



Éléments techniques pour la conception et la réalisation de planches d'essais de compactage dans les chantiers de terrassements

**Chaussées
Dépendances
114**

L'objet de la présente note d'information est de préciser dans quels cas il y a une réelle utilité à prévoir des planches d'essais de compactage. Elle complète les guides techniques existants :GTR [1] et GTS [6]

Les conditions dans lesquelles elles doivent être réalisées et les moyens à mettre en œuvre sont décrits, afin que l'interprétation finale des résultats obtenus puisse satisfaire aux objectifs assignés à l'exécution des planches d'essais.

Le domaine d'application visé par cette note d'information est le compactage des sols, dans le seul but d'améliorer leur densification. L'objectif de module, qui s'ajouterait aux objectifs de densification, n'est pas abordé ici et ne justifie généralement pas de planches d'essais de compactage ; son obtention dépend davantage de la nature et de l'état hydrique des matériaux que des modalités d'utilisation des compacteurs.

Sommaire

- Le vocabulaire2
- Qui décide, qui réalise les planches d'essais de compactage ?3
- Les différents cas de recours a la réalisation de planches d'essais de compactage...3
- La conception et la réalisation des planches d'essais5
- Quelques éléments utiles a prendre en compte5
- Les erreurs a ne pas commettre7



Introduction

En terrassements, la probabilité de se trouver idéalement dans un cas de matériaux de granularité limitée, et très homogène, n'est pas élevée. Or, la fiabilité des contrôles du résultat par masse volumique apparente sèche, que l'on appellera densité par simplification dans la suite du texte, n'est plus satisfaisante lorsqu'on s'éloigne de ces cas idéaux.

Pour donner aux maîtres d'oeuvre comme aux entreprises les moyens d'atteindre les objectifs de densification, la démarche retenue en France a consisté à proposer des tableaux de compactage qui précisent les moyens et l'énergie à appliquer pour chaque cas. Ces tableaux sont int egr es dans les guides techniques [1], [2].

Les objectifs de densification en terrassements sont définis sous forme d'un double critère : densité moyenne, densité en fond de couche. Ils sont rappelés ci-après :

- **en remblai courant, l'objectif q4** correspond à l'obtention en moyenne, c'est-à-dire pour 50 % des mesures (*), d'une densité moyenne sur la totalité de la couche d'au minimum 95 % de la densité à l'optimum Proctor Normal $\rho_{d_{OPN}}$, et d'une densité en fond de couche mesurée à +4 cm du bas de couche d'au minimum 92 % $\rho_{d_{OPN}}$;
- **en couche de forme, l'objectif q3** correspond à l'obtention de ces critères avec des valeurs respectives d'au minimum 98,5 et 96 % $\rho_{d_{OPN}}$.

Du fait des recherches expérimentales comportant un grand nombre de planches d'essais de compactage réalisées au CETE Normandie centre, complétées par des investigations sur chantiers, **la question ne doit plus se poser dans les cas courants de refaire des planches d'essais en chantier** : il est consid er e que la vérification de l'application conforme des indications des tableaux de compactage, lorsque ceux-ci sont sp ecifi es au marché, apporte une garantie suffisante de l'obtention de la qualité de compactage.

Il reste cependant des cas spécifiques où une ou des planches de compactage sont nécessaires pour la réalisation et (ou) le contrôle du compactage sur un chantier donn e.

Le guide technique Réalisation des remblais et des couches de forme [1] (GTR) indique que lorsqu'elles sont envisagées, les planches d'essais doivent faire l'objet d'un véritable plan d'expérience identifiant parfaitement l'objectif visé et définissant les modalités étudiées en terme de sol (nature, état), épaisseur, matériel (classe et paramètres de fonctionnement), plan de balayage, critères de qualité et moyens de mesures utilis es.

Le guide technique Traitement des sols [6] (GTS) précise dans ce contexte les cas pouvant justifier l'intérêt de telles planches. Il attire l'attention sur la consistance des expérimentations pour pouvoir tirer des conclusions fiables.

Il est important de prendre conscience que les dispositions contraignantes à prendre pour la préparation et l'éxecution des planches d'essais sont la condition indispensable pour que les résultats tir es de celles-ci aient une réelle valeur ajoutée par rapport à la bibliographie.

Le vocabulaire

Planche(s) d'essai(s) : elle(s) permet(tent) de préciser les conditions d'utilisation des compacteurs, lorsque celles-ci ne sont pas définies suffisamment dans les documents techniques en vigueur. Lorsque les connaissances initiales sont très imprécises, il y a nécessairement plusieurs (modalités de) planches d'essais pour chercher à encadrer les conditions finales à retenir.

Exemple : un matériel évolutif peu étudié préalablement, peut légitimement conduire à des planches d'essais, voire plus largement à un chantier expérimental selon l'importance du projet, pour définir les conditions de mise en œuvre et de compactage appropriées.

Planche de vérification : elle permet de s'assurer que les conditions d'utilisation des compacteurs tir es des tableaux de compactage amènent bien au résultat escompt e.

Exemple : une planche de vérification peut, sur des sols trait es aux liants hydrauliques, et présentant habituellement une difficulté de compactage élevée, être faite pour s'assurer que les densités en fond de couche sont atteintes.

(*)   associer à une dispersion acceptable des mesures (régularité du balayage des compacteurs)

Planche de référence : elle sert à "former" une population de mesures de référence sur une partie bien contrôlée où le chantier est ex ecut e avec les méthodes adaptées, en vue de déceler ultérieurement une dérive ou une anomalie ponctuelle par l'emploi de la même méthode de contrôle. Elles nécessitent, a priori, une faible variabilité des matériaux, et sont donc en général plus pertinentes dans le domaine des chaussées.

Exemple : une couche de forme-fondation autoroutière utilisant des formations sableuses homog en eises et traitées aux liants hydrauliques peuvent faire l'objet d'une planche de référence en début de chantier avec utilisation de gammadensim etre mobile apte à fournir un profil en long continu de densité.

Epreuve de convenance : la convenance est une opération systématique du maître d'oeuvre et de son contrôle extérieur qui vérifient ainsi que les matériels, matériaux, produits et méthodes que l'entrepreneur envisage de mettre en oeuvre, permettent de satisfaire les exigences du marché et les règles de l'art. Ces contrôles sont préalables à la mise en production du chantier et sont normalement assortis d'un point d'arrêt.

Une planche de vérification fait logiquement partie de l'épreuve de convenance.

Une planche de référence, lorsqu'elle est prévue, en fait également partie, pour s'assurer que le processus de contrôle envisag e est valide.

Les planches d'essais participent au final à la convenance, mais sont à imaginer en amont de celle-ci puisque leur objectif est de définir les conditions de compactage non connues à l'avance qui seront à appliquer lors de la convenance.

La suite du document traite exclusivement des planches d'essais.

Qui décide, qui réalise les planches d'essais de compactage ?

Selon l'organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassements [3], le Plan d'Assurance Qualité de l'Entreprise doit notamment :

- traduire clairement les engagements de l'entrepreneur sur les méthodes d'obtention de la qualité ;
- expliciter les procédures d'exécution prévues pour donner confiance au maître d'oeuvre et lui donner les moyens de vérifier que l'entrepreneur respecte bien ses propres méthodes ;

la décision de faire des planches d'essais, en vue de répondre à un problème identifi e, peut être prise dans le marché ou intervenir en cours des travaux. Les modalités de réalisation sont proposées par l'entreprise et soumises à l'acceptation du maître d'oeuvre.

Les différents cas de recours à la réalisation de planches d'essais de compactage

Les facteurs les plus courants qui peuvent justifier le recours à des planches d'essais sont pr esent es ci-après

Le matériel

Nature

Sols à forte cohésion, très anguleux, évolutifs, ou non connus (ex : classe A4)

sous-produits industriels valorisables, après validation de l'aspect environnemental, lorsque les guides régionaux ou nationaux existants ne fournissent pas d'indications.

Teneur en eau

Sols sensibles à l'eau à l'état très sec, après consultation des références [1], [5].

Granulométrie

Sols dont l'évolution est présumée forte et non connue depuis l'extraction jusqu'à la fin de compactage

Sols traités dont la finesse de mouture ne peut être facilement réduite, pouvant gêner l'obtention des objectifs de densification.

Sols traités ayant une tendance au feuilletage.

L'épaisseur des couches

Les possibilités offertes en ce domaine par le GTR sont généralement suffisantes pour trouver une solution satisfaisante dans la très grande majorité des cas de chantier. Du fait de l'existence de machines de traitement très puissantes, seuls certains cas de couche de forme traitée épaisse ou très épaisse (notamment en sol argileux traité à la chaux et au ciment), peuvent justifier la définition précise des conditions de compactage en début de chantier (mise en œuvre en une couche épaisse ou en deux couches d'épaisseur moitié, ...) en portant une attention particulière à l'obtention de la densité en fond de couche. La recherche de hautes performances sur ces matériaux peut également justifier des planches d'essais.

Le matériel de compactage, et les ateliers de compactage

Les matériels de compactage classiques sont facilement classifiables (NF P 98-736), et leurs performances aisément repérables dans les tableaux de compactage [1], [2].

Seuls, les matériels innovants sensiblement différents des matériels ci-dessus par leur technologie, et non pourvus d'un avis technique, justifient des planches d'essais.

Des essais peuvent également concerner l'organisation de chantier, la définition précise de l'atelier de compactage (ordre de passage des compacteurs, vibrants, vibrants à pieds dameurs, intérêt du compacteur à pneus pour terminer le compactage, réglage fin).

L'objectif de densification

Il s'agit d'une donnée d'entrée, indiquée dans les pièces du marché. Des planches d'essais ne sont justifiées que si cette donnée sort des objectifs normalisés (q4 en remblai et q3 en couche de forme).

Exemple : matériaux traités a priori faciles à compacter dont l'étude en laboratoire utilise des densités en fond de couche plus élevées pour optimiser le dimensionnement des couches de forme [6].

Le sol-support d'un remblai

Pour chaque couche d'un remblai, les tableaux de compactage intègrent un sol-support "usuel" dont la portance est censée être équivalente à celle du matériau approvisionné. Le seul cas où son influence serait insuffisamment prise en compte est celui de la première couche sur un sol en place de très faible portance. La recherche d'un compromis ne justifie généralement pas le recours à des planches d'essais (dès lors que l'on accepte que la densification de la première couche de remblai soit faible, on doit en tenir compte pour les conséquences possibles sur le comportement de l'ouvrage (évolutivité, déformations, tassements, stabilité, ...)).

La spécificité des ouvrages

Il s'agit des ouvrages de réalisation difficile (remblais derrière culée, compactage de radier, remblais techniques d'ouvrages hydrauliques,...). Les tableaux relatifs aux petits compacteurs sont utiles à considérer [2]. Plus généralement, on peut se reporter aux règles de conception contenues dans le guide de conception et réalisation des terrassements [4]. Seul, le caractère innovant d'un procédé doit amener à des planches d'essais (cf. IV.3).

Les nuisances apportées par le compactage par vibration en milieu urbain ou en zones sensibles peuvent conduire à faire des investigations. Elles ne sont cependant pas décrites ici.

La conception et la réalisation des planches d'essais

L'improvisation sur chantier, en matière de planches d'essais, présente plus d'inconvénients que de ne rien faire. Elle conduit souvent à des contre-vérités.

Pour que les conclusions obtenues soient valides au titre de la convenance, il importe de prouver qu'une méthodologie a été suivie :

L'objectif des planches est clairement formulé, et est traduit en grandeurs mesurables

Un plan d'expérience est écrit

Il comporte :

- les modalités visées des paramètres testés ;
- la définition des facteurs qui doivent rester constants ;
- les moyens de mesure employés et le nombre de points à effectuer ;
- la méthode d'exploitation des résultats pour aboutir aux conclusions.

Le plan d'expérience donne lieu à un programme d'essais

La délimitation géométrique de la zone, l'amenée des matériaux, le compactage, les mesures sont planifiées. Le programme d'essais, avec ses tâches élémentaires, doit apparaître réaliste et conforme au plan d'expérience. Les moyens humains et les compétences sont identifiés.

Le programme d'essais est réalisé

Les facteurs constants sont maîtrisés ; le ou les compacteurs sont réceptionnés et leur fonctionnement vérifié, les contrôles avec les moyens prévus sont effectués ; les éventuels ajustements jugés nécessaires, ou les écarts, sont enregistrés.

Les résultats sont traités

Les populations de points sont exploitées en moyenne et écart-type.

Les conclusions sont écrites dans un document où la traçabilité des résultats est apparente.

Quelques éléments utiles à prendre en compte

Sans être exhaustifs, les éléments ci-après facilitent la conception des planches d'essais :

La géométrie des planches de compactage

La longueur est de l'ordre de 30 m ; elle comporte 3 largeurs de compacteur, les mesures étant faites en partie centrale.

Les états de compactage

Par définition : une passe correspond à un aller ou un retour de compacteur (1A/R= 2 passes).

L'évolution de la densité suit une loi de type $A \log n + B$.

Il convient donc de retenir une progression géométrique du nombre de passes : par exemple $n = 2-4-8-16$ et non arithmétique $n = 2-4-6-8-10$.

L'espacement des modalités à tester

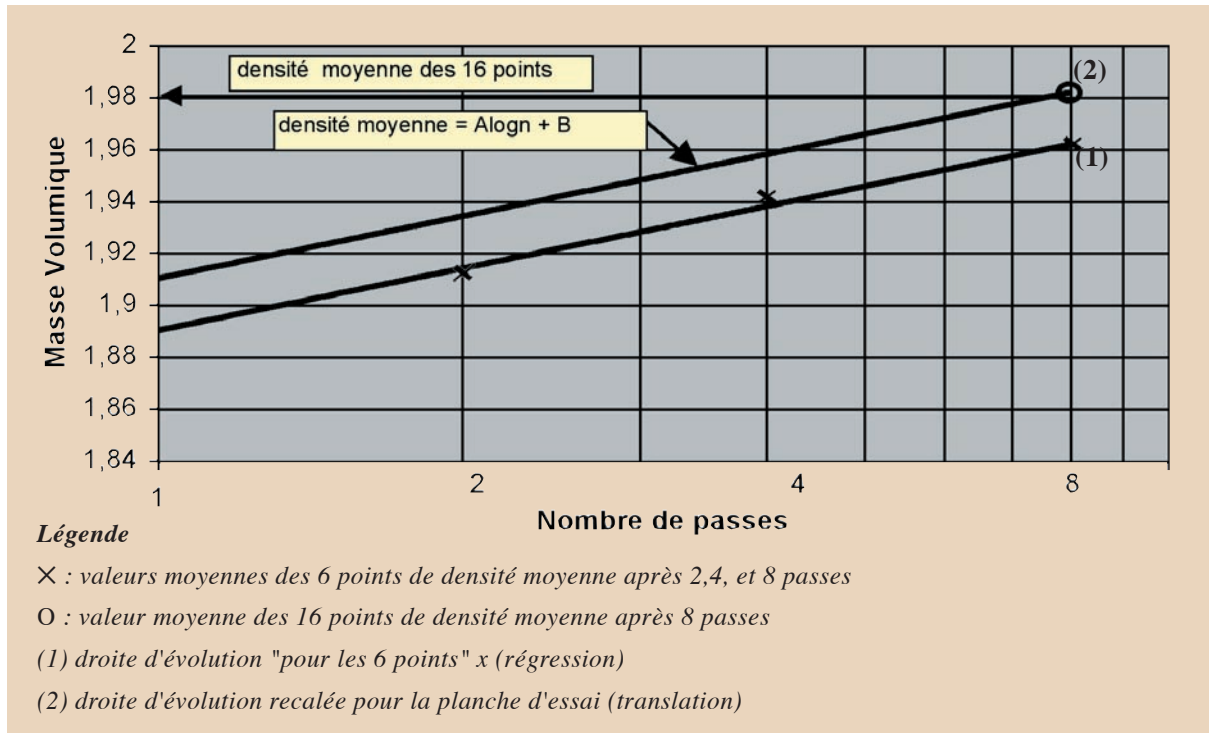
Pour mettre en évidence leur influence, les valeurs extrêmes sont un peu amplifiées relativement à la variabilité ou la marge de manœuvre ultérieure sur chantier.

Exemple : pour les teneurs en eau, les différencier d'au moins 0,2.WOPN entre elles.

Les mesures de densité moyenne de la couche ρ_{dm}

Le suivi de l'évolution de la densité nécessite au minimum la mesure en 6 points, toujours les mêmes, aux divers  tats de compactage (fig. 1).

A l'état final, le nombre de points peut être augmenté (ex : 16 points) pour avoir une meilleure appréciation de la valeur absolue de densité. La courbe $\rho_{dm} = f(n)$ est alors recal e.



Exemple d'exploitation correcte de l'évolution de la masse volumique moyenne en fonction du nombre de passes

Les mesures de densité en fond de couche ρ_{dfc} et du gradient de densité – courbe $\rho_d = f$ (profondeur)

Les mesures de densités en fond de couche sont fortement recommand es pour l'interprétation des résultats sur les sables et les sols fins traités aux liants hydrauliques.

Le gradient de densité apporte un renseignement complémentaire sur la difficulté de compactage du cas de chantier.

ρ_{dfc} ne peut-être mesur e (en 4 points minimum, et de préférence 6) qu'à l'état final de compactage, en faisant l'hypothèse que l'évolution $\rho_{dfc} = f(n)$ suit la même pente que $\rho_{dm} = f(n)$.

Autres mesures

Sur les matériaux grossiers, les mesures de densité peuvent être difficiles, voire non interprétables. Les mesures de nivellement aux divers  tats de compactage (20 points) permettent d'approcher l'évolution $\rho_{dm} = f(n)$.

Les p n trodensitographes (normes XP P 94-063 et XP P 94-105) donnent également sur ces matériaux une information de l'affaiblissement des densités avec la profondeur.

Les erreurs a ne pas commettre

Les considérations ci-après sont tirées de nombreux retours d'expérience :

- Indiquer dans les documents contractuels que les modalités de compactage seront déterminées sur planches d'essais sans avoir évalué a priori l'insuffisance des documents techniques actuels, ciblé les points à tester, et précisé la méthode d'interprétation.
- Réaliser des planches d'essais sur un support non caractérisé ou non représentatif de celui réellement existant.
- Réaliser une planche d'essais avec seulement 3 ou 4 mesures de densité ; utiliser des points différents entre états de compactage (les interprétations souvent erronées en terme de baisse de densité tout en augmentant le nombre de passes viennent généralement de l'échantillonnage des points).
- Réaliser (Cf VI.2) une planche d'essais avec des états de compactage en progression arithmétique dont la raison est parfois décroissante (ex : 4-6-8-9).
Si les mesures montraient une baisse de densité entre 8 et 9 passes, l'interprétation en terme de baisse a toutes les chances d'être injustifiée en raison de l'incertitude des mesures.
- Utiliser un résultat d'essai Proctor réalisé au moment de la reconnaissance (et non vérifié en phase travaux) pour interpréter les valeurs absolues de densité sur planches d'essais. Une référence inexacte à 2 % près se traduit par un nombre de passes multiplié ou divisé par 2.
- Utiliser des moyens de mesure qui privilégient la partie supérieure des couches alors que le problème étudié est le compactage efficace en profondeur.
- Chercher à estimer les valeurs de densité en fond de couche en les déduisant par exemple de mesures au gammadensimètre à 40 et à 30 cm de profondeur (l'incertitude sur le calcul de la densité entre 30 et 40 cm est trop élevée).
- Utiliser pour des valeurs absolues de densité des appareils de mesure dont on n'est pas certain de l'étalonnage, ou de la capacité à prendre en compte la nature chimique des matériaux.
- Chercher à diminuer le nombre de passes des tableaux de compactage en s'appuyant sur l'atteinte rapide de modules suffisants sur la couche testée. Cette pratique sur des sols secs est en contradiction avec le fait qu'ils sont difficiles à densifier.

Principales références

Les nombreuses normes du domaine technique ne sont pas citées ici.

- [1] Réalisation des remblais et des couches de forme dit "GTR" – Guide technique – référence : 9233 (deux fascicules) – LCPC/Sétra – septembre 1992.
- [2] Remblayage des tranchées et réfection des chaussées – Guide technique – référence : D9441 – LCPC/Sétra – mai 1994.
- [3] Organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassements – Guide technique – référence : D9923 – LCPC/Sétra – janvier 2000.
- [4] guide de conception et réalisation des terrassements – fascicule 1 : Études et exécution des travaux – fascicule 2 : Organisation des contrôles et fascicule 3 : Méthodes d'essais – CFTR (à paraître)
- [5] Compactage à faible teneur en eau des sols et matériaux de terrassements et chaussées – ISTE/MELTE – Collection "Le Savoir français en matière de..." juin 1987.
- [6] Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques dit "GTS" – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme – Guide technique – référence : D9924 – LCPC/Sétra – janvier 2000.
- [7] G. Arquie – G. Morel – Le compactage – 1988 – Ed. Eyrolles.

Rédacteurs

- Alain **Quibel** – CETE Normandie – téléphone : 33(0)2.35.68.82.08 – télécopie : 33 (0)2 35 68 81 21
mél : alain.quibel@equipement.gouv.fr
- Michel **Kergoët** – LREP – téléphone : 33(0)1.60.56.64.73 – télécopie : 33 (0)1 60 56 64 01
mél : michel.kergoet@equipement.gouv.fr
- Pierre **Fraquet** – CETE de l'Ouest – téléphone : 33(0)2.41.79.13.20 – télécopie : 33 (0)2 41 44 32 76
mél : pierre.fraquet@equipement.gouv.fr
- Jean **Bimbard** – CETE de Lyon – téléphone : 33(0)4.72.14.32.46 – télécopie : 33 (0)4 72 14 30 35
mél : jean.bimbard@equipement.gouv.fr
- Jérôme **Varillon** – CETE de Lyon – téléphone : 33(0)4.73.42.10.31 – télécopie : 33 (0)4 73 42 10 01
mél : jerome.varillon@equipement.gouv.fr
- Catherine **Drouaux** – téléphone : 33(0)1.46.11.35.56. – télécopie : 33 (0)1 45 36 86 56
mél : catherine.drouaux@equipement.gouv.fr

Renseignements techniques

- Catherine **Drouaux** – téléphone : 33(0)1.46.11.35.56. – télécopie : 33 (0)1 45 36 86 56
mél : catherine.drouaux@equipement.gouv.fr
- Alain **Quibel** – CETE Normandie – téléphone : 33(0)2.35.68.82.08 – télécopie : 33 (0)2 35 68 81 21
mél : alain.quibel@equipement.gouv.fr

Document imprimé par téléchargement à partir des sites web du Sétra :

- Internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>
- I² (réseau intranet du ministère de l'Équipement) : <http://intra.setra.i2>

Directeur de la publication : Jean-Claude **Pauc** – Directeur du Sétra

Conception graphique - mise en page : Sétra

L'autorisation du Sétra est indispensable pour la reproduction même partielle de ce document.

Référence : XXXXw – ISSN : 1250-8675

AVERTISSEMENT

La collection des notes d'information du Sétra est destinée à fournir une information rapide. La contre-partie de cette rapidité est le risque d'erreur et la non exhaustivité. Ce document ne peut engager la responsabilité ni de son rédacteur ni de l'administration.

Les sociétés citées le cas échéant dans cette série le sont à titre d'exemple d'application jugé nécessaire à la bonne compréhension du texte et à sa mise en pratique.

46 avenue
Aristide Briand
BP 100
92225 Bagneux Cedex
France
téléphone :
33 (0)1 46 11 31 31
télécopie :
33 (0)1 46 11 31 69
internet : www.setra.equipement.gouv.fr

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
de l'Équipement

