.

6. CONCLUSIONS

La réutilisation des sols secs voire très secs dans les corps de remblai n'est pas un problème récent mais l'amplification des contraintes économiques et environnementales qui pèsent sur les projets en fait aujourd'hui parfois un sujet crucial. La préservation de la ressource en eau et la nécessité de tenir l'économie des projets d'infrastructure amène donc certains maîtres d'œuvre à envisager d'utiliser ces matériaux dans des corps de remblais, et il apparaissait nécessaire d'appuyer cette démarche sur des études de comportement.

Pour cela, des essais d'inondation ont été réalisés sur des sols compactés afin d'étudier l'influence de la teneur en eau et de la masse volumique sèche sur les tassements induits par l'humidification. Il s'avère que, pour les sols fins peu plastiques, le taux de compactage est le paramètre fondamental à obtenir en phase de construction, dans la mesure où l'obtention d'un taux de compactage satisfaisant permet d'éviter les tassements en cas d'humidification. Les résultats obtenus montrent que cet objectif de taux de compactage dépend de la hauteur de remblai et que les objectifs de densification couramment prescrits (95 % de taux de compactage moyen) permettent d'assurer l'absence de tassement des remblais de moins de 10-15 mètres de hauteur.

Des expériences de chantiers réalisés avec différents matériaux à l'état sec voire très secs ont montré qu'il était possible d'atteindre cet objectif de densification, moyennant la mise en œuvre d'une énergie de compactage intense. Ceci conduit à estimer que la réutilisation de sols secs voire très secs ne constitue pas une prise de risque irraisonnée, à condition de la limiter aux sols peu plastiques et de respecter quelques règles dans la conception des ouvrages et de prévoir un contrôle strict du compactage lors de la réalisation.

Bibliographie

1. Auriol J.C., Havard H., Mieussens C., Queyroi D. (2000) Résultats d'enquêtes sur la pathologie des remblais en service, Routes/Roads, n°306, pp. 57-74
2. Ben Dhia M.H., 1998, Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien, Bulletin Labo. P. et Ch., 213, jan fev 1998, Ref 4159, pp 33-42.
3. Bernhard S., Bimbarde J., Lejeune J.P. (2007) A89 –Terrasson – Brive : Retour d'expérience sur la réutilisation de roches évolutives : cas des pélites du Permien, Bulletin Labo. P. et Ch., à paraître.
4. Chaigne P., Blivet J.C. (1971) Compactage par vibration à teneur en eau nulle, Bulletin Labo. P. et Ch., 54, aout sept 1971, pp 45-48.
5. Cheikh O.S., Havard H., Valin C. (1995) Terrassements routiers dans les sables de dunes de Mauritanie, Bulletin Labo. P. et Ch., 199, Ref 3995, pp 27-34.
6. Cisse A. (1980) Le compactage à sec : mythe ou réalité ?, Bulletin Labo. P. et Ch., 105, jan-fev 1980, pp 57-64.

7. Ferber V. (2006) Déformations induites par l'humidification des sols fins compactés. Apport d'un modèle de microstructure. Collection Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, GT 80, 321 p.
8. ISTED (1987) Le savoir-faire français en matière de compactage à faible teneur en eau des sols et matériaux de terrassements et chaussées, Institut des sciences et des techniques de l'équipement et de l'environnement pour le développement, 44 p.
9. LCPC (2003) Practical manual for the use of soils and rocky materials in embankment construction, Ed. LCPC, Collection Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Ref : GTRA, 60 p.
10. Morel G., Havard H., Quibel A. (2002) Emploi de sols arides pour la constitution de remblais routiers, Séminaire AIPCR de Oulan-Baatar, Mongolie, Emploi adapté des matériaux naturels en technique routière, Sujet 3, 18-21 juin 2002, 8 p.
11. Puech J.P. (1989) Géotechnique et projets de terrassements autoroutiers, *Travaux*, juil-août 1989, 17 p.
12. SETRA-LCPC (2000) *Réalisation des remblais et des couches de forme* (GTR), Guide technique SETRA-LCPC, 2 fascicules, 98 et 102 p.