

CAT® PAVING PRODUCTS

# GUIDE DU COMPACTAGE DES SOLS

 CATERPILLAR®





Warning labels on the blade:

- Warning symbol: A triangle with a black exclamation mark and a red border.
- Warning symbol: A triangle with a black exclamation mark and a red border.
- Warning symbol: A triangle with a black exclamation mark and a red border.
- Warning symbol: A triangle with a black exclamation mark and a red border.

STUBBLESS





**CAT** CS78B







**CAT® PAVING PRODUCTS**

# GUIDE DU COMPACTAGE DES SOLS

GUIDE DU COMPACTAGE DES SOLS

**CATERPILLAR®**



Ce *Guide du compactage des sols* est publié par Caterpillar® Paving Products. Tous les efforts ont été faits pour s'assurer de l'exactitude des spécifications et des informations contenues dans le présent guide. Les informations concernant les performances sont données à titre indicatif uniquement. En raison des nombreuses variables spécifiques à chaque chantier de compactage du sol (type de sol et caractéristiques, additifs, teneur en eau, spécifications du chantier, équipements disponibles, rendements de l'opérateur, préférences d'application du maître de l'ouvrage, conditions du sol, altitude, etc.), ni Caterpillar ni ses concessionnaires ne garantissent que les machines et les méthodes décrites dans le présent guide fonctionneront selon les estimations. Les spécifications sont susceptibles d'être modifiées sans préavis, contrôlez auprès de votre concessionnaire Cat les informations les plus récentes sur les produits et les options disponibles. Les machines représentées peuvent comprendre des équipements en option et/ou ajoutés. Cat, Caterpillar, leurs logos respectifs, le « Caterpillar Yellow » et l'habillage commercial POWER EDGE, ainsi que l'identité de l'entreprise et des produits figurant dans le présent document, sont des marques déposées de Caterpillar et ne peuvent pas être utilisés sans autorisation.

**Remarque :** Consultez toujours le Guide d'utilisation et d'entretien Caterpillar correspondant pour des informations spécifiques sur les produits. Certaines machines représentées peuvent comprendre des options du marché secondaire non fabriquées ou testées par Caterpillar.

ISBN : 978-1-939945-08-2

QFBQ1705

© 2013 Caterpillar Inc. - All rights reserved.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>Unité 1 :</b>	LES BASES DU COMPACTAGE DES SOLS	8
<b>Unité 2 :</b>	TYPES DE SOL ET CLASSIFICATIONS	30
<b>Unité 3 :</b>	PHYSIQUE DU COMPACTAGE	38
<b>Unité 4 :</b>	APPLICATION ET CONTRÔLE DE LA QUALITÉ	58
<b>Unité 5 :</b>	COMPACTAGE INTELLIGENT	90
	ANNEXE	112
	GLOSSAIRE TERMINOLOGIQUE	118



# PRÉFACE

La terre est depuis toujours le matériau de construction le plus abondant dans le monde entier. Des routes construites en terre par les Romains aux constructions de barrages modernes, les opérations de compactage sont liées aux performances des remblais et à ce qui est construit sur ces couches de remblais. Aujourd'hui, les chantiers de construction de chaussées, de remblais, de barrages, les remblais de structures et les pentes nécessitent des opérations de compactage contrôlées pour assurer leur conformité aux critères de qualité technique. Si le compactage n'atteint pas la qualité cible pendant la construction, les coûts de réparation sur la durée de vie de l'ouvrage peuvent dépasser les coûts de construction d'origine.

Cependant, les matériaux du sol ne sont pas seulement le matériau de construction le plus important, mais également le plus variable. En effet, la taille et la forme des particules, la minéralogie, la teneur en eau, les mélanges et le temps contribuent tous à la variabilité de ces matériaux. Le présent guide décrit les sources de variabilité et met l'accent sur la sélection des équipements adaptés pour des opérations de compactage efficaces et rentables. Depuis toujours, les pratiques de sélection des équipements de compactage et de pose des matériaux de sol reposent largement sur des règles empiriques, ou sur l'expérience du passé. Cependant, en raison des délais de construction accélérés et du passage

à des spécifications de performances orientées vers les résultats, les opérations de compactage, bien qu'elles représentent une faible part des coûts totaux de construction, revêtent une importance de plus en plus grande pour la réussite du projet.

Le présent guide décrit les bases des processus de compactage, la sélection de machines de compactage efficaces et l'apparition de technologies d'essai pour l'évaluation de la qualité, avec pour objectif l'optimisation du temps de compactage et la maîtrise du coût des projets. Les indications de sélection des machines font référence au type de matériau, à l'épaisseur cible de la couche, aux besoins de productivité et aux exigences concernant les critères d'évaluation de la qualité (par exemple, compactage relatif, module de réaction de la couche de forme).

Le présent guide est particulièrement destiné aux entrepreneurs qui souhaitent collecter et utiliser des informations sur le sol avant le début des chantiers, afin d'établir des prix spécifiques au chantier et des plans de compactage visant à réaliser le travail correctement du premier coup, afin d'éviter des reprises coûteuses et des retards de construction.

Les technologies de mesure du compactage, telles que Cat® Compaction Control, permettent désormais de surveiller le processus de compactage en termes d'épaisseur de couche, de couverture



en passes, de valeur de mesure du compactage (CMV) et de Machine Drive Power (MDP). La CMV est un paramètre bien connu qui permet aux compacteurs de jouer le rôle d'appareils de mesure qui fournissent des valeurs de paramètres mécaniques des sols (rigidité, résistance) sur la base de l'analyse des vibrations machine-sol. Le MDP est une nouvelle technologie Caterpillar qui augmente les fonctions de ces systèmes.

En mesurant en temps réel les valeurs mécaniques des matériaux compactés à l'aide des données de positionnement GNSS (système de navigation globale par satellite), il est possible de créer des cartes d'évaluation à codes de couleurs. Ces cartes peuvent être reliées aux valeurs de conception pour s'assurer que les matériaux compactés sont conformes aux critères de qualité établis. Cette approche de l'évaluation de la qualité du compactage est novatrice par rapport à l'ancienne méthode d'inspection visuelle. Alors que les spécifications de compactage étaient auparavant orientées sur des spécifications de méthode qui dictaient le processus à suivre, il est maintenant possible d'établir des spécifications de performances orientées vers les résultats, avec une couverture à 100 % en temps réel à l'aide des technologies intégrées. En effet, les technologies de compactage intelligent posent les bases d'un nouveau modèle d'évaluation de la qualité par les organismes concernés dans le monde entier.

Le présent guide associe l'expérience et les connaissances résultant de l'engagement de Caterpillar sur la voie de l'amélioration des équipements et des opérations de compactage. De nombreux entrepreneurs, ingénieurs, organismes officiels et chercheurs ont participé à sa rédaction. Les nouvelles technologies de compactage, notamment la surveillance du compactage intelligent intégrée et les méthodes de prévision des paramètres de fonctionnement seront les moteurs de changements d'envergure dans l'évaluation du compactage, depuis qu'en 1933 Ralph R. Proctor a posé les bases du contrôle de la teneur en eau.

Les utilisateurs du présent guide auront à disposition une ressource pratique contenant les principes de compactage des sols, des informations spécifiques concernant la sélection des machines et l'optimisation du fonctionnement des machines. L'utilisation des informations qu'il contient permettront à l'utilisateur de réduire les risques et d'améliorer la qualité du compactage.

David J. White, Ph.D.  
Associate Professor  
Iowa State University









# INTRODUCTION

Pour construire, il faut compacter.

Caterpillar a le plaisir de vous présenter ce *Guide du compactage des sols*. Il est conçu comme un guide des principes de compactage des sols, des techniques d'essai et des procédures sur le terrain. Il contient une approche pratique d'un sujet théorique relativement complexe. Il est le fruit de dizaines d'années d'expérience dans le génie civil et le terrassement, et des connaissances apportées par les innombrables personnes qui travaillent avec Caterpillar depuis de nombreuses années.

Que vous soyez professionnel de la construction, représentant d'un organisme gouvernemental, formateur ou élève, ou que vous souhaitiez simplement en savoir plus sur les méthodes de construction, ce guide sera une source inestimable d'informations.

Votre concessionnaire Cat est lui aussi une ressource précieuse pour vos applications de terrassement ou de compactage. Le personnel du concessionnaire est formé par des spécialistes Caterpillar pour vous assister et vous fournir les équipements, les services et les connaissances pour optimiser votre production.







# Unité 1

## LES BASES DU COMPACTAGE DES SOLS

La possibilité d'analyser la composition du sol est primordiale dans le processus d'établissement des spécifications de compactage et pour atteindre la capacité portante du sol souhaitée.



### [ QU'EST-CE QUE LE COMPACTAGE ? ]

En termes simples, le compactage est le processus mécanique d'augmentation de la densité d'un matériau. Le sol est rendu plus dense en réduisant les vides entre les particules qui le composent. Avec le temps, le matériau se tasse et se compacte naturellement. En appliquant différentes forces mécaniques, le temps nécessaire au compactage passe de plusieurs années à quelques heures.

Le compactage est un processus nécessaire à quasiment tous les types de projets de construction, dont les routes, les voies ferrées,

les terrains d'aviation, les chantiers/fondations de construction, les canalisations, barrages, canaux, buses et d'autres encore. Si le sol doit soutenir une structure, le compactage est en général nécessaire pour assurer la stabilité de la structure.

Le compactage du sol est réalisé en mettant en œuvre une ou plusieurs forces : pression statique, impact, manipulation et vibration.







### [ POURQUOI LE COMPACTAGE EST-IL IMPORTANT ? ]

Un matériau compacté correctement est en mesure de supporter des charges plus lourdes sans se déformer (courbure, fissuration, déplacement). La couche de forme supportant une structure lourde doit être très dense, faute de quoi elle continue à se compacter sous la charge, ce qui cause le tassement de la structure. Un matériau dense est moins perméable, ce qui réduit l'impact de l'infiltration d'eau. Le compactage permet également de niveler la surface et d'identifier les zones présentant une faiblesse structurelle.

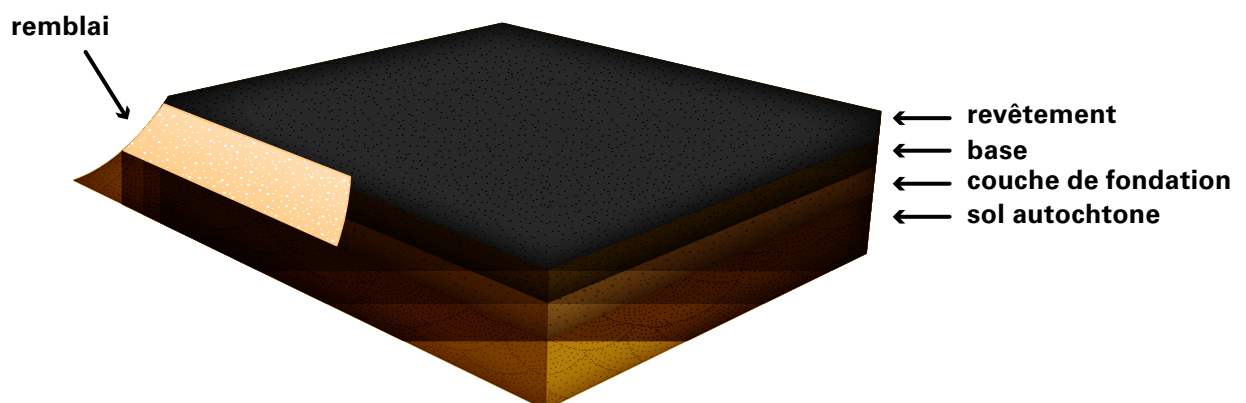
L'examen des différentes couches d'une route conventionnelle est un bon moyen d'illustrer l'importance du compactage. Chaque couche de la route est conçue pour répondre à un besoin technique spécifique, ainsi que pour supporter le poids qu'elle reçoit. Chaque couche doit être

construite avec le matériau, l'épaisseur et la rigidité adaptés. Si une couche n'est pas assez résistante, la route sera défectueuse.

Le compactage a lieu pendant toutes les phases de construction de la route. La qualité du compactage a un impact non négligeable sur la durée de vie de la route, ainsi qu'un effet considérable sur le confort, voire la sécurité, des usagers.

L'élément le moins onéreux permettant de prolonger la durée de vie d'une route est le processus de compactage. L'augmentation de la densité des couches de la route pendant le processus de construction coûte très peu par mètre cube de sol. Le respect des spécifications de densité peut permettre des économies de taille sur les coûts d'entretien et/ou de resurfaçage de la route par la suite.

### SECTION CARACTÉRISTIQUE D'UNE ROUTE





### [ QU'EST-CE QUE LE SOL ? ]

Le sol est composé de matériaux non consolidés constitués de particules minérales pouvant contenir des substances organiques. Les sols sont principalement des sédiments de roches désintégrées lentement dégradées sous l'influence de processus physiques et chimiques.

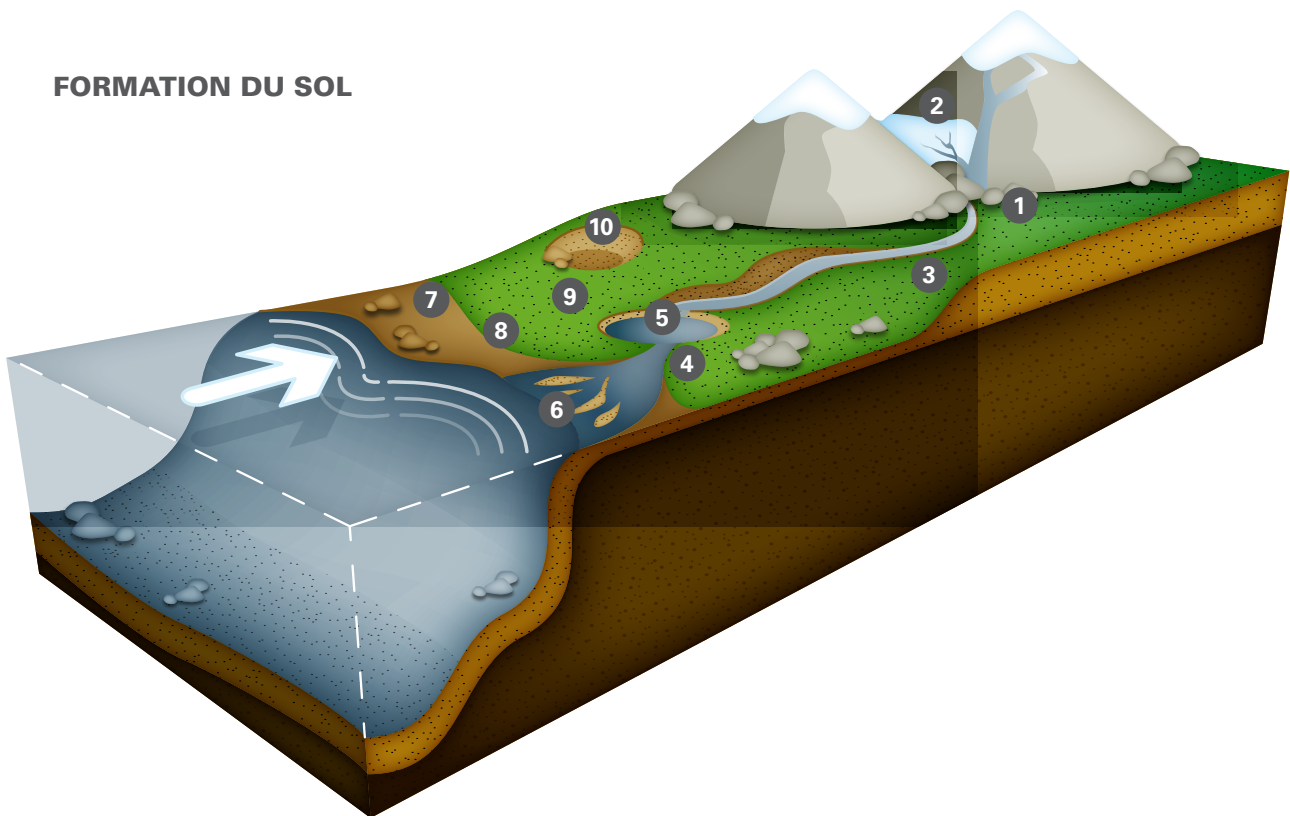
Les processus physiques comprennent le gel et le dégel, le roulement, le broyage et le vent.

Les processus chimiques forment les sols argileux. L'action de météorisation à long terme et les

précipitations jouent un rôle important dans la création de l'argile. L'argile est différente du sable et du gravier en ce qu'elle est composée de petites particules plates présentant une structure en feuillets provenant de différentes roches.

Les substances organiques contribuent elles aussi à la formation du sol. Quand une plante meurt, ses résidus s'intègrent au sol. Les sols à teneur élevée en matières organiques sont en général trop spongieux et meubles pour servir à la construction.

### FORMATION DU SOL



- 1 **sol résiduel**  
roche préexistante désagrégée
- 2 **sédiments glaciaires**  
matériaux transportés ou créés par les glaciers
- 3 **sédiments fluvioglaciaires**  
matériaux transportés par l'eau de fonte des glaciers
- 4 **sédiments fluviaux**
- 5 **sédiments lacustres**
- 6 **sol alluvial**  
sol à granulométrie fine déposé dans les plaines et les estuaires par l'eau
- 7 **sédiments déposés par les vagues**
- 8 **sédiments éoliens**
- 9 **sol organique**  
végétaux décomposés
- 10 **sol créé par l'homme**  
traité par dynamitage et concassage

[ TYPES DE SOL ]

Bien que la composition physico-chimique des sols soit très différente, l'on en distingue six types fondamentaux pour le génie civil : roches, cailloux, gravier, sable, limon et argile.

Ces six types de sols sont en général classés par taille de particules, déterminée à l'aide d'un contrôle de granulométrie au tamis. Tandis que les détails de l'utilisation dans la construction varient par pays,

la taille des tamis est en général définie par des systèmes élaborés par l'une de ces deux sources : l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) [www.iso.org] ou l'American Society for Testing and Materials (ASTM) [www.astm.org]. Ces deux systèmes ne sont pas exactement correspondants, mais sont très similaires. Le pourcentage de sols trop fins pour être triés par tamis est déterminé à l'aide d'un essai au densimètre. (Voir page 14.)

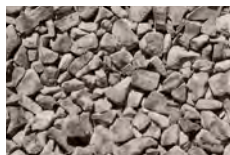
TYPES DE SOL



Roches



Cailloux



Gravier



Sable

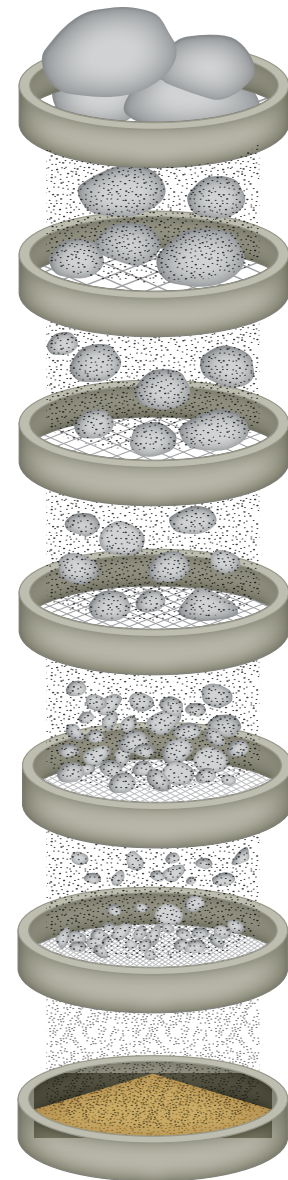


Limon

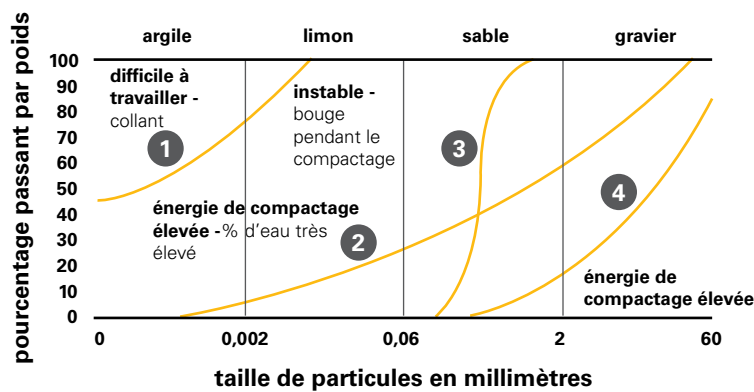


Argile

CONTRÔLE GRANULOMÉTRIQUE



DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE



- 1 limon-argile
- 2 gravier - limon
- 3 sable uniforme
- 4 gravier - sable

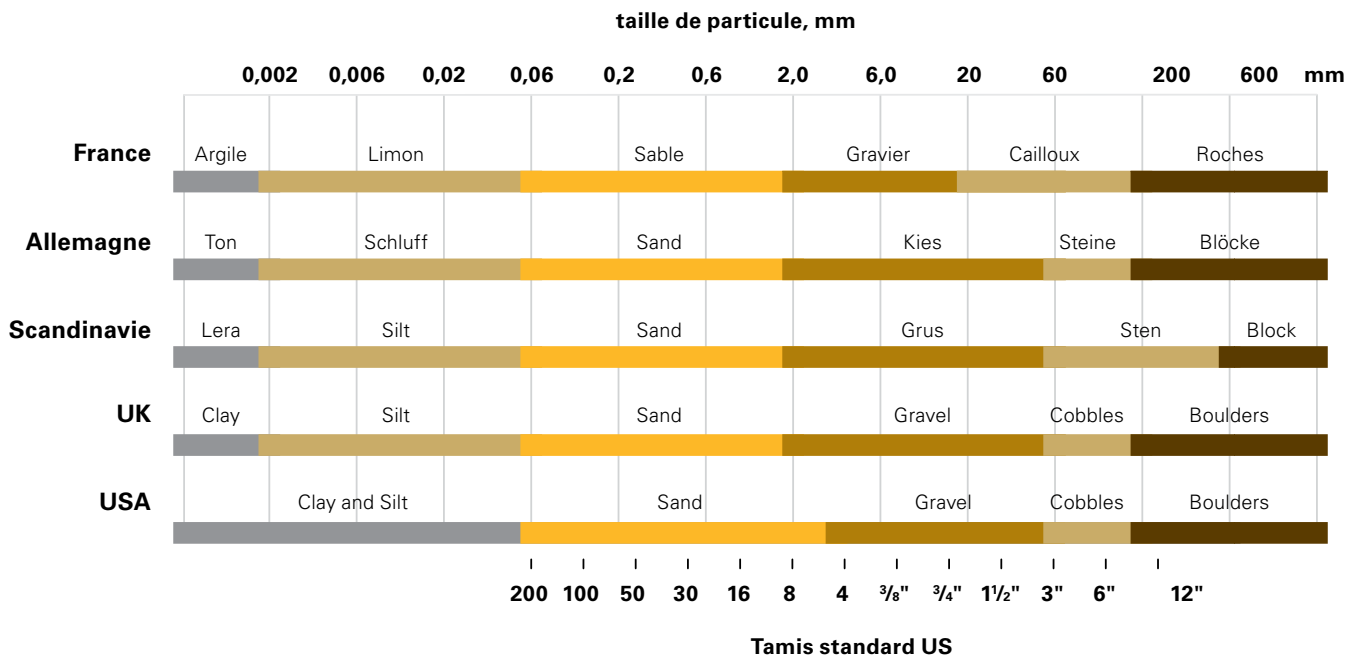


**Essai au densimètre**

L'échantillon de sol est dispersé (en suspension) dans l'eau dans un cylindre gradué.

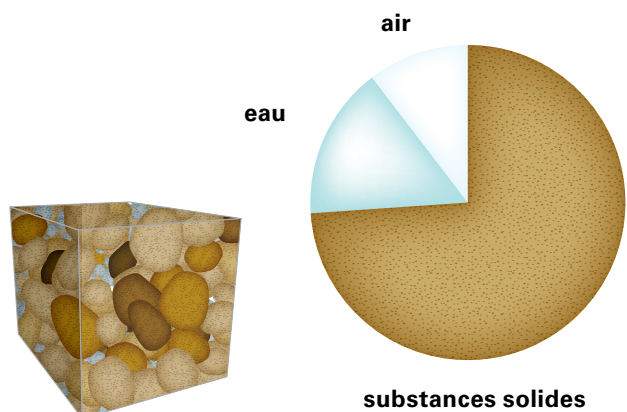
Le temps nécessaire au matériau pour se déposer au fond permet de déterminer les différentes tailles de grain. Un relevé au densimètre de la suspension est effectué pour en déterminer la gravité spécifique, qui permet de calculer le pourcentage de grains pour une taille donnée.

**TABLEAU DE COMPARAISON DES SOLS**



Un matériau de sol est essentiellement un mélange composé de différents pourcentages des types de sols mentionnés ci-dessus. Il est important de comprendre qu'un matériau de sol n'est pas uniquement constitué de solides. Un matériau de sol est un mélange de substances solides (combinaison de types de sol), d'eau et d'air.

**MÉLANGE DU SOL**



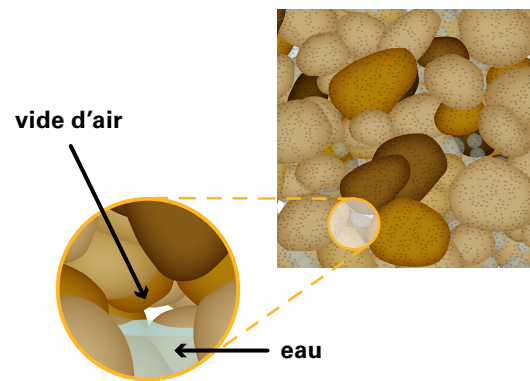


Les sols naturels ou « autochtones » (qui sont déposés naturellement) varient d'un lieu à l'autre. Par exemple, un matériau de sol n'est jamais composé à 100 % d'argile ou de sable, il contient toujours un faible pourcentage d'autres types de sols. Les meilleurs matériaux de sol pour la construction sont souvent une combinaison de pourcentages spécifiques de types de sols sélectionnés, en fonction des caractéristiques techniques recherchées.

Les ingénieurs en géotechnique peuvent concevoir des mélanges de sol présentant ces caractéristiques en spécifiant le pourcentage de chaque type de sol. Les types de sols absents dans un sol autochtone sont ajoutés en proportion souhaitée et mélangés au sol naturel pour créer un sol artificiel. Ces additifs sont souvent définis par analyse économique des matériaux de sol disponibles à proximité.

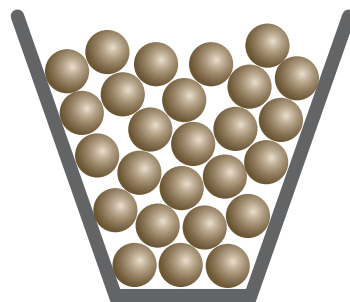
Si l'on examine en détail un échantillon de sol, l'on voit qu'il contient des particules de nombreuses formes et tailles. Les espaces entre les particules

## VIDES AIR/D'EAU



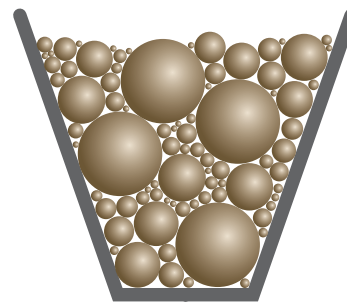
sont nommée « vides ». Les vides peuvent être occupés par de l'air ou de l'eau. Quand un matériau de sol contient trop d'air et d'eau en raison d'un grand nombre de vides, le sol est instable. Le processus de compactage réagence les particules du sol pour réduire le volume et la taille des vides d'air, et rend le matériau plus dense et stable.

## GRANULOMÉTRIE



**granulométrie uniforme ou insuffisante**

Les différentes particules du matériau de sol varient en taille, même si cette différence est légère. La plage de taille des particules est appelée « granulométrie », ou parfois « distribution granulométrique » ou « répartition granulométrique ». Dans l'idéal, toutes les tailles de particules sont réparties relativement uniformément, aucune taille n'étant prépondérante. Un matériau possédant la plage idéale de tailles est dit « à granulométrie étalée ».



**granulométrie étalée**

Les matériaux qui possèdent des particules de taille quasiment identique, telles que les sables alluviaux, ont une « granulométrie uniforme » ou une « granulométrie insuffisante ». Si une ou plusieurs tailles ne sont pas présentes dans le matériau, il est dit « à granulométrie discontinue ». Un sol à granulométrie étalée se compacte plus facilement qu'un sol à granulométrie insuffisante car, grâce à la présence de différentes tailles de grains, les grains plus petits se placent correctement dans les vides entre les grains plus grands.

[ QUATRE TYPES MATÉRIAUX DE SOL ]

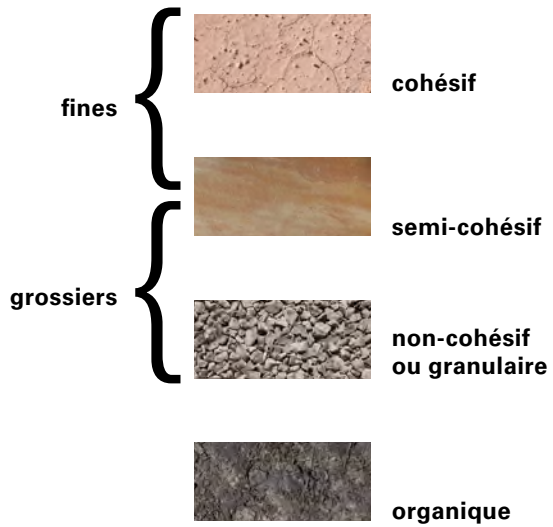
Alors qu'il est parfois utile de connaître la composition exacte du matériau de sol, il est plus réaliste de comprendre comment un matériau de sol réagit quand on lui applique différentes forces. Pour ce faire, les spécialistes du sol classent les matériaux de sol en 4 types de base :

- 1. Cohésif
- 2. Semi-cohésif
- 3. Non-cohésif
- 4. Organique

Chaque type réagit différemment lorsque des forces lui sont appliquées. Le mode de réaction de chaque matériau indique s'il est adapté aux différents projets de construction, ainsi que les moyens nécessaires pour travailler avec chaque sol. Comme indiqué plus haut, les matériaux de sol organiques ne sont pas adaptés à la construction.

Quand un matériau de sol n'est pas adapté à la construction, soit il est remplacé, soit l'on emploie différents moyens pour en améliorer les caractéristiques, processus dit de « stabilisation ». Ces solutions peuvent comprendre la stabilisation chimique (par exemple l'incorporation de ciment Portland, de chaux, de cendre volante ou de chlorure de calcium) et la stabilisation mécanique, qui comprend l'ajout de granulats sélectionnés ou l'utilisation de matériaux géosynthétiques pour renforcer le sol.

TYPES DE MATÉRIAU



Type de sol	Aspect / Toucher	Mouvement de l'eau	Humide	Sec
<b>Sols granulaires, sable fin et limons</b>	Les grains grossiers sont visibles. Toucher granuleux lorsqu'on le frotte entre les doigts.	Quand l'eau et le sol sont mélangés dans la paume de la main, ils se mélangent. Lorsqu'ils ne sont plus agités, ils se séparent.	Plasticité très faible ou nulle.	Force de cohésion faible ou nulle lorsqu'ils sèchent. L'échantillon de sol s'émiette facilement.
<b>Sols cohésifs, mélanges et argiles</b>	Les grains ne sont pas visibles à l'œil nu. Toucher lisse et gras lorsqu'on le frotte entre les doigts.	Quand l'eau et le sol sont mélangés dans la paume de la main, ils ne se mélangent pas.	Plastique et collant. Peut être roulé.	Grande résistance lorsqu'il est sec. S'émiette difficilement. Faible saturation dans l'eau.



## [ IMPORTANCE DE LA TENEUR EN EAU ]

L'on n'insistera jamais assez sur l'importance de l'eau dans le processus de compactage du sol. Chaque type de sol a des caractéristiques physiques qui définissent sa réaction à l'humidité. Chaque matériau de sol a une teneur en eau qui en optimise les propriétés techniques pour une énergie de compactage donnée. En général, plus la taille de particules est petite, plus l'influence de l'eau est grande pour le compactage.

Si un sol a une humidité trop faible, le matériau sera difficile à travailler parce qu'il manquera aux particules la lubrification nécessaire pour qu'elles se réagencent dans un état plus dense. Par ailleurs, les particules ne seront pas assez cohésives pour rester où elles se sont déposées.

De l'eau est ajoutée pour augmenter la cohésion et la lubrification. Trop d'eau peut causer la saturation du sol. Quand le sol est saturé, les vides se

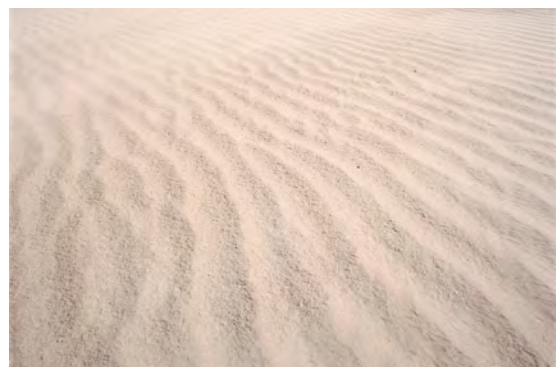


remplissent d'eau et réduisent la capacité portante de la structure. Les particules sont également sur-lubrifiées, ce qui leur permet de se déplacer facilement.

Pour donner un exemple simple de la façon dont l'eau affecte les propriétés techniques d'un sol, imaginons que nous essayions de construire un château de sable sur une plage. L'eau contenue dans le sable donne une cohésion suffisante pour permettre de le mouler en mur épais et en tours hautes. Imaginons maintenant que nous construisons le même château de sable dans le désert. Le sol des déserts arides manque de cohésion, il serait par conséquent difficile d'obtenir plus que quelques monticules bas de sable.



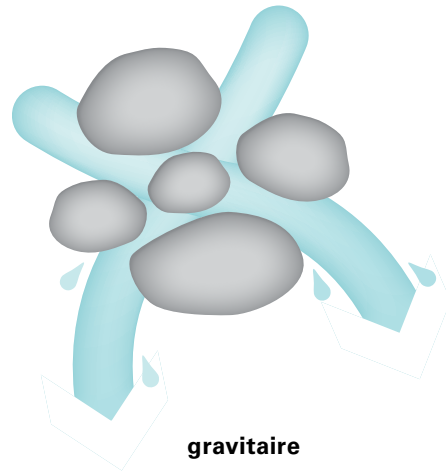
L'eau a également d'autres effets. Comme elle résiste à la compression, elle déplace les matériaux du sol, causant leur instabilité. L'eau gelée augmente de volume et déplace le sol autour d'elle. Quand l'eau gelée dégèle, elle occupe un volume moindre et crée de l'espace qui cause un tassement.



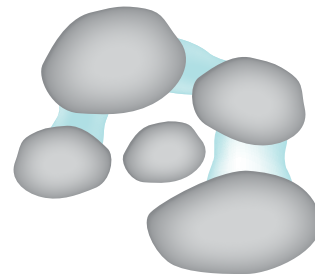
L'eau est présente dans tous les sols à l'état naturel. Elle apparaît sous l'une des trois formes suivantes.

1. L'eau gravitaire est libre de se déplacer vers le bas sous l'effet de la force de gravité. Elle est drainée naturellement dans le sol.
2. L'eau capillaire est retenue dans le sol par de petits pores ou vides. Elle est considérée comme de l'eau libre et ne peut être enlevée qu'en abaissant le niveau supérieur de la nappe ou par évaporation.
3. L'eau hygroscopique est présente dans un sol une fois l'eau gravitaire et l'eau capillaire enlevées. Les grains du sol retiennent cette eau sous forme de film très fin ayant une affinité physique et chimique pour les grains. Elle est également nommée teneur en eau du sol « séché à l'air ». Cette eau doit être supprimée en cuisant le sol dans un four pour déterminer le poids sec réel du sol.

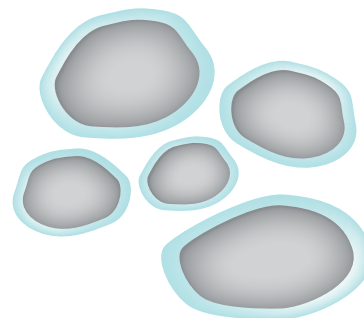
Une humidité trop importante sur-lubrifie le sol et cause une instabilité des particules, tandis qu'une humidité trop faible réduit la cohésion et empêche les particules de s'orienter facilement dans un état plus dense. Pour chaque type de sol, il y a une teneur en eau idéale, à laquelle il est possible d'obtenir une densité maximum avec une énergie de compactage donnée. L'essai Proctor a été conçu pour permettre de définir la teneur en eau optimum pour l'énergie de compactage sélectionnée.



**gravitaire**



**capillaire**



**hygroscopique**



## [ ESSAI PROCTOR ]

L'intérêt de compacter la couche de base et de fondation des sols est connu depuis longtemps. Ce n'est cependant qu'en 1933 que Ralph R. Proctor, du Los Angeles Bureau of Water Works, a mis au point une méthode normalisée de détermination de la teneur en eau optimum et de la densité sèche maximum correspondante. Pour l'essai Proctor, une dame à actionnement manuel a été utilisée pour compacter les trois couches de sol placées dans un moule fermé.

L'essai Proctor normal détermine la teneur en eau optimum d'un matériau qui permet à une force de compactage appliquée d'obtenir la densité sèche maximum du matériau. Ce résultat sert à créer des spécifications de compactage sur le chantier. Étant donné que les conditions sur le terrain ne correspondent pas aux conditions idéales en laboratoire, le compactage cible est exprimé en pourcentage de la densité sèche déterminée en laboratoire. Il peut aller de 90 % à plus de 100 %.

Des essais de compactage modifiés ont également été mis en place en lien avec des structures pour lesquelles une portance supérieure était nécessaire, pour supporter des charges extrêmement lourdes ou pour limiter le tassement. L'essai de compactage modifié applique une énergie environ 4 fois plus grande que l'essai de compactage normal et a en général pour résultat une teneur en eau « optimum » plus faible.



*Kit d'essai Proctor de laboratoire*

### **Densité sèche supérieure à 100 %**

Comment la densité cible peut-elle être supérieure à 100 % ? La densité sèche maximum établie par l'essai Proctor n'est pas la densité maximum sur le terrain pouvant être obtenue sur un sol donné. Une densité sèche Proctor de 100 % représente la densité maximum obtenue en laboratoire avec l'échantillon donné, avec une force de compactage donnée et une teneur en eau idéale. Les essais Proctor normal et modifié utilisent différents poids et atteignent ainsi différentes densités sèches pour un même échantillon. Sur les terrains, les « coups » viennent d'un gros compacteur qui applique une force différente de celle appliquée par les dames des essais Proctor. Il n'est pas rare d'atteindre des densités sur le terrain de 100 à 115 % de la densité sèche maximum Proctor. Les ingénieurs en géotechnique peuvent définir qu'en raison des exigences de portance et des caractéristiques du sol, une densité de compactage de plus de 100 % Proctor est garantie.



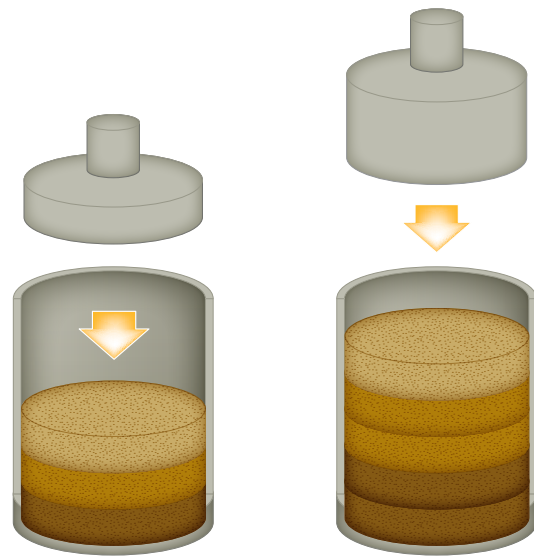
Pour un échantillon de sol donné, l'essai Proctor normal ou modifié est effectué 5 fois. La même procédure est répétée à chaque fois, mais la teneur en eau varie.

La série commence avec le sol à l'état humide, un peu en dessous de la teneur en eau optimale supposée. Une fois que le premier échantillon est compacté dans un moule cylindrique, son poids humide est mesuré et une partie de l'échantillon est placée dans une étuve de séchage. Quand l'échantillon est entièrement sec, il est à nouveau pesé. La différence entre le poids humide et sec donne la teneur en eau, exprimée en pourcentage du poids sec.

Un deuxième échantillon, dont la teneur en eau est augmentée, est compacté, et le processus de pesage et de séchage est répété. Les autres échantillons, avec une teneur en eau croissante, sont traités jusqu'à ce que la densité humide baisse ou que le sol devienne trop humide pour pouvoir travailler.

Les valeurs de densité sèche de chaque échantillon sont représentées par points en fonction de la teneur en eau et une courbe lissée est créée. Le point le plus haut de la courbe représente la densité sèche maximum et la teneur en eau optimum pour l'échantillon de sol donné.

## ESSAIS PROCTOR



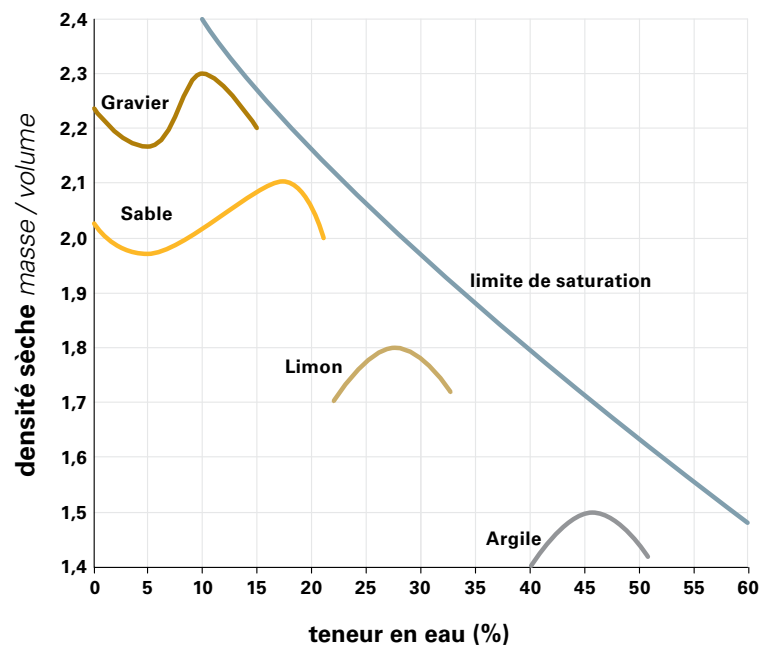
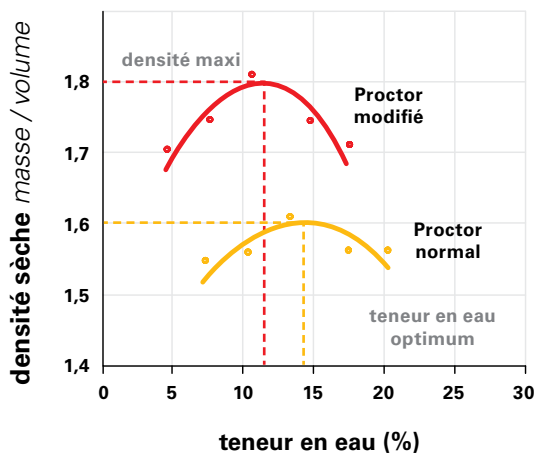
**normal**

**modifié**

Chaque couche reçoit 25 coups d'une dame de 2,5 kg (5,5 lb) à une distance de 305 mm (12 in)

Chaque couche reçoit 25 coups d'une dame de 4,5 kg (10 lb) à une distance de 457 mm (18 in)

## COURBES DE PROCTOR

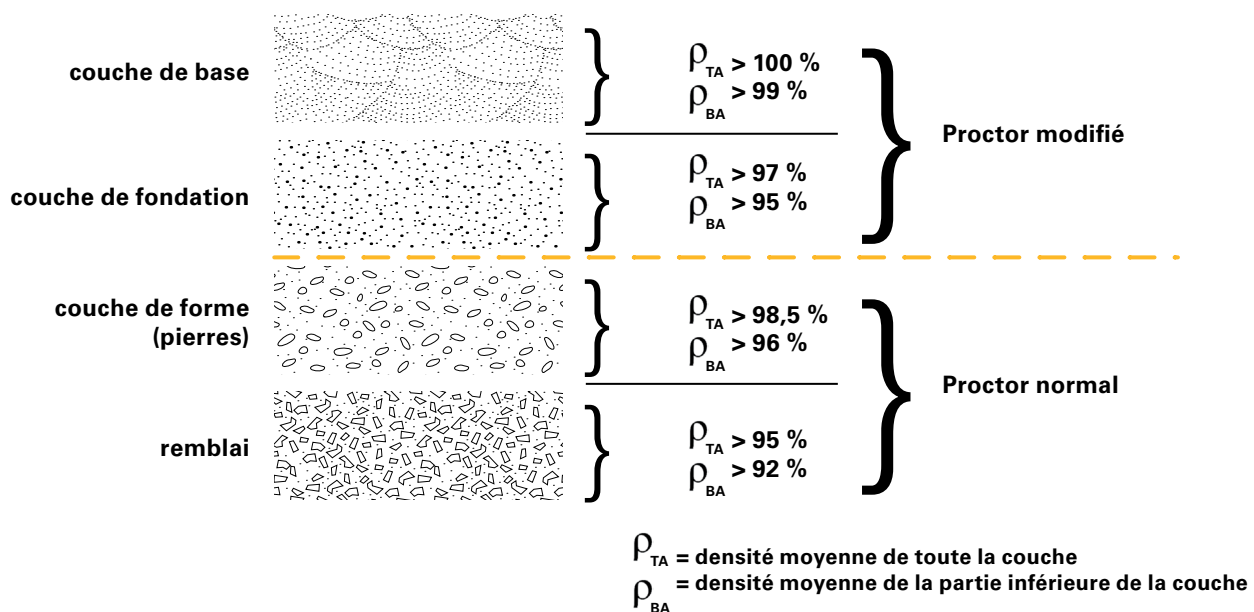


Les essais en laboratoire déterminent la teneur en eau à laquelle il est possible d'atteindre la densité maximum pour ce matériau de sol particulier. Les densités cibles sur le terrain sont exprimées en pourcentage de la densité sèche maximum en laboratoire. En général, les densités sur le terrain requises sont de 95 % de l'essai Proctor normal

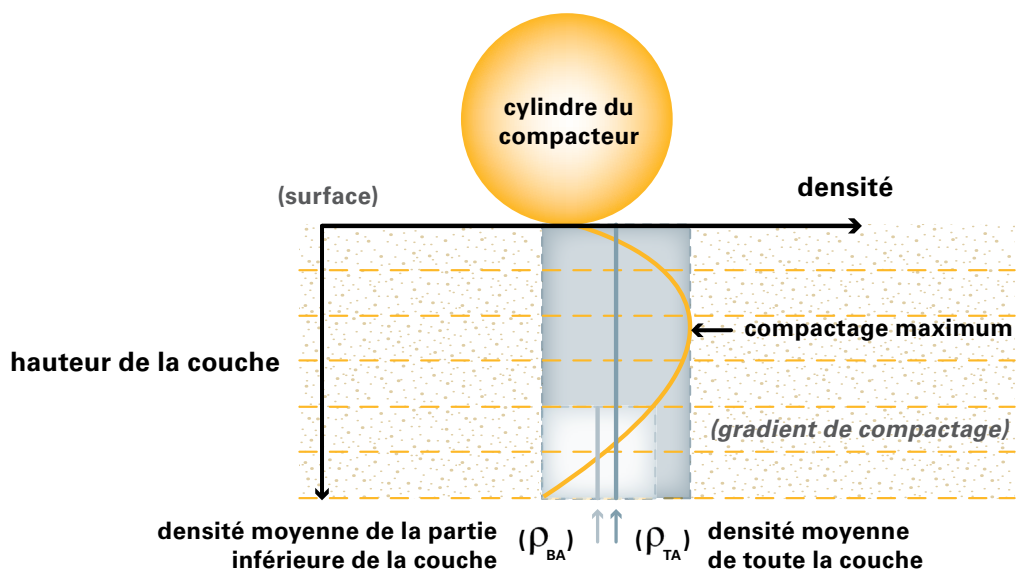
pour les remblais et jusqu'à 100 % de l'essai Proctor modifié pour les fondations de chaussées. De même, la teneur en eau doit être comprise dans une plage donnée de la teneur en eau optimum déterminée en laboratoire.

### DENSITÉS CIBLES

Cet exemple montre que plus le matériau est proche de la surface, plus sa densité est élevée.



Cette illustration du gradient de compactage compare la densité moyenne de toute la couche ( $\rho_{TA}$ ) et la densité moyenne de la partie inférieure de la couche ( $\rho_{BA}$ ).



### [ PROPRIÉTÉS DU SOL ]

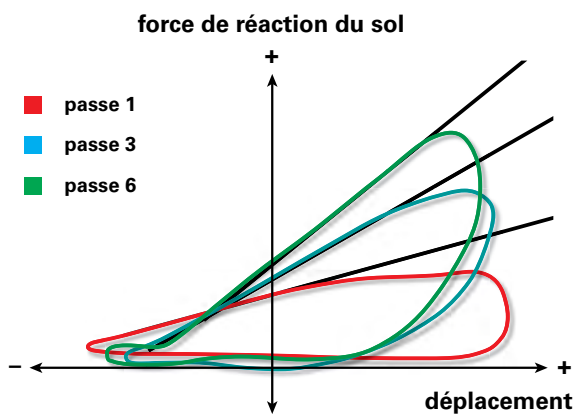
Les ingénieurs utilisent en général un certain nombre de termes pour définir les caractéristiques et les propriétés des différents sols. Il est essentiel de comprendre ces termes pour comprendre les principes et techniques de compactage des sols.

La **capacité portante** est la propriété primordiale d'une chaussée. Elle indique la capacité d'une structure à supporter la charge qu'elle porte. L'évaluation de la capacité portante est en général réalisée en procédant à un roulage d'essai à l'aide d'un camion benne chargé et en observant l'orniérage ou en procédant à des essais à la table. Dans la construction routière, d'autres propriétés telles que le module, la rigidité et la densité sont en général utilisées pour fournir un objectif de travail pour déterminer la capacité portante.

La **rigidité** est la capacité d'une certaine forme de matériau à résister au fléchissement sous charge ; elle est calculée comme le rapport de contrainte divisé par le déplacement. Contrairement au module élastique, ce n'est pas une propriété du matériau de sol en soi. La rigidité est la propriété d'une certaine quantité, forme et composition de matériau de sol (fléchissement de cette forme du matériau sous charge). Pour cette raison, la rigidité a été reconnue comme un moyen valide d'estimer la capacité portante d'un sol.



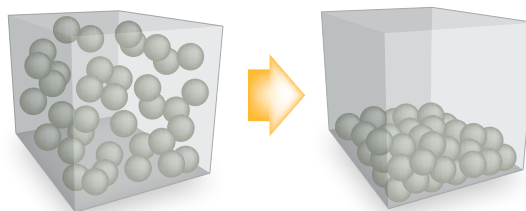
### RIGIDITÉ



*Plus la courbe est inclinée, plus le sol est rigide.*

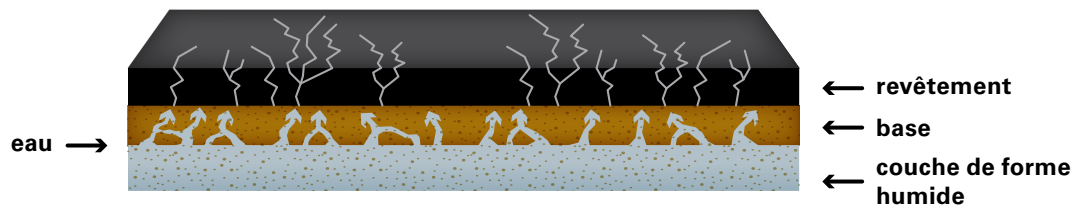
La **densité** est le calcul de la masse d'un matériau divisée par le volume qu'il occupe. La densité maximum est le volume minimum que la masse d'un matériau donné peut occuper. Il s'agirait d'une masse entièrement solide sans vides. Il est possible de rendre les matériaux de sol plus denses en les compactant d'un volume donné en un volume plus petit. La densité est conventionnellement la propriété standard utilisée par les ingénieurs pour estimer la capacité portante. Cependant, étant donné qu'une densité élevée n'est pas corrélée au fléchissement et peut causer la fragilité ou la dégradation de certains matériaux, la prépondérance de la densité en tant que critère principal d'évaluation de la capacité portante s'est amoindrie. Il s'agit tout de même d'une propriété nécessaire et fiable pour l'évaluation de la capacité portante de la route.

### DENSITÉ





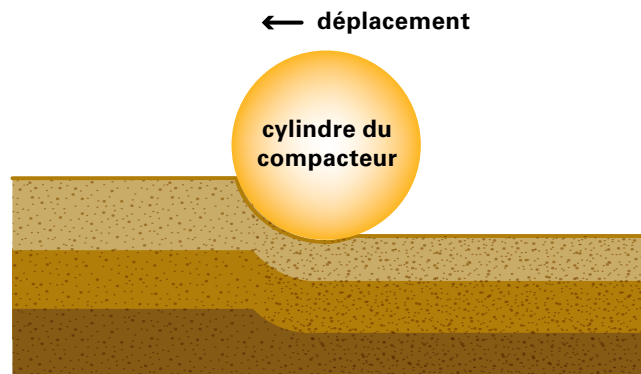
## CAPILLARITÉ



La **capillarité** est la capacité d'un sol à déplacer l'eau vers le haut et latéralement. Il est souhaitable que le matériau de base utilisé comme couche entre la couche de forme et le revêtement d'une route agisse comme une barrière capillaire, empêchant le déplacement de l'eau depuis la couche de forme vers le haut par capillarité. Une fondation de matériaux granulaires permet de drainer l'eau hors de la couche de forme. L'eau capillaire est retenue dans les petits pores ou

vides du sol. Elle est considérée comme de l'eau libre, mais elle ne peut être enlevée qu'en abaissant le niveau supérieur de la nappe, par une charge lourde durable ou par évaporation. Sans barrière capillaire dans la base, l'eau piégée ramollit et augmente le volume de la couche de forme, avec pour conséquence une surface non soutenue uniformément et une détérioration prématurée de la chaussée.

## COMPRESSIBILITÉ

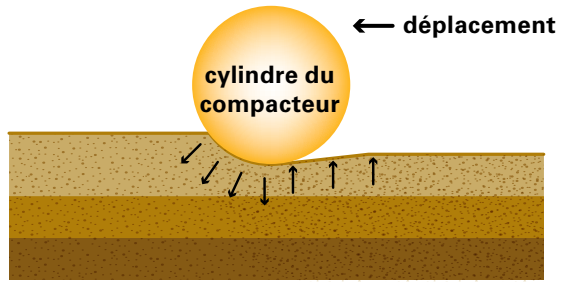


La **compressibilité** est le degré de réduction de volume d'un sol lorsqu'une force lui est appliquée. Les sols à compressibilité élevée ont des particules qui se réorientent facilement pour réduire l'espace à disposition des vides d'air ou d'eau. Dans des conditions humides, les sols argileux ont une plus grande compressibilité que les sols granulaires.

Ils ont cependant une perméabilité inférieure, ce qui rend les sols argileux très lents à se drainer et à compresser. Quand les charges sont appliquées rapidement, par exemple sous la charge de roues en mouvement, de la pression d'eau se forme dans les sols à faible granulométrie et en augmente la compressibilité.

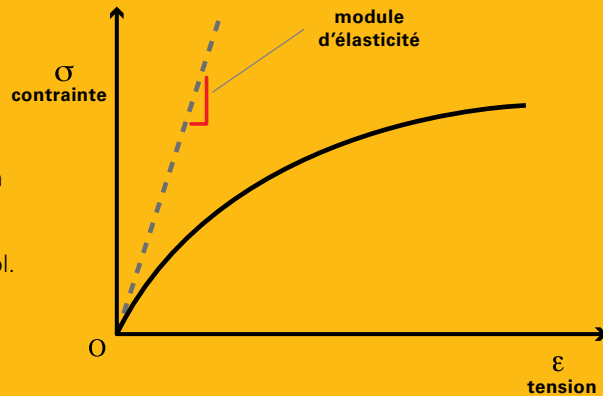
L'**élasticité** est la tendance d'un sol à se déformer et à revenir à sa forme d'origine ou presque une fois la charge de compression enlevée. L'élasticité peut être une caractéristique souhaitable pour les sols, par exemple pour supporter des charges variables sans accumulation de déformation permanente. Cependant, les routes à couche de base ou de forme très élastique sont peut performantes si le module d'élasticité est trop faible, avec pour conséquence de fortes tensions dans les couches de revêtement. La stabilisation mécanique et chimique sont souvent utilisées pour maîtriser le comportement élastique des sols et bases. Les sols organiques ont une élasticité très élevée mais un faible module d'élasticité.

### ÉLASTICITÉ

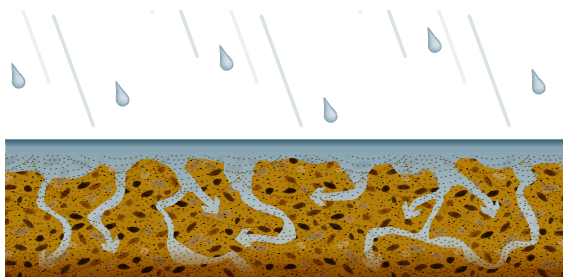


### Module d'élasticité

Il s'agit du calcul du rapport des contraintes appliquées et de la tension d'un matériau de sol. Il est considéré comme une qualité de l'échantillon de sol testé et peut varier en fonction de la composition du matériau de sol. Le module est souvent utilisé pour fournir une indication concernant la capacité portante du matériau de sol. L'épaisseur de la couche de revêtement dépend en général de l'évaluation du module d'élasticité sous-jacent.



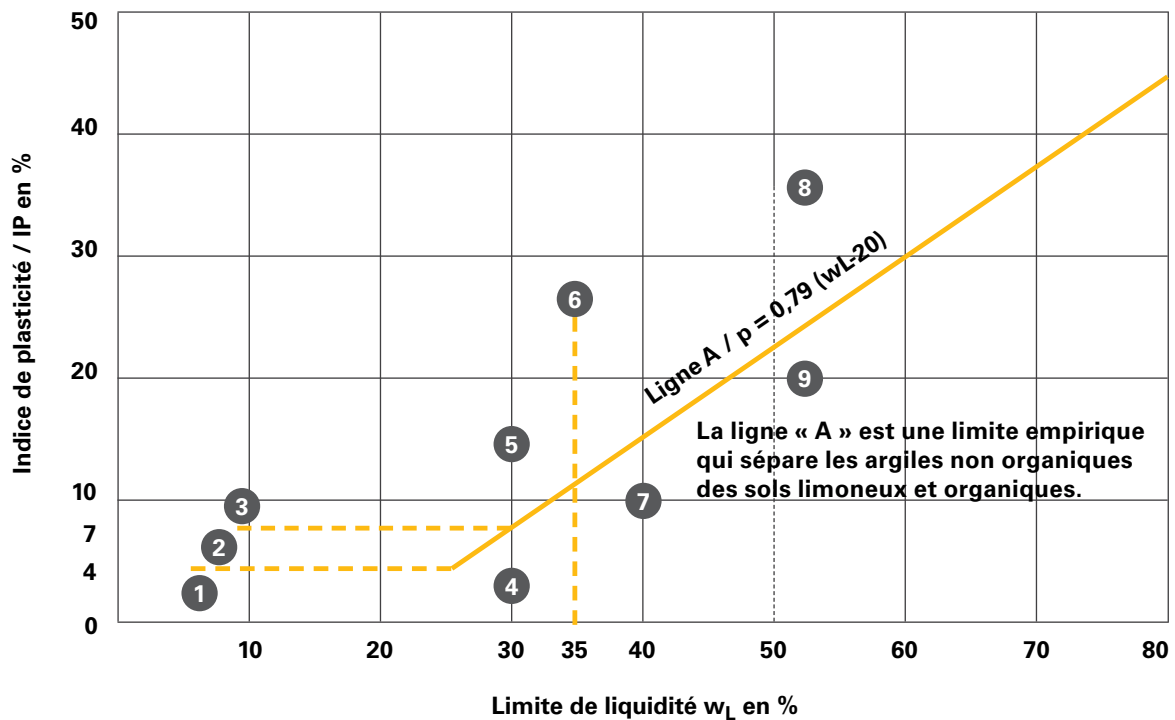
### PERMÉABILITÉ



La **perméabilité** est la facilité d'écoulement de l'eau dans un sol. Elle diffère de la capillarité, qui est l'aptitude du sol à absorber l'eau. La texture, la granulométrie et le degré de compactage du sol influencent sa perméabilité. La perméabilité est le paramètre du sol le plus variable, avec des variations de valeur allant jusqu'à 10 ordres

d'amplitude. En général, les sols à gros grains sont plus perméables que les sols à grains fins car ils présentent plus de vides entre leurs particules.

## PLASTICITÉ



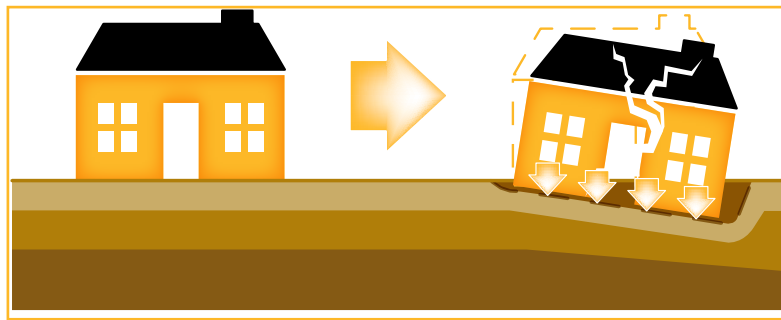
- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| ① Mélanges sable-limon          | ⑥ Argiles moyennement plastiques  |
| ② Plage intermédiaire           | ⑦ Limons avec mélanges organiques et limons organogènes, et limons moyennement plastiques |
| ③ Mélanges sable-argile         | ⑧ Argiles distinctement plastiques  |
| ④ Limons légèrement plastiques  | ⑨ Argiles avec mélanges organiques et limons distinctement compressibles                  |
| ⑤ Argiles légèrement plastiques |   |

La **plasticité** indique le degré de cohésivité et la nature déformable du sol. La mesure de la plasticité s'exprime en indice de plasticité (IP). De nombreux sols argileux ont un IP élevé, sont relativement compressibles et ont un degré de cohésion élevé.

Un sol avec un  $IP=0$  est sans cohésion ou non plastique. La teneur en eau d'un sol affecte également son IP.



TASSEMENT

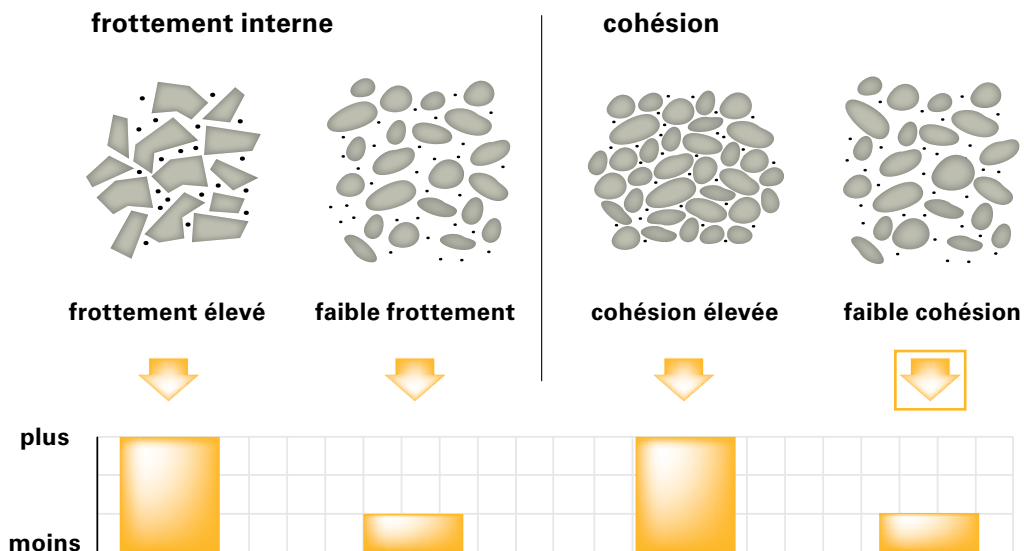


tassement

Le **tassement** est le processus d'abaissement du niveau de la surface dû à la consolidation du matériau de remblayage. Le tassement est le résultat d'un compactage inadéquat. Avec le temps, les particules du sol mal compactées se réorientent

naturellement et réduisent l'espace disponible pour l'air ou l'eau. La conséquence en est le tassement, qui est directement lié à la réduction du volume des vides.

LA RÉSISTANCE AU CISAILEMENT DÉPEND DE...

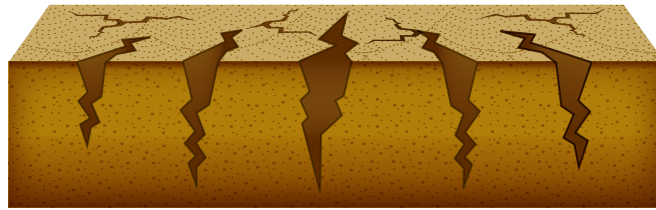


Force de compactage nécessaire pour surmonter la résistance au cisaillement

La **résistance au cisaillement** est la résistance des particules du sol au glissement l'une sur l'autre quand une force est appliquée, par exemple, une vibration ou une force de compactage. La résistance au cisaillement d'un sol est le résultat du frottement interne (résistance au glissement

l'une sur l'autre) et de la cohésion (attraction l'une vers l'autre). Les particules de forme irrégulière ont une résistance au cisaillement plus élevée que les particules de forme régulière. Plus la résistance au cisaillement est grande, plus la force de compactage nécessaire pour obtenir la densité est élevée.

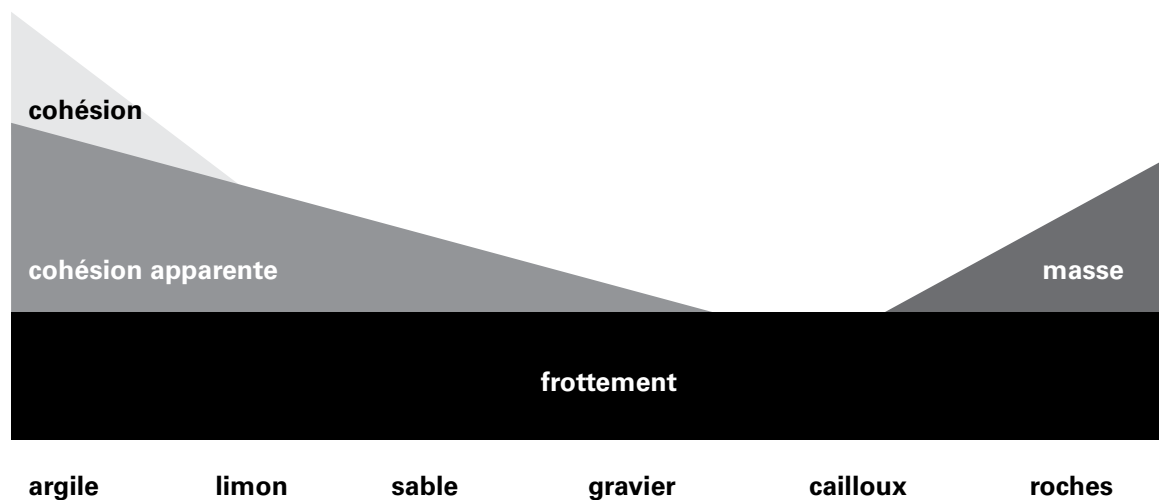
## RETRAIT



Le **retrait visible ou foisonnement** indique qu'un sol est à grains fins, l'argile par exemple. Le cycle de retrait et de foisonnement est le résultat de la libération et de la formation d'humidité dans le sol.

Ce type de sol donne de mauvaises fondations, car les variations constantes de volume peuvent causer des défauts structurels des bâtiments ou revêtements qui dépendent d'un support stable.

## COMPACTIBILITÉ



**Compactibilité** : Pendant le processus de passage du sol de l'état meuble à l'état dense, la facilité ou taux de compactage est souvent nommée compactibilité. La compactibilité peut être quantifiée comme le rapport de la différence entre la densité finale moins la densité initiale, divisée par la densité initiale. Plus le rapport de compactibilité est élevé, plus la densité change facilement et rapidement pour l'énergie de compactage appliquée. Les facteurs affectant

la compactibilité comprennent la granulométrie du sol (les sols à granulométrie étalée tendent à avoir une compactibilité supérieure à celle des sols à granulométrie discontinue), la teneur en eau, la résistance au cisaillement (résistance à la déformation), l'énergie de compactage et la méthode. La compréhension des facteurs qui contribuent à augmenter la compactibilité permet de sélectionner correctement les équipements et d'assurer l'efficacité des opérations de compactage.

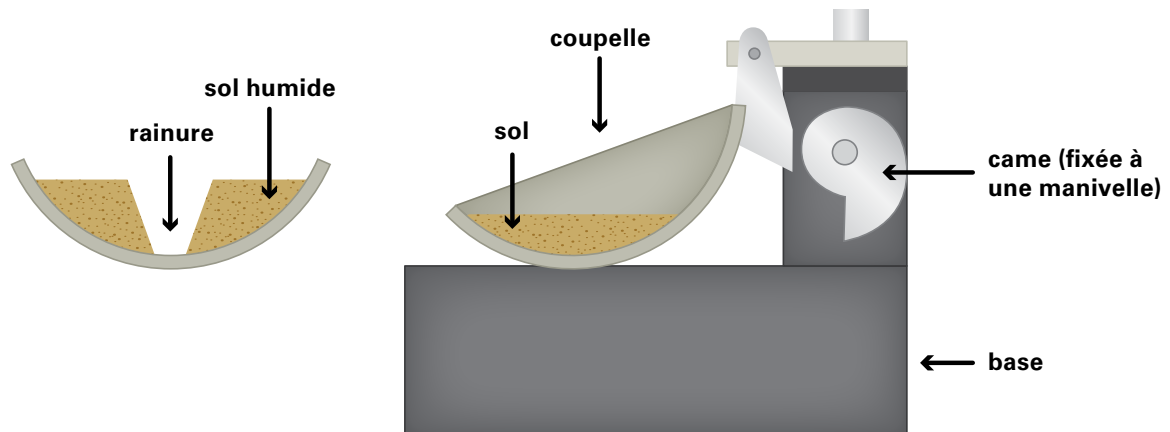
### [ LIMITES DU SOL ]

L'on comprend mieux l'influence de la teneur en eau sur la compactibilité d'un sol cohésif (argile) en étudiant les limites du sol.

Le chimiste suédois Albert Atterberg a été le premier à établir certaines limites de consistance

du sol : limite de liquidité, limite de plasticité, indice de plasticité et indice de retrait. Parfois nommées les limites d'Atterberg, elles forment les bases de la différenciation entre les matériaux hautement plastiques, légèrement plastiques et non plastiques.

### ESSAI DE LIMITE DE LIQUIDITÉ (LL)



dispositif d'essai de limite de liquidité simple

#### Limite de liquidité (LL)

La teneur en eau à laquelle le sol passe d'un état plastique à un état liquide est la limite de liquidité. Ceci signifie que le sol est assez humide pour dépasser le frottement interne et la cohésion.

Un essai simple a été mis au point pour déterminer la limite de liquidité d'un sol. Prenez un échantillon de sol et placez-le dans une petite coupelle, en aplatissant un peu l'échantillon. Ménagez une rainure profonde dans l'échantillon et tapez le fond de la coupelle 10 à 30 fois, en observant la rainure. Si les faces de la rainure restent éloignées de la même distance, ajoutez plus d'eau, et répétez le processus. Quand les faces de la rainure se rapprochent sur une longueur de 15 mm ( $\frac{1}{2}$ " ), l'échantillon est devenu liquide et a atteint sa limite de liquidité.

Des valeurs de LL élevées sont associées à des sols à haute compressibilité. En général, les argiles ont des valeurs de LL élevées, les sols sableux des valeurs de LL basses.

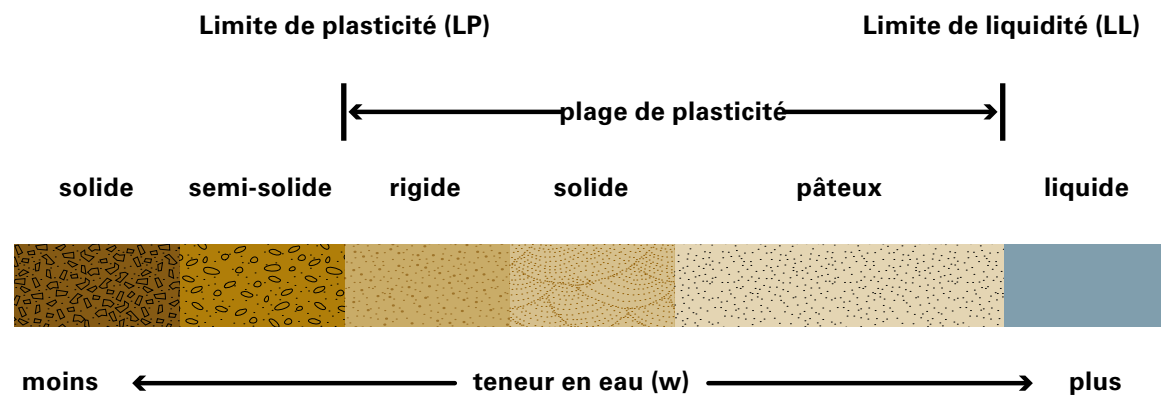
#### Limite de plasticité (LP)

Cette condition existe quand un sol passe de l'état semi-solide à l'état plastique. Ceci se produit quand le sol contient juste assez d'humidité pour qu'une petite quantité puisse être roulée en un fil de 3 mm de diamètre environ ( $\frac{1}{8}$ " ) sans se casser.

La LP d'un sol est importante parce qu'elle représente la teneur en eau à laquelle les particules glissent les unes sur les autres tout en conservant une cohésion appréciable. C'est le point de compactage optimum avec les sols à teneur élevée en argile. La résistance du sol baisse rapidement à mesure que la teneur en eau augmente au-delà de la limite de plasticité.



## INDICE DE PLASTICITÉ (IP)



### Indice de plasticité (IP)

Il s'agit de la différence numérique entre la limite de plasticité et la limite de liquidité d'un sol. Les sols ayant un IP élevé sont relativement compressibles et ont un degré de cohésion élevé. Le sol a peu ou pas de cohésion quand la teneur en eau est à la limite de liquidité mais a une cohésion considérable quand la teneur en eau est à la limite de plasticité. Par conséquent, l'IP est un moyen d'estimer la compressibilité et la cohésion d'un sol.

L'IP concerne également la perméabilité. Plus l'IP est élevé, plus la perméabilité est faible, plus il est bas, plus elle est élevée. Sur de nombreux chantiers impliquant de construire avec des sols à teneur en argile élevée, les spécifications exigent un matériau ayant une granulométrie donnée, une LL et un IP maximum.

### Limite de retrait (LR)

Quand le sol est séché en dessous de la limite de plasticité, il se rétracte et devient fragile. La limite de retrait est déterminée à la teneur en eau à laquelle le changement de volume s'arrête. La LR est l'humidité optimum à laquelle de nombreux sols non plastiques (sableux) doivent être compactés. Les sols contenant assez d'argile pour augmenter l'IP sont compactés de façon optimum entre la LR et la LP.







## Unité 2

# TYPES DE SOLS ET CLASSIFICATIONS

Quand ceci est possible, les essais de sol en laboratoire sont la meilleure façon de classer les sols. Quand ceci n'est pas possible, vous pouvez réaliser un ou plusieurs essais sur le terrain pour vous aider à identifier les sols et à déterminer l'approche nécessaire pour le compactage.





[ **SYSTÈMES DE CLASSIFICATION DU SOL** ]

Plusieurs systèmes de classification du sol sont utilisés dans le monde. Tous utilisent les termes gravier, sable, limon et argile, mais présentent des différences de numérotation et de désignation.

Le but des classifications du sol est d'établir des normes d'identification des sols et de leurs caractéristiques techniques.

**Système de classification du sol AASHTO –**

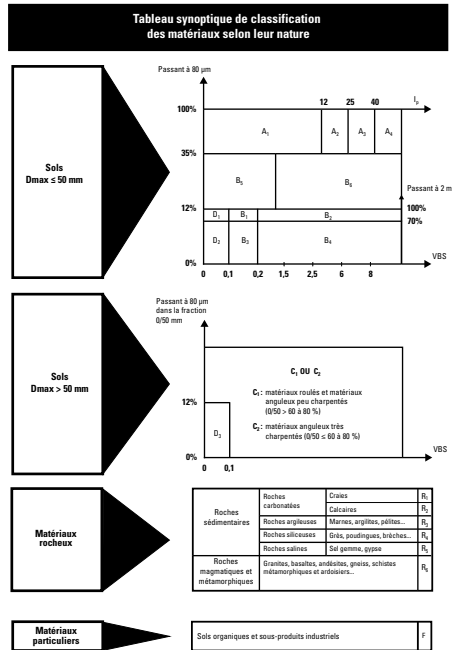
Le système de classification du sol de l'American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO) est très répandu et repose sur les performances sur le terrain des sols pour la construction de chaussées. Le système divise les matériaux en sept groupes principaux avec quelques sous-groupes. Ces groupes sont classés en deux catégories principales : matériaux granulaires et matériaux limo-argileux.

AASHTO CLASSIFICATION OF HIGHWAY SUBGRADE MATERIALS (with suggested subgroups)										
General Classification	Granular Materials (35% or less passing #200)						Silt-Clay Materials (more than 35% passing #200)			
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7
Group Classification	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7		A-7-5	A-7-6
Sieve Analysis Percent Passing:										
# 10	0-50	0-50	51-100	0-35	0-35	0-35	0-35	38-100	38-100	38-100
# 40	0-30	0-25	0-10							
# 200	0-15	0-25	0-10							
Characteristics of Fraction Passing #40:										
Liquid Limit			N.P.	0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+	0-40
Plasticity Index	0-6			0-10	11+	0-10	11+	0-10	11+	0-10
Group Index	0	0	0	0	0	0-4	0-8	0-12	0-16	0-20
Usual Types of Significant Constituent Materials	Stone Fragments Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand			Silty Soils		Clayey Soils	
General Rating as Subgrade	Excellent to Good						Fair to Poor			

Les tableaux complets figurent en annexe.

**Système français de classification du sol –**

Ce système classe les matériaux en classes et sous-classes en fonction de l'analyse mécanique de leurs propriétés, dont la répartition granulométrique, la plasticité et l'équivalent de sable.



**Système allemand de classification du sol –**

La norme DIN18196 classe tous les matériaux de sol destinés à la construction en différents groupes sur la base de leur granulométrie conformément à la norme DIN4022, des proportions de masse, de la plasticité et de la présence de composants organiques et calcaires. En général, les particules grossières et fines sont évaluées différemment, car les particules grossières ont un critère de distribution granulométrique et les fines ont un critère de plasticité.

Hauptgruppe	Korngrößenanteil < 0,06 mm	Korngrößenanteil > 2,0 mm	Gruppe (abgekürzt)	Gruppe (detailliert)	Kurzzeichen, Gruppenzusatz
Cobblinger Boden	< 5	< 40	Kies	Enggestufte Kies	GE
				Mittelgestufte Kies-Sand-Gemische	EW
				Trennmaterial gemachte Kies-Sand-Gemische	EL
Gesteinsschuttiger Boden	5 bis 40	< 40	Sand	Enggestufte Gerölle	SE
				Mittelgestufte Sand-Kies-Gemische	EW
				Trennmaterial gemachte Sand-Kies-Gemische	SL
				5 bis 15 Bew.-% < 0,06 mm	SU
				15 bis 40 Bew.-% < 0,06 mm	SU*
				5 bis 15 Bew.-% < 0,06 mm	ST
Feinkörniger Boden	< 40	< 40	Sand-Schluff	5 bis 15 Bew.-% < 0,06 mm	SU*
				15 bis 40 Bew.-% < 0,06 mm	ST
				5 bis 15 Bew.-% < 0,06 mm	ST*
				Leichte plastische Ton W<sub>L50</sub>	TL
				Mittelschwere Ton W<sub>L50</sub>	TM
				Mittelschwere Ton W<sub>L50</sub>	TL
Organischer Boden	< 40	-	Schluff	Organische Schluffe W<sub>L50</sub>	OU
				Mittelschwere Schluffe W<sub>L50</sub>	UM
				Leichte plastische Tone W<sub>L50</sub>	TL
				Mittelschwere Tone W<sub>L50</sub>	TM
				Mittelschwere Tone W<sub>L50</sub>	TL
				Mittelschwere Tone W<sub>L50</sub>	TM
Organischer Boden	< 40	-	Ton	Organische Tone W<sub>L50</sub>	OU
				Mittelschwere Tone W<sub>L50</sub>	UM
				Leichte plastische Tone W<sub>L50</sub>	TL
				Mittelschwere Tone W<sub>L50</sub>	TM
				Mittelschwere Tone W<sub>L50</sub>	TL
				Mittelschwere Tone W<sub>L50</sub>	TM
Organischer Boden	< 40	-	Nicht beansprucht und schwer	Organische Tone W<sub>L50</sub>	OU
				Erbis bis gemischtschichtige Böden mit hohem Beimengungen	OH
				Erbis bis gemischtschichtige Böden mit kalkigen, kesseligen Bindungen	OK
				Nicht zu mäßig anverwandte Torfe	HN
				Schwamm Torfe	HO
				Müden (Fauchschamm)	F
Auffüllung	-	-	-	Auffüllung aus Fremdstoffen	A

\* Eine Auffüllung ist eine unter menschlicher Einwirkung entstandene Schüttung aus natürlichen Böden oder Fremdstoffen.

**Unified Soil Classification System (Système de classification unifié du sol) –**

L'USCS est une méthode très répandue de classification des sols sur les chantiers de construction. Il a été mis au point par l'U.S. Army Corps of Engineers et l'U.S. Bureau of Reclamation. Le terme descriptif utilisé est la texture.

USCS SOIL CLASSIFICATION SYSTEM			
SOIL FRACTION	SYMBOL	SIZE RANGE	
<b>Boulders</b>	<b>None</b>	Greater than 12"	
<b>Cobbles</b>	<b>None</b>	75 mm (3") to 12"	
<b>1- Course Grained Soils:</b>			
<b>Gravel</b>	<b>G</b>	75 mm (3") to #4 Sieve (4.25 mm)	
Course Gravel		75 mm to 19 mm	
Fine Gravel		#4 Sieve to 19 mm	
<b>Sand</b>	<b>S</b>	#4 Sieve to #200 Sieve (0.075 mm)	
Course Sand			
Medium Sand			
Fine Sand			
<b>2- Fine Grained Soils:</b>			
Fines		Less than #200 Sieve	
Silt	<b>M</b>	Use Atterberg Limits	
Clay	<b>C</b>	Use Atterberg Limits	
<b>3- Organic Soils</b>			
	<b>O</b>	Use Atterberg Limits	
<b>4- Peat</b>			
	<b>Pt</b>	Visual Identification	
<b>Gradation Symbols</b>			
Well-graded	<b>W</b>	Liquid Limit Symbols	
Poorly-graded	<b>P</b>	High LL	<b>H</b>
		Low LL	<b>L</b>

**Système de classification du sol britannique –**

Le système de classification British Standard (BS) est un protocole d'identification de la composition du sol. Le sol est dans un premier temps classé en sol grossier ou fin en fonction de la taille des particules. Les sols granulaires sont classés en fonction de leur distribution granulométrique. Les sols fins sont divisés en sous-groupes en fonction de leur plasticité.

SOIL GROUPS		SUB-GROUPS and in-laboratory classification				
GRAVEL and SAND may be qualified sandy GRAVEL and gravelly SAND where appropriate		GROUP SYMBOL	SUB-GROUP SYMBOL	FINES % < 0.05 mm	LIQUID LIMIT	
GRAVELLY SOILS less than 20% of the material is finer than 0.075 mm	GRAVELS More than 50% of the material is gravelly (see classification key)	Slightly silty or clayey GRAVEL	G	DW	0 to 5	
		Silty GRAVEL	GF	SP, SPg		
		Clayey GRAVEL	G-C	GM, GPM	5 to 15	
		Very silty GRAVEL	GF	DM, DFC	15 to 35	
		Very clayey GRAVEL	GC	DM, etc.		
				DC, DCI, DCY, DCZ, etc.		
	SANDS More than 50% of the material is sandy (see classification key)	Slightly silty or clayey SAND	S	DW	0 to 5	
		Silty SAND	SF	SP, SPg		
		Clayey SAND	S-C	SM, SPM	15 to 35	
		Very silty SAND	SF	SM, SFC	15 to 35	
		Very clayey SAND	SC	SM, etc.		
				SCL, SCL, SCH, SCZ, etc.		
FINE SOILS more than 20% of the material is finer than 0.075 mm	GRAVELLY SILTY CLAYS (see classification key)	Gravelly SILT	MG	MCL, etc.		
		Gravelly CLAY	CG	CL, CH, CHC, CHD, etc.	< 35 35 to 70 70 to 90 > 90	
		Sandy SILT	MS	MCL, etc.		
		Sandy CLAY	CS	CL, etc.		
		SILT (M SOIL)		ML, etc.		
		CLAY		CL, CI, CH, CV, CE	< 35 35 to 70 70 to 90 > 90	
	ORGANIC SOILS	Description letter 'O' suffixed to any group or sub-group symbol		Organic matter in significant amount e.g. OMG - organic silty of high LL		
		PEAT		Pt - consists predominantly of plant remains (fibrous or amorphous)		

Classification v1.00 Sept 2010

**Primary Letter**  
 G = Gravel  
 S = Sand  
 M = Silt  
 C = Clay  
 O = Organic Soil  
 Pt = Peat

**Secondary Letter**  
 W = Well graded  
 P = Poorly graded  
 M = With non-plastic fines  
 C = With plastic fines  
 L = Of low plasticity (LL < 50)  
 H = Of high plasticity (LL > 50)

## [ CLASSIFICATION DU SOL SUR LE TERRAIN ]

Les systèmes de classification nécessitent des mesures en laboratoire telles que l'analyse de granulométrie ou l'essai d'indice de plasticité. Cependant, il est possible d'utiliser des essais de

terrain simples pour classer les différents sols si un équipement de laboratoire complet n'est pas disponible. Ces essais servent à déterminer la granulométrie, la plasticité et la dispersion.

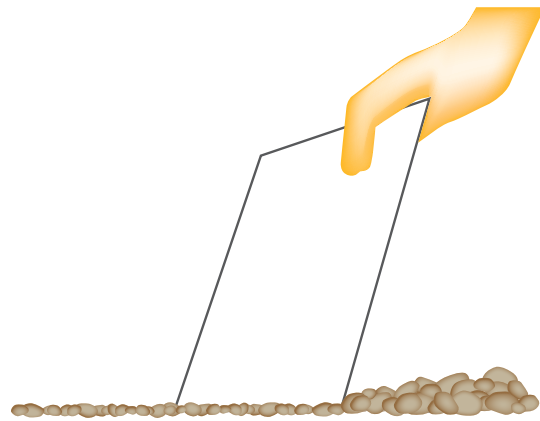
### Granulométrie/Répartition des particules –

Pour tester la granulométrie d'un sol sec, étendez un échantillon de sol sur une surface plane. Utilisez une feuille de papier épais ou de carton comme râteau pour trier les particules de sol les plus épaisses d'un côté. Estimez le pourcentage de particules de plus de 5 mm (3/16") et le pourcentage de fines (trop petites pour que les grains soient identifiés à l'œil nu). Estimez également si les particules les plus grandes sont de taille uniforme (granulométrie insuffisante) ou sont de grande, moyenne et petite taille (granulométrie étalée).

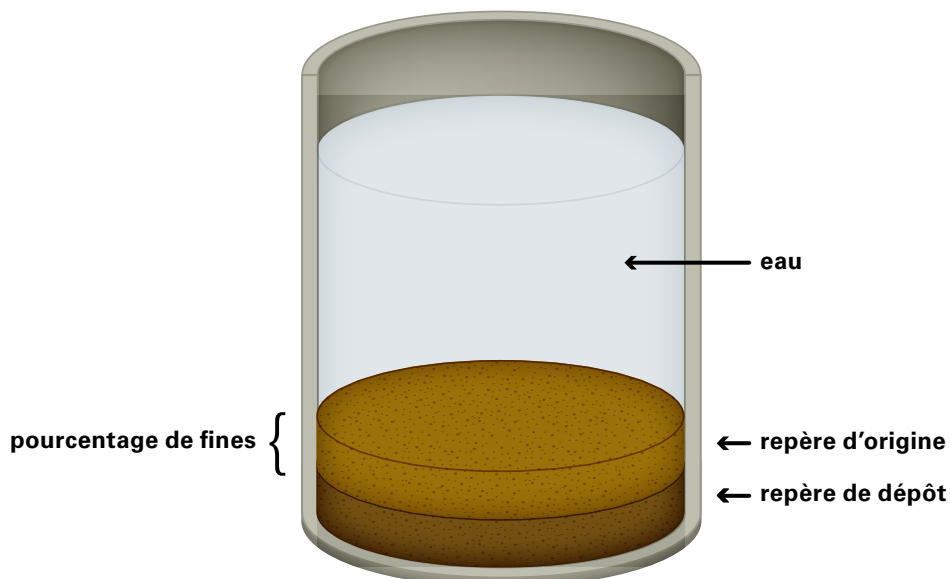
Si le sol est humide, cassez-en un morceau avec un crayon et estimez les pourcentages selon la méthode du sol sec. Pour trouver le pourcentage de fines, remplissez un verre transparent de 3 mm (1/8") d'eau. Ensuite, ajoutez suffisamment de sol pour remplir 1/4 du verre. Ajoutez de l'eau jusqu'à immerger le sol.

Marquez ce niveau à l'aide d'un élastique. Remplissez le verre aux 3/4 d'eau et mélangez vigoureusement le mélange. Laissez reposer pendant 1 minute et demie environ et marquez la hauteur du sol qui s'est déposé. La différence entre les deux repères représente le pourcentage de fines.

### ESSAI DE GRANULOMÉTRIE



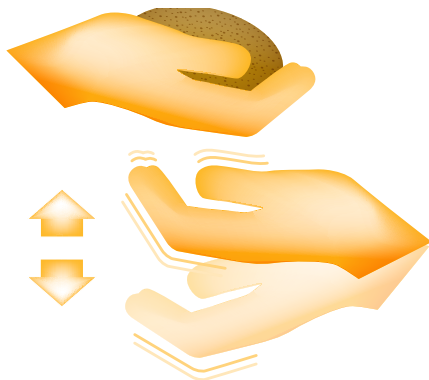
### POURCENTAGE DE FINES





**Plasticité des sols à grains fins** – Vous pouvez procéder à un ou plusieurs essais sur le terrain pour estimer la plasticité d'un sol.

**ESSAI D'AGITATION**

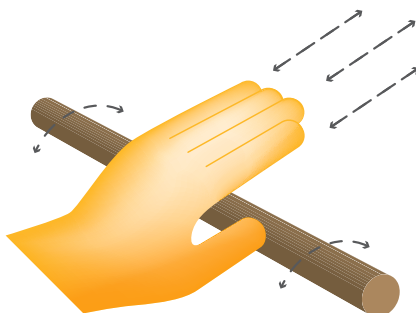


- **Essai d'agitation** – Prenez un morceau de sol à grain fin et pétrissez-le, en faisant sortir le plus de particules à gros grains possible. Ajoutez progressivement de l'eau et pétrissez le sol jusqu'à ce qu'il commence à coller. Tenez la boule de sol dans la paume d'une main et tapez sur le dos de votre main avec les doigts de l'autre main.

Si la boule brille et est humide en surface, elle contient principalement du sable fin ou du limon. Les argiles réagissent peu ou pas à cet essai et deviennent juste salissantes.

- **Essai de ténacité** – Prenez la moitié environ de la boule de sol et pétrissez-la entre le pouce et l'index pour la sécher. Essayez ensuite de rouler l'échantillon de sol en « serpent ». Si vous n'arrivez pas à former de serpent, vous êtes sûr que le sol est en limon ou sable fin. Les sols très plastiques mettent longtemps à sécher. Ils durcissent et deviennent cireux, et une pression importante est nécessaire pour former un serpent qui se casse à un diamètre de 3 mm (1/8 in).

**ESSAI DE TÉNACITÉ**



- **Résistance à sec** – Prenez l'autre moitié de la boule de sol et pétrissez-la en forme de boule. Faites-la sécher à l'air. Quand le sol est sec, écrasez-le et sélectionnez un fragment irrégulier et pointu. Essayez d'écraser ce fragment entre le pouce et l'index. Le limon se transforme facilement en poussière. L'argile est comme un caillou et il est pratiquement impossible de l'écraser avec les doigts.

- **Lavage des mains** – Après avoir manipulé des limons et sables, les doigts sont poussiéreux et il suffit presque de les frotter les uns contre les autres pour les nettoyer. Un filet d'eau du robinet rince les traces de sol sur les mains. En revanche, lorsque vous manipulez des argiles, une croûte qui ne peut pas être enlevée en frottant lorsqu'elle est sèche se forme sur les doigts. L'eau ne la rince pas. Il est nécessaire de se frotter les mains sous l'eau pour les laver.

**ESSAI DES MAINS**



- **Essai des mains** – Prenez une poignée de sol. Pressez-la, puis ouvrez la main. Si le sol est poudreux et ne garde pas la forme donnée par votre main, il est trop sec. S'il se brise en éclats quand on le fait tomber, il est trop sec. Si le sol est malléable et se casse en quelques morceaux seulement quand on le fait tomber, il a une teneur en eau adaptée pour le compactage. Si le sol est plastique dans la main, laisse des traces d'humidité sur les doigts et reste en un morceau quand on le fait tomber, il est trop humide pour être compacté.

## TYPES

- **Essai de dispersion** – En plus des essais de terrain décrits plus haut, il est possible d'utiliser l'essai de dispersion pour déterminer le pourcentage des différentes granulométries du sol et avoir une indication du niveau de difficulté de compactage du sol. Vous avez uniquement besoin d'un verre transparent, d'eau et d'un échantillon représentatif du sol.

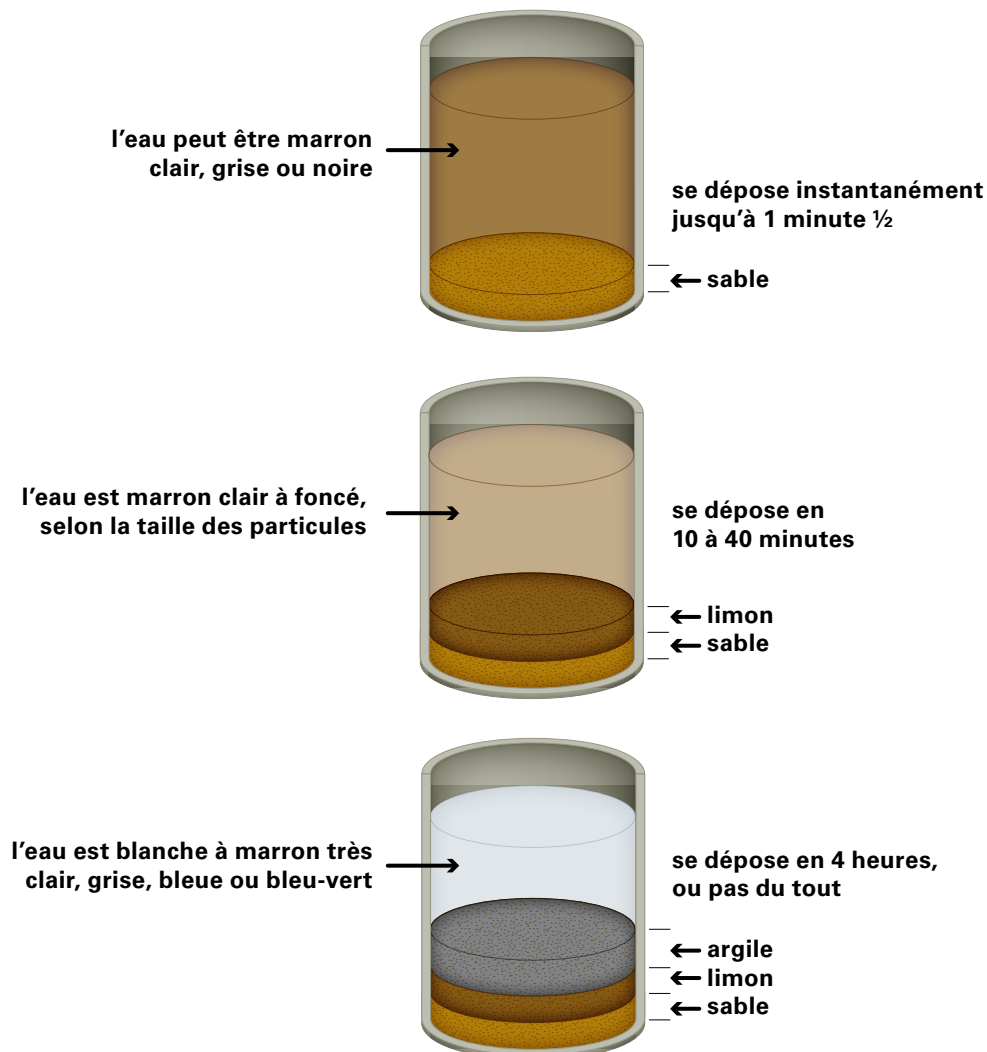
Remplissez 1/4 - 1/3 du verre de sol.  
Remplissez ensuite le récipient d'eau jusqu'à 15 mm (1/2 in) du haut. Mélangez bien le mélange et observez la façon dont le matériau se dépose.

Le matériau se dépose en trois couches distinctes. Le sable au bas, le limon ensuite et enfin l'argile. En plus d'indiquer les différents groupes, les résultats montrent si le sol a une granulométrie étalée ou insuffisante. Bien que

les particules de limon et d'argile ne soient pas visibles à l'œil nu, il est possible d'observer les variations de granulométrie grâce aux différences de couleur. Par ailleurs, plus une couche met longtemps à se déposer, plus ses particules sont petites.

L'essai de dispersion peut renseigner sur différents éléments. Il indique les matériaux de base et leur granulométrie, et le temps de dépôt indique la finesse des particules. Dans la plupart des cas, une seule taille de particules (granulométrie insuffisante) et des particules de petite taille indiquent un matériau de construction moins stable qu'un mélange contenant une bonne granulométrie de toutes les tailles de particules. Ces matériaux sont difficiles à compacter car les grains se déplacent en permanence sous la machine.

### ESSAI DE DISPERSION



[ **RÉSUMÉ DES ESSAIS DE TERRAIN** ]

Types de sol	Description
<b>Argiles</b>	Aucune réaction au test d'agitation, serpent grossier qui sèche doucement, résidu sec formant une croûte difficile à éliminer des mains.
<b>Limons</b>	Réaction rapide au test d'agitation, serpent fragile ou s'émiettant, résidu poudreux sur les mains qui s'essuie ou se lave facilement.
<b>Mélanges limon-argile</b>	Réactions intermédiaires ou conflictuelles aux essais à la main.
<b>Sable ou gravier avec des argiles fines</b>	Suffisamment d'argile pour salir la main si un échantillon humide est pétri, mais pas suffisamment pour permettre de former un morceau d'argile.
<b>Sable ou gravier avec des fines de limon</b>	Tout mélange contenant des fines poussiéreuses ou très granuleuses.
<b>Sables et graviers propres</b>	L'eau versée sur ces sols pénètre immédiatement sans former de boue.
<b>Roche abattue ou fendue</b>	Matériau irrégulier qui ne contient pas assez de matériau fin pour remplir les vides.









## Unité 3

# PHYSIQUE DU COMPACTAGE

La compréhension de la physique du compactage des différents types de sol et de l'action des différentes machines et de leurs performances de compactage est un facteur clé pour obtenir la densité du sol spécifiée de la façon la plus rentable.



[ **FACTEURS QUI INFLUENCENT LE COMPACTAGE VIBRANT** ]

Le compactage vibrant du sol est un processus complexe. De nombreux facteurs influencent l'énergie globale de compactage. Tous ces facteurs influençant le compactage doivent être considérés comme un tout et non séparément. C'est l'association entre les caractéristiques du compacteur et du sol qui définit l'énergie de compactage nécessaire pour atteindre le niveau de compactage requis. Par ailleurs, les spécifications du projet définissent si l'énergie de compactage est adaptée. Les facteurs ou

caractéristiques qui influencent le compactage vibrant peuvent être divisés en trois catégories :

1. Caractéristiques liées au matériau et au chantier
2. Caractéristiques liées aux spécifications du projet
3. Caractéristiques liées à la machine

**Caractéristiques liées au matériau et au chantier**

- **Type de sol** – Un type de sol donné présente des caractéristiques de compactage uniques, les sols qui sont plus difficiles à compacter peuvent requérir des compacteurs plus lourds.
- **Granulométrie** – La granulométrie d'un matériau est la plage de tailles de particules présentes. Dans l'idéal, toutes les tailles de particules sont réparties relativement uniformément, aucune taille n'étant prépondérante.
- **Uniformité** – Un matériau de sol est un mélange de nombreux types de sol et tailles de particules. L'uniformité peut être considérée comme le degré auquel tous les matériaux qui composent le sol sont bien mélangés et dispersés uniformément dans le sol. Un mélange de sol uniforme est homogène et se compacte de façon consistante. Un sol qui manque d'uniformité présentera un compactage inconsistant.

Le coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) en mécanique du sol est un paramètre décrivant la répartition de la granulométrie (courbe granulométrique) d'un sol. Il fournit des informations sur la façon dont les tailles de grains d'un sol sont réparties. Dans la norme DIN EN ISO 14688-2:2004, le coefficient  $C_u$  est décrit comme le rapport entre le diamètre  $d_{60}$  pendant le tamisage à 60 % et le diamètre  $d_{10}$  à un passage de 10 %. Ce rapport représente la pente de la plage de la courbe de taille de grains comprise entre 10 % et 60 % de passages (à travers le tamis).

**CALCUL DU COEFFICIENT D'UNIFORMITÉ**

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

La valeur de  $C_u$  permet d'établir les caractéristiques suivantes pour le sol :

$C_u < 5$  = sol uniforme

$C_u 5-15$  = sol non uniforme

$C_u > 15$  = sol absolument non uniforme

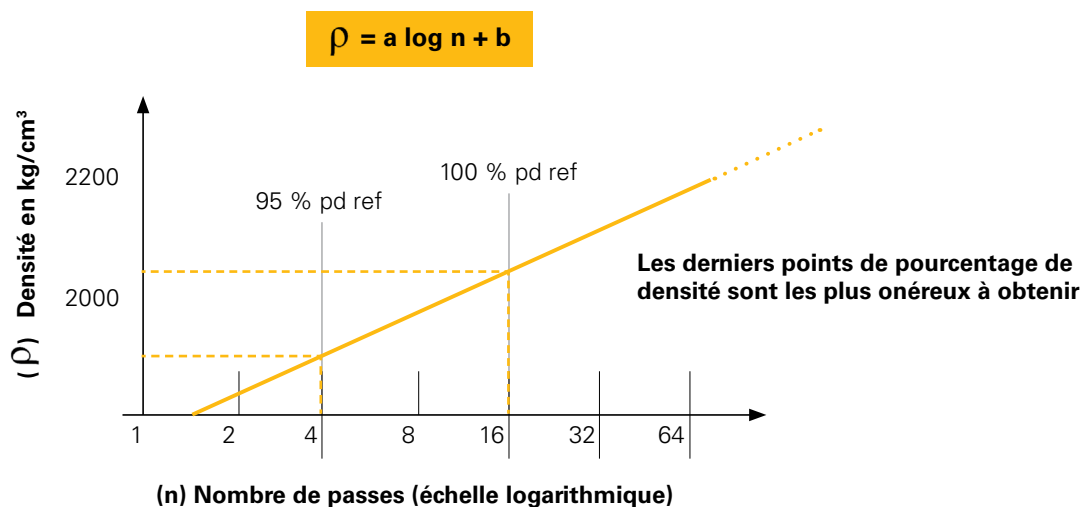




- **Texture** – Les différents types de sol possèdent différentes textures de surface, qui ont un effet sur les caractéristiques de compactage du matériau. Les types de sol à texture grossière génèrent un frottement élevé entre les particules, le compacteur a besoin de plus d'énergie pour casser leurs liaisons et leur permettre de se repositionner à un état plus dense. Les particules à texture lisse glissent plus facilement l'une sur l'autre, et nécessitent moins d'énergie de compactage.
- **Forme des grains** – Comme la texture, la forme des particules influence elle aussi le compactage d'un sol. Les formes dentelées tendent à présenter des liaisons de frottement plus importantes, et nécessitent une énergie de compactage supérieure. Les particules de forme lisse et arrondie glissent plus facilement et nécessitent une énergie de compactage moindre.
- **Densité initiale** – Les matériaux ayant une densité initiale plus élevée nécessitent un effort de compactage moins important que ceux ayant une densité inférieure. Ceci affecte la productivité, car des matériaux moins denses peuvent nécessiter plus de passes.
- **Teneur en eau** – L'humidité est le facteur le plus important à prendre en compte pour compacter un sol. Si elle est trop faible, les particules n'adhèrent pas les unes aux autres. Si elle est trop élevée, les particules se déplacent facilement. Chaque type de sol a une teneur en eau idéale pour un compactage idéal (définie au moyen de l'essai Proctor).
- **Caractéristiques de résistance des granulats** – Chaque type de sol a une résistance à la compression qui dépend de la façon dont le granulat s'est formé.
- **Base du sous-sol et portance** – Une structure est aussi résistante et élastique que les fondations qui la soutiennent. Si le sous-sol n'a pas la portance nécessaire pour supporter une chaussée, le compactage des couches de fondation et de base risque de s'avérer difficile. Les sols non adaptés peuvent être améliorés par stabilisation chimique ou mécanique.

## LE COÛT DE LA DENSITÉ

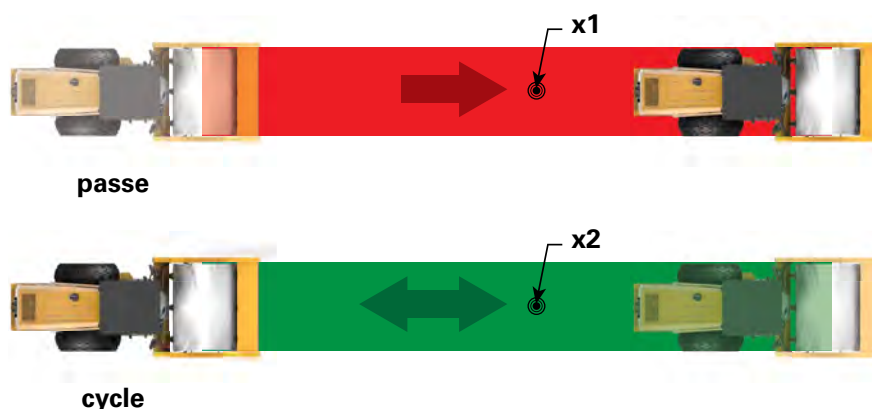
Si le nombre de passes augmente, la densité augmente



### Caractéristiques liées aux spécifications du projet

- **Compactage cible** – Il est en général établi en réalisant l'essai Proctor normal ou modifié et est spécifié en pourcentage de la densité au poids sec maximum résultant de cet essai (dans l'exemple, 95 % de l'essai Proctor normal). En général, plus l'objectif de compactage est élevé, plus les passes nécessaires sont nombreuses. Les derniers points de pourcentage de compactage sont toujours les plus difficiles à obtenir.
- **Épaisseur de couche** – Lorsque vous utilisez un compacteur d'une taille donnée, l'épaisseur de couche influence la productivité. Une couche épaisse nécessite plus de passes qu'une couche fine.

## NOMBRE DE PASSES



- **Nombre de passes** – Indique le nombre de passages d'un compacteur sur une zone du terrain. Caterpillar définit une passe comme un passage simple sur une zone en marche avant ou arrière et un cycle comme deux passes consécutives sur une zone, en général une en marche avant et une en marche arrière.

Il peut être important de connaître le nombre de passes, notamment quand une zone qui ne correspond pas aux spécifications de compactage est identifiée. Si un chantier reçoit la même couverture (nombre de passes) et qu'une zone présente des défauts mais que

le reste convient, ceci peut vous aider à réduire le nombre de causes.

Si une spécification de méthode est utilisée, le nombre de passes (avec un compacteur de taille adaptée sur une couche de composition et d'épaisseur données) sera spécifié. Dans ces cas, les ingénieurs ont déterminé, sur la base de l'expérience acquise, que ce nombre de passes suffisait à atteindre l'objectif de compactage.

## Caractéristiques liées à la machine

La conception de la machine est importante pour la dynamique du compactage. Les facteurs d'influence sont les suivants : taille du châssis, poids hors tout, entraxe, rapport du poids de la machine supporté du cylindre avant aux pneus, et équilibre du poids de la machine de gauche à droite de cette dernière. La liste continue avec les facteurs tels que le diamètre du cylindre, sa longueur, sa masse, les amortisseurs, la masse des poids excentriques et la distance entre le centre de gravité des poids excentriques et l'axe du cylindre. Même le poids du carburant et de l'opérateur influencent les performances du compacteur. Le fabricant prend tous ces facteurs en considération lors de la conception de chaque machine.

Le compactage vibrant implique un cylindre (poids statique) qui se déplace très rapidement (fréquence) de haut en bas et inversement (amplitude) et qui



avance (vitesse de travail) sur un matériau non homogène. Bien évidemment, la fréquence, l'amplitude et la vitesse de travail sont des variables contrôlées par l'opérateur. Elles seront abordées plus bas dans l'Unité 3.

Toutes ces variables signifient qu'il n'est pas toujours facile de configurer un compacteur sur un chantier donné pour obtenir des résultats de compactage idéaux. L'objectif du compactage vibrant est de définir un point de force maximum transmise dans le matériau à compacter. Ceci se

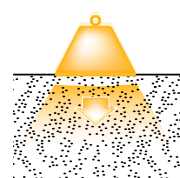
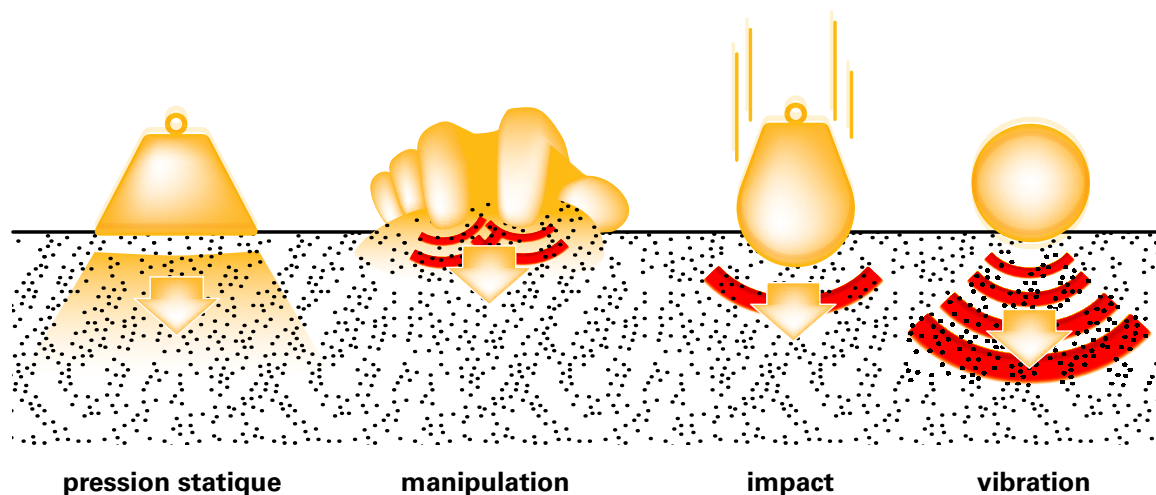
produit quand la somme de tous les facteurs (caractéristiques du matériau, du compacteur, amplitude, fréquence et vitesse) contribue de façon optimale à l'énergie de compactage nécessaire pour répondre aux spécifications du chantier.

[ **FACTEURS QUI INFLUENCENT LE COMPACTAGE VIBRANT** ]

Le compactage est le processus de compacter un matériau d'un volume donné en un plus petit volume. Ceci s'obtient en appliquant une force et un mouvement sur une zone de contact, qui cause la rupture des liaisons naturelles entre les particules du matériau et le rapprochement de ces dernières. Les vides entre les particules (air, eau, ou une combinaison des deux) sont expulsés

par l'association de la force et du mouvement. Quatre forces sont mises en œuvre dans le compactage :

1. **Pression statique**
2. **Manipulation**
3. **Impact**
4. **Vibration.**



**Pression statique** – Dans le compactage statique, la pression du poids du compacteur produit des forces de cisaillement dans le sol, qui causent le glissement des particules les unes sur les autres.

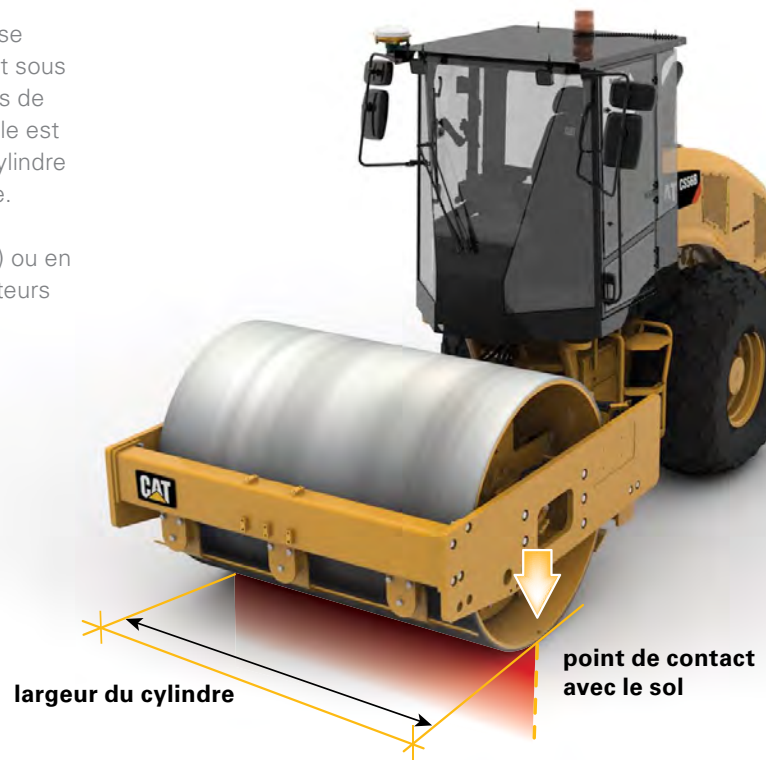
Le compactage se produit quand la force appliquée cause la rupture des liaisons naturelles entre les particules et les réoriente dans

une position plus stable. Cette force de compactage a un plus grand effet sur les matériaux en surface et à faible profondeur. Elle a un effet limité sur les sols plus profonds.



La charge linéaire statique est la mesure utilisée dans l'industrie pour comparer la force de compactage des compacteurs à cylindre lisse statique. C'est la force verticale directement sous la largeur du cylindre qui crée les contraintes de cisaillement nécessaires au compactage. Elle est calculée en divisant le poids au niveau du cylindre (charge par essieu) par la largeur du cylindre. La charge linéaire statique est exprimée en kilogrammes par centimètre linéaire (kg/cm) ou en livres par pouce linéaire (lb/in). Les compacteurs présentant une charge linéaire plus élevée ont une force de compactage et une profondeur d'influence plus grandes.

**CHARGE LINÉAIRE STATIQUE**

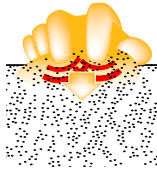


Charge linéaire statique	
<b>Compacteurs de sol vibrants</b>	
5 - 8 tonnes	16 - 22 kg/cm (90 - 120 lb/in)
8 - 12 tonnes	20 - 30 kg/cm (100 - 200 lb/in)
12 - 15 tonnes	30 - 45 kg/cm (180 - 250 lb/in)
>15 tonnes	45 kg/cm+ (250 lb/in+)
<b>Compacteurs sur pneus</b>	<b>1 000 - 3 200 kg/roue (2 200 - 7 000 lb/roue)</b>

Pour les compacteurs à cylindre à pieds dameurs, statiques à pieds dameurs et à pieds de mouton, la pression exercée varie en permanence à mesure que le nombre et la surface des pieds qui sont en contact avec le sol changent. La profondeur de pénétration peut également affecter le calcul. La pression des faces des pieds est exprimée en kilogrammes par centimètre carré (livres par pouce carré).

Le compactage statique est utilisé dans des applications pour lesquelles un toucher délicat est nécessaire, soit en raison des bâtiments à proximité, de la fragilité des matériaux, soit en cas de surfaces ayant une faible capacité portante. Il est également utilisé dans des situations où une force de compactage trop élevée risque d'attirer de l'eau libre à la surface.





**Manipulation** – La manipulation est une force de compactage qui réagence les particules en masse plus dense suivant un processus de pétrissage. Ce processus est particulièrement efficace en surface de la couche de matériau.

L'action de pétrissage longitudinal et transversal est essentielle lors du compactage de sols très stratifiés tels que les sols de type argileux. Les compacteurs à pieds de mouton et les compacteurs à pneus à chevrons sont particulièrement indiqués pour fournir ce type de force de compactage.

La force de manipulation générée par les compacteurs sur pneumatiques est le produit de deux facteurs : la pression de contact et la charge par roue. Le réglage de l'un ou l'autre de ces facteurs change les performances du compacteur.

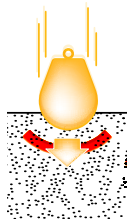


Le compactage à manipulation est utile pour construire une surface étanchéifiée pour aider le matériau à résister aux effets de l'eau et des intempéries.

**FORMULE DE PRESSION DE CONTACT**

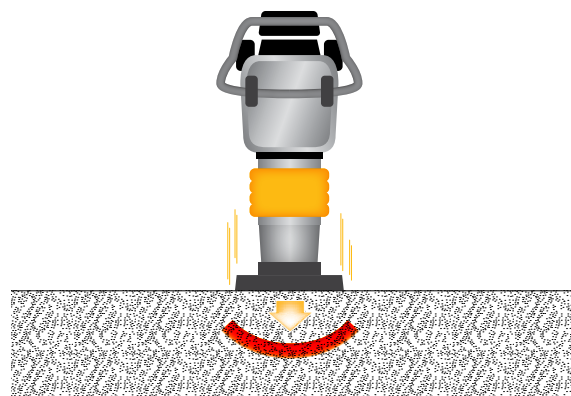
$$\text{PRESSION DE CONTACT} \begin{matrix} \text{kg/cm}^2 : \text{bars} \end{matrix} = \frac{\text{Charge par roue (kg)}}{\text{Surface de contact du pneu (cm}^2\text{)}}$$

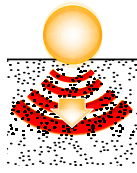
$$\text{CHARGE PAR ROUE} \begin{matrix} \text{kg} \end{matrix} = \frac{\text{Poids en ordre de marche du compacteur}}{\text{Nombre de roues}}$$



**Impact** – L'impact génère une force de compactage plus importante que la force gravitationnelle d'une charge statique. Ceci est dû au fait qu'une masse en mouvement a une vitesse, qui est convertie en énergie au moment de l'impact. L'impact crée une onde de pression qui entre dans

le sol par la surface. Les impacts sont en général une série de chocs. Les impacts de 50 à 600 chocs par minute sont considérés comme plages de basses fréquences et servent sur les marteaux à percussion et les dames. Les impacts de 1400 à 3000 chocs par minute sont considérés comme plages de haute fréquence et sont utilisés sur les compacteurs vibrants.





**Vibration** – La vibration est probablement la force de compactage la plus complexe et la plus rentable. Plus de 90 % des compacteurs vendus aujourd’hui sont vibrants. Ceci est dû au fait qu’un compacteur vibrant permet la même productivité

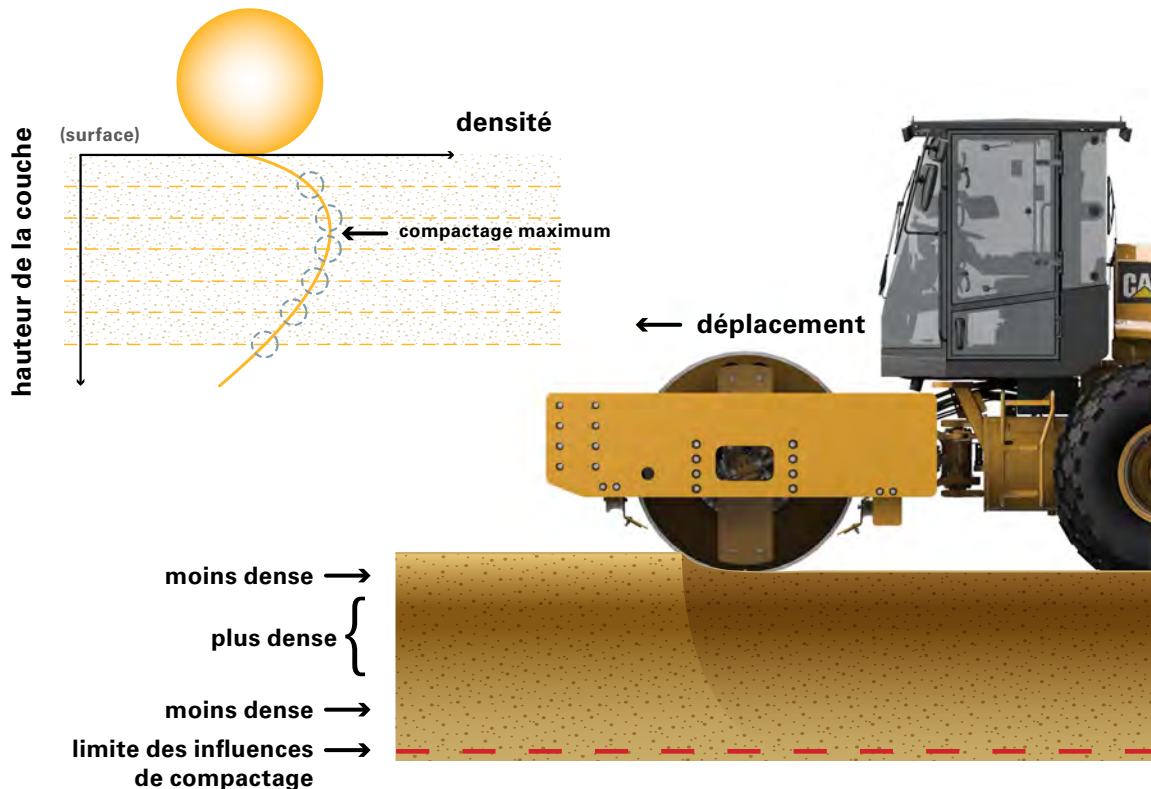
qu’un compacteur statique de masse trois fois supérieure. L’énergie vibratoire rend un compacteur vibrant plus efficace qu’un compacteur statique de mêmes dimensions.

Les compacteurs vibrants produisent une succession rapide d’ondes de pression qui se propagent dans toutes les directions. Les ondes de pression vibrantes surmontent la résistance au cisaillement entre les particules du matériau compacté. Quand une pression est appliquée, les particules tendent à se réorienter dans un état plus dense (moins de vides). Pour comprendre le fonctionnement des compacteurs vibrants, il est nécessaire de comprendre la dynamique du compactage vibrant : amplitude et fréquence, charge linéaire statique et rapport masse vibrante/ masse suspendue.

Quand un compacteur travaille, le volume du sol compacté ne sera pas compacté uniformément de haut en bas. Un compacteur d’une masse donnée compacte le sol jusqu’à une profondeur donnée, mais le niveau de compactage du sol varie de la surface à la profondeur d’influence du compactage maximum. En général, le sol en surface est moins compact, les matériaux intermédiaires présentent un compactage maximum et les matériaux les plus profonds sont eux aussi moins compacts.

La modification des paramètres de fonctionnement peut jouer sur la profondeur des zones de compactage et modifier la profondeur de la zone de compactage maximum, mais ceci ne change rien au fait que le compactage du sol varie de haut en bas. Ce phénomène est nommé « gradient de compactage » et ces données aident à décrire l’adéquation d’un compacteur de taille donnée ou d’un réglage donné à des applications de compactage spécifiques.

**GRADIENT DE COMPACTAGE**



*Il paraît logique que, lors de l’utilisation d’un compacteur roulant, le sol en surface soit le plus dense. Cependant, la densité maximum se trouve en réalité sous la surface, et baisse à mesure que la profondeur réduit l’influence du compacteur. Ce phénomène est appelé gradient de compactage.*



[ DYNAMIQUE DU COMPACTAGE VIBRANT ]

**Amplitude** – L’amplitude est la mesure de la distance du mouvement vertical de la position de repos à la position maximum d’un cylindre vibrant. Les fabricants mettent en avant cette valeur nominale, mesurée sur un cylindre suspendu. L’amplitude de travail réelle, cependant, est le produit de l’amplitude nominale et du coefficient d’amplification, qui est le rapport entre la fréquence transmise à la fréquence de résonance de la machine et le terrain compacté. Il peut être plus utile de considérer l’amplitude comme la distance de déplacement du cylindre dans le sol à mesure qu’il déplace et compacte le sol.

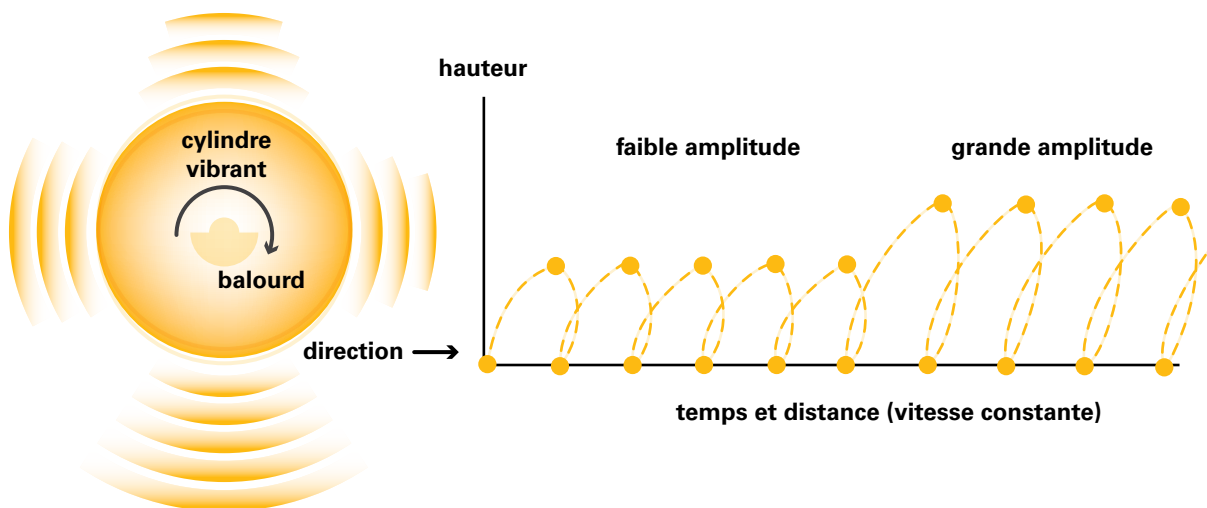
En modifiant l’amplitude, l’opérateur peut faire varier la force et le mouvement (accélération du cylindre) sur le matériau.

Quand le sol approche de sa densité maximum, il arrive un point où il ne peut plus absorber

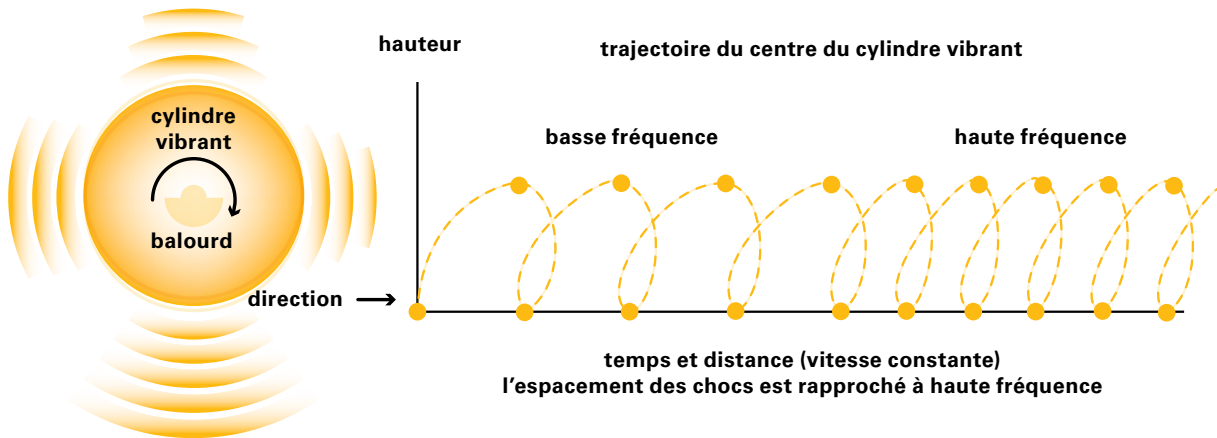
l’énergie de compactage que le compacteur vibrant applique. À ce stade, le cylindre peut rebondir sur la surface et un cycle de vibrations peut se produire alors que le cylindre est suspendu en l’air. Ce phénomène est nommé « découplage » ou « double-rebond » et est accompagné d’une vibration distincte et particulièrement forte qui affecte toute la machine. Le découplage peut endommager la machine et produire des résultats non souhaités sur le sol en cours de compactage, son décompactage par exemple.

Pour arrêter le découplage, l’opérateur doit réduire l’énergie que la machine transmet au sol en réduisant l’amplitude, ce qui réduit la force de compactage appliquée au sol. L’opérateur peut également travailler en mode statique.

**AMPLITUDE**



FRÉQUENCE



**Fréquence et vitesse** – La fréquence est la mesure du nombre de cycle complets ou révolutions des poids excentriques (balourds) autour de l’axe de rotation sur une période donnée. La fréquence est en général exprimée en hertz (Hz) ou en vibrations par minute (vpm). En général, en fonction du matériau et du réglage d’amplitude, les fréquences utilisées sont comprises entre 23 et 35 Hz (1 380-2 100 vpm).

La relation entre la fréquence et la vitesse de travail est parfois simplifiée par une règle empirique qui indique que la fréquence et la vitesse de travail

doivent être réglées pour obtenir environ un impact tous les 25-30 mm (1-1,2 in). Une vitesse de travail trop rapide peut causer un effet de « tôle ondulée » (impacts trop espacés) et une vitesse de travail trop lente ralentit la machine et en baisse la productivité. Il y a une vitesse et une fréquence optimum pour chaque type d’application de compactage, mais elles peuvent ne pas atteindre un impact tous les 25 mm (1 in). Il est essentiel de maintenir un compactage uniforme, et d’utiliser les fonctions de contrôle automatique de la vitesse pour assurer un bon équilibre entre vitesse et fréquence peut aider à obtenir cette consistance.

**Rapport masse vibrante/masse suspendue** –

L’on pourrait supposer que si un compacteur vibrant de masse et d’amplitude données peut compacter un sol donné avec un certain degré d’efficacité, il suffirait d’appliquer une masse et une amplitude plus importantes pour que le compacteur soit plus efficace sur le même sol. Ce n’est pas nécessairement vrai.

Sur un compacteur vibrant, la masse vibrante (cylindre) est isolée de la masse suspendue (le châssis arrière), et le rapport entre les deux est un facteur critique pour définir la masse et l’amplitude du compacteur. Ce rapport est soigneusement équilibré pour permettre à la machine d’optimiser la quantité d’énergie qu’elle peut transmettre au sol sans risques.



**masse totale en ordre de marche**



**masse suspendue (non vibrante)**



**masse vibrante**



Résonance agissant contre l'énergie de compactage



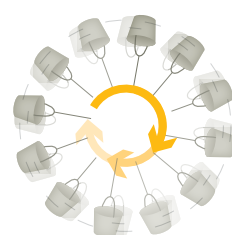
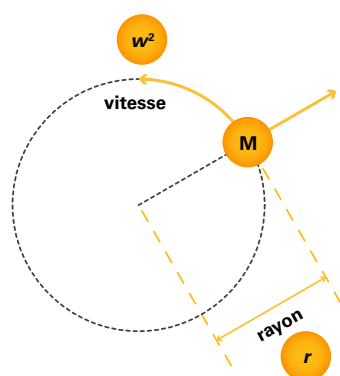
La résonance agissant avec l'énergie de compactage est la convergence harmonique

**Résonance** – Quand la fréquence des vibrations appliquées à un objet est égale à la fréquence naturelle de l'objet, il vibre à sa fréquence de résonance. Dans le compactage vibrant, la résonance est très importante.

L'interaction entre le matériau en cours de compactage et la machine vibrante les fait vibrer. Les poids excentriques qui tournent dans le cylindre maintiennent cette vibration à une fréquence égale à la vitesse de rotation de l'arbre balourdé. Dans certaines conditions, à la fréquence donnée,

la machine et le matériau vibrent en résonance. Les conditions qui créent la résonance ne dépendent pas uniquement des caractéristiques de la machine, mais également de la nature du matériau à compacter et du degré de compactage atteint. La fréquence idéale pour obtenir la transmission du compactage la plus efficace est supérieure d'environ 15 % à la fréquence de résonance.

### FORCE CENTRIFUGE



**force centrifuge =  $Mw^2 r$**

Pour calculer la force centrifuge, la masse ( $M$ ) du poids excentrique est multipliée par le rayon ( $r$ ) de rotation du poids excentrique et par la vitesse de rotation (fréquence) au carré ( $w^2$ ). Le facteur le plus significatif de cette équation est la fréquence.

**Force centrifuge** – Les compacteurs vibrants créent une force centrifuge avec un ou des poids excentriques dans un cylindre. La force centrifuge générée par le cylindre est analogue à la traction que l'on sent lorsque l'on balance un seau rempli d'eau. La masse des poids, leur distance de départ du centre de rotation vers le centre de gravité et la vitesse de rotation contribuent à créer cette force. La force centrifuge est un calcul théorique et est souvent utilisée pour évaluer la productivité

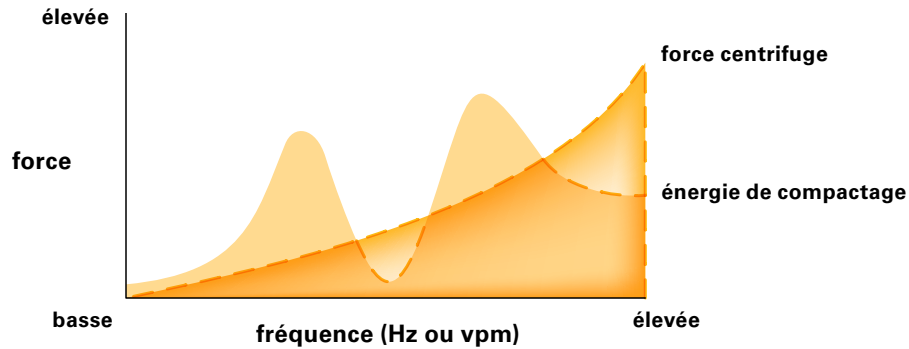
des compacteurs de sol vibrants. Mais la force centrifuge théorique n'est pas un moyen précis d'évaluer les performances d'une machine. La force de vibration réelle dépend de l'interaction complète entre le matériau en cours de compactage et la machine.



**FORCE ET FRÉQUENCE**

Le graphique ci-dessous montre l'augmentation de la force centrifuge théorique avec l'augmentation de la fréquence. Cependant, l'énergie de compactage effectivement transmise au sol varie avec l'augmentation de la fréquence. L'énergie de compactage montrera de nombreux « creux » et pics ».

Il y a en général un premier pic représentant une valeur maximum d'énergie de compactage, qui chute rapidement et est suivie par un second pic. Ce second pic donne en général la valeur la plus élevée et indique la productivité optimale de la machine.



**FORCE TOTALE APPLIQUÉE (F<sub>TA</sub>)**

$$F_{TA} = F_C + F_S$$

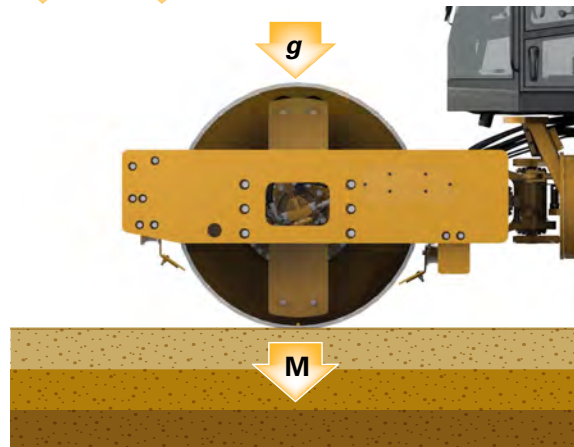
Dans laquelle : F<sub>C</sub> est la force centrifuge =

$$1100 \left( \text{M} \right) \left( r \right) \left( \frac{\text{N}}{1000} \right)^2$$

et : F<sub>S</sub> est la charge appliquée au cylindre statique =

$$\text{M} \times g$$

- M** masse du balourd
- r** moment d'excentricité (m)
- N** trs/min
- M** masse appliquée au cylindre statique (kg)
- g** accélération de la gravité (mètres/seconde<sup>2</sup>)



**Force totale appliquée** – La force totale appliquée est l'énergie vibratoire maximum que le compacteur peut appliquer au sol. Elle est calculée en ajoutant la masse statique du compacteur à la force centrifuge. Comme pour la force centrifuge,

utilisez prudemment ce calcul pour comparer la capacité de compactage de différents compacteurs.

[ ÉQUIPEMENT DE COMPACTAGE DES SOLS ]

De nombreux facteurs influencent le choix de l'équipement de compactage. Le type d'équipement sélectionné pour un chantier dépend parfois de l'expérience précédente de l'entrepreneur, du type de sol, de la spécification de méthode et des équipements disponibles. Il faut également tenir compte du comportement de la machine lors des opérations de roulage et d'épandage. Les conditions climatiques et de traction sont également importantes. Parfois, le souhait de l'entrepreneur d'uniformiser son parc d'équipements joue un rôle dans le processus de décision.

Le tableau des applications donne des indications pour associer les équipements aux variables du chantier et aux types de sols. Il n'existe pas de compacteur unique en mesure d'exceller dans toutes les applications. Chaque type possède une gamme de matériau et de fonctionnement dans laquelle il est le plus économique. Dans de nombreux cas, il existe des applications dans lesquelles des machines de différentes tailles et types peuvent atteindre l'objectif de compactage, mais le choix de la machine la plus adaptée permet d'accomplir le travail de la façon la plus rentable et efficace en réduisant les passes, la consommation de carburant et le temps de travail.

TABLEAU DES APPLICATIONS

PIERRE	SABLE 100 %	SABLE/ARGILE 50 %	ARGILE 100 %
			← pieds de mouton →
			← sur pneus →
		← vibrant →	← cylindre à pied dameurs →
← cylindre lisse →			
			← damage →

**Compacteurs vibrants** – Les compacteurs vibrants fonctionnent selon le principe du réagencement des particules pour réduire les vides et augmenter la densité et la capacité portante. Ils existent en 2 types : à cylindre lisse et à cylindre à pieds dameurs. Pour une plus grande polyvalence, les compacteurs à cylindre lisse peuvent être équipés de kits de bandage à pieds dameurs qui permettent d'utiliser les compacteurs à cylindre lisse dans les applications pour pieds dameurs, avec des performances limitées cependant.

Les compacteurs vibrants à cylindre lisse génèrent trois forces de compactage : pression statique, impact et vibration. Les machines à cylindre à pieds dameurs génèrent les mêmes forces, auxquelles s'ajoute la force de manipulation. Les compacteurs vibrants donnent un compactage uniforme dans toute la couche.

La densité est obtenue grâce aux forces générées par le choc du cylindre vibrant sur le sol. Les résultats de compactage sont fonction de la fréquence et de l'amplitude des chocs, ainsi que de la force des chocs et de la période sur laquelle les chocs sont exercés.





*Les pieds ovales conviennent aux sols cohésifs et aux couches épaisses.*

La relation fréquence/temps explique les vitesses de travail plus lentes des compacteurs vibrants. La vitesse de travail est importante car elle définit la durée de compactage d'un emplacement donné du matériau. Pour les compacteurs vibrants, une vitesse de 1-2,5 km/h (0,6-1,6 mph) pour la pierre et l'argile, et de 2-5 km/h (1,2-3 mph) pour le gravier et le sable fourniront les meilleurs résultats.

Les compacteurs vibrants à cylindre lisse ont été les premières machines vibrantes commercialisées. Ils sont plus performants sur les matériaux granulaires dont la taille de particules va des grosses pierres au sable fin. Ils sont également utilisés sur des sols semi-cohésifs contenant jusqu'à 50 % de matériau cohésif. L'épaisseur de couche varie en fonction de la taille du compacteur. Si de grosses pierres sont utilisées dans le matériau, les couches peuvent être très épaisses ; des couches allant jusqu'à 1,2 m (4 ft) ne sont pas rares. Gardez à l'esprit que, lorsque le matériau contient de grosses pierres, la couche doit avoir une épaisseur supérieure de 300 mm (12 in) à la taille maximum des pierres. Ceci permet de consolider la couche sans que les grosses pierres saillent en surface.

Les machines à cylindre à pieds dameurs étendent la gamme de matériaux et comprennent des sols contenant plus de 50 % de matériau cohésif et un plus grand pourcentage de fines. Quand le pied pénètre le dessus de la couche, il casse les liaisons naturelles entre les particules de sol cohésif et atteint de meilleurs résultats de compactage. Les pieds sont à développante pour sortir de la couche sans altérer le sol et coniques pour assurer

*Caterpillar propose également une option kit de bandage à pieds dameurs pour les compacteurs à cylindre lisse. Le bandage en 2 pièces est boulonné sur le cylindre lisse, et permet d'utiliser le compacteur sur les sols cohésifs, comme un compacteur à pieds dameurs normal. Des kits de bandage à pieds ovales et à pieds carrés sont disponibles.*



*Les pieds carrés conviennent aux sols semi-cohésifs et aux couches fines.*

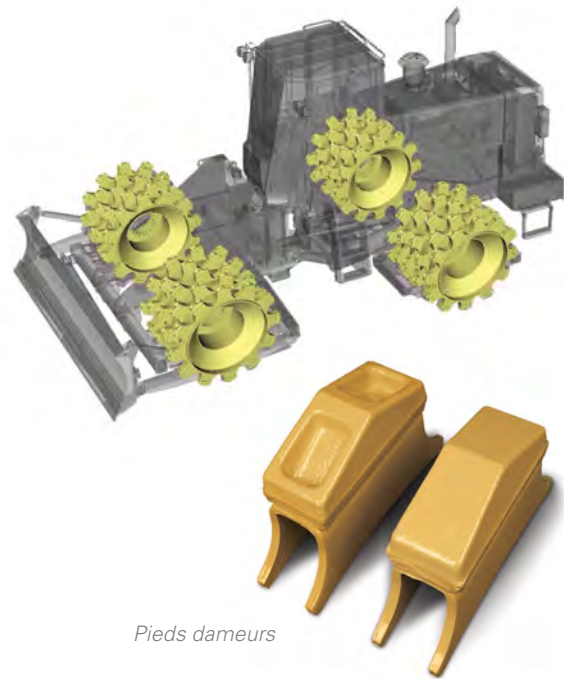
leur propreté. L'épaisseur de couche caractéristique pour les machines à cylindre à pieds dameurs sur sols cohésifs est comprise dans la plage de 150 à 460 mm (6-18 in).

Caterpillar propose deux formes de pieds dameurs : pieds carrés et pieds ovales. Les pieds carrés sont performants sur les sols semi-cohésifs et les couches fines de moins de 150 mm (6 in). Les pieds carrés sont efficaces pour étanchéifier la surface.

Les pieds ovales ont une surface moins étendue que les pieds carrés, ils exercent par conséquent une pression au sol plus importante que ces derniers. Ceci permet au pied de pénétrer plus profondément dans la couche. Les pieds ovales sont plus performants sur les sols cohésifs et les couches épaisses de 150 à 460 mm (6-18 in). Les pieds ovales n'étanchéifient pas aussi bien la surface que les pieds carrés.







*Pieds dameurs*

**Compacteurs statiques à pieds dameurs –**

Les compacteurs statiques à pieds dameurs sont des compacteurs non vibrants à grande vitesse autotractés. Ils présentent en général 4 roues acier à pieds dameurs et sont équipés d'une lame frontale. Les pieds sont coniques à face rectangulaire.

Les compacteurs statiques à pieds dameurs compactent du bas en haut de la couche. Comme les pieds sont coniques, ils peuvent sortir de la couche sans altérer le sol. Par conséquent, le haut de la couche est également compacté et la surface est relativement lisse et étanche. Les compacteurs statiques à pieds dameurs peuvent rouler à des vitesses de 16 à 32 km (10-20 mph), mais ils fonctionnent en général dans la plage de 10 à 15 km (6-10 mph).

En général, 2 à 3 cycles (4-6 passes de la machine) permettent d'atteindre la densité souhaitée dans des couches de 200-300 mm (8-12 in), cependant 4 cycles peuvent être nécessaires dans les limons plastiques à granulométrie insuffisante ou l'argile très fine. Les compacteurs statiques à pieds dameurs

**Compacteurs à pieds de mouton –**

Les compacteurs à pieds de mouton tirent leur nom du fait que les ouvriers de la Rome Antique faisaient marcher des troupeaux de moutons sur la couche de base jusqu'à ce que la route soit compactée. Le nom « pieds de mouton » devint un terme générique pour décrire tous les types de cylindres à pieds dameurs. En réalité, un compacteur à pieds de mouton est très différent d'un compacteur à cylindre à pieds dameurs ou d'un compacteur statique à pieds dameurs.

sont performants sur tous les sols à l'exception du sable propre.

Les compacteurs statiques à pieds dameurs laissent une surface relativement lisse et étanche, ce qui permet aux engins de transport de conserver une vitesse élevée lorsqu'ils passent sur le remblai. Par ailleurs, étant donné que les compacteurs de damage équipés d'une lame frontale épandent et compactent, l'entrepreneur peut être en mesure de réduire le nombre d'épanduses sur chenilles.

Les compacteurs statiques à pieds dameurs sont plus adaptés aux chantiers de grande taille. Ils ont besoin de passes longues et ininterrompues pour atteindre leur vitesse de productivité élevée. Sur les couches de plus de 300 mm (12 in) d'épaisseur, les compacteurs statiques à pieds dameurs présentent une productivité 2 à 3 fois supérieure à celle des compacteurs vibrants monocylindre. L'application, la taille du chantier et les facteurs économiques influençant la prise de décision indiquent la machine la plus adaptée.

Un pied de mouton est cylindrique, d'une longueur de 200 mm (8 in) en général. Le pied est circulaire et a un diamètre de 76 à 127 mm (3-5 in). Les pieds des cylindres des compacteurs statiques à pieds dameurs ou à pieds dameurs sont coniques et de forme ovale ou rectangulaire. Par ailleurs, la face du pied est plus petite que sa base, c'est une différence importante.



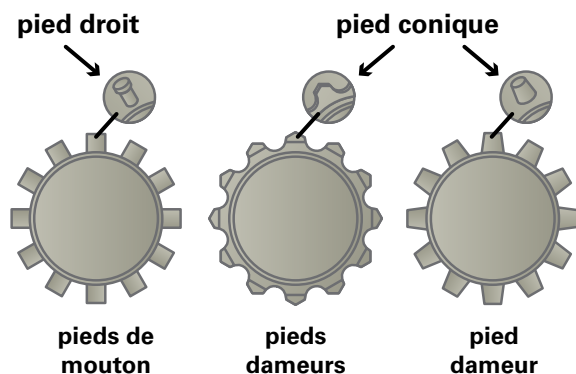
Les pieds des cylindres à pieds de mouton pénètrent la couche supérieure et compactent en réalité la couche sous-jacente. Quand un pied sort du sol, il fait remonter et remue le matériau. Ceci a pour résultat une couche de matériau meuble en surface. Quand du remblai supplémentaire est épandu, la couche supérieure est remuée et la couche précédente est compactée. Ainsi, un compacteur à pieds de mouton compacte du bas vers le haut.

L'utilisation d'un compacteur à pieds de mouton présente un avantage précis. Comme la couche supérieure du sol est toujours remuée, ce processus aide à aérer et à sécher les argiles et limons humides.

Cependant, les compacteurs à pieds de mouton présentent de nombreux inconvénients. Le matériau meuble de la couche supérieure peut avoir un effet d'éponge en cas de pluie et ralentir le processus de compactage. Le matériau meuble ralentit également les engins de transport qui déposent le remblai, ce qui augmente les temps de cycle de transport.

En outre, les compacteurs à pieds de mouton fonctionnent à des vitesses de 6 à 10 km (4-6 mph) uniquement, ce qui annule tous les effets positifs de l'impact et des vibrations. La pression et la manipulation sont les seules forces de compactage exercées sur le sol. En général, il faut 6 à 10 cycles (12 à 20 passes de la machine) pour atteindre la densité cible sur des couches de 200 mm (8 in). Les compacteurs à pieds de mouton ne sont plus très répandus.

### CONFIGURATIONS DE PIEDS



### Compacteurs sur pneumatiques –

Les compacteurs sur pneumatiques sont utilisés sur les chantiers de compactage de petite à moyenne taille, principalement sur des matériaux de base lamellaires et granulaires. Ils sont souvent utilisés comme compacteur de finition une fois qu'un compacteur à cylindre vibrant a terminé le compactage de la couche. Les compacteurs sur pneumatiques sont plus adaptés pour étanchéfier la surface, pour les applications spéciales telles que le compactage de couches fines ou les exigences spécifiques au chantier.

Les forces de compactage (pression et manipulation) générées par les pneus en caoutchouc agissent de haut en bas de la couche pour produire de la densité. La force de compactage peut être modifiée en modifiant la pression des pneus (méthode normale) ou en changeant le poids du lest (moins fréquent). L'action de pétrissage exercée par le pneu à chevrons aide à étanchéfier et à lisser la surface.

Les compacteurs sur pneumatiques peuvent être utilisés sur la terre et l'enrobé, avantage qui permet à l'entrepreneur d'utiliser un seul compacteur pour les différentes phases de construction.





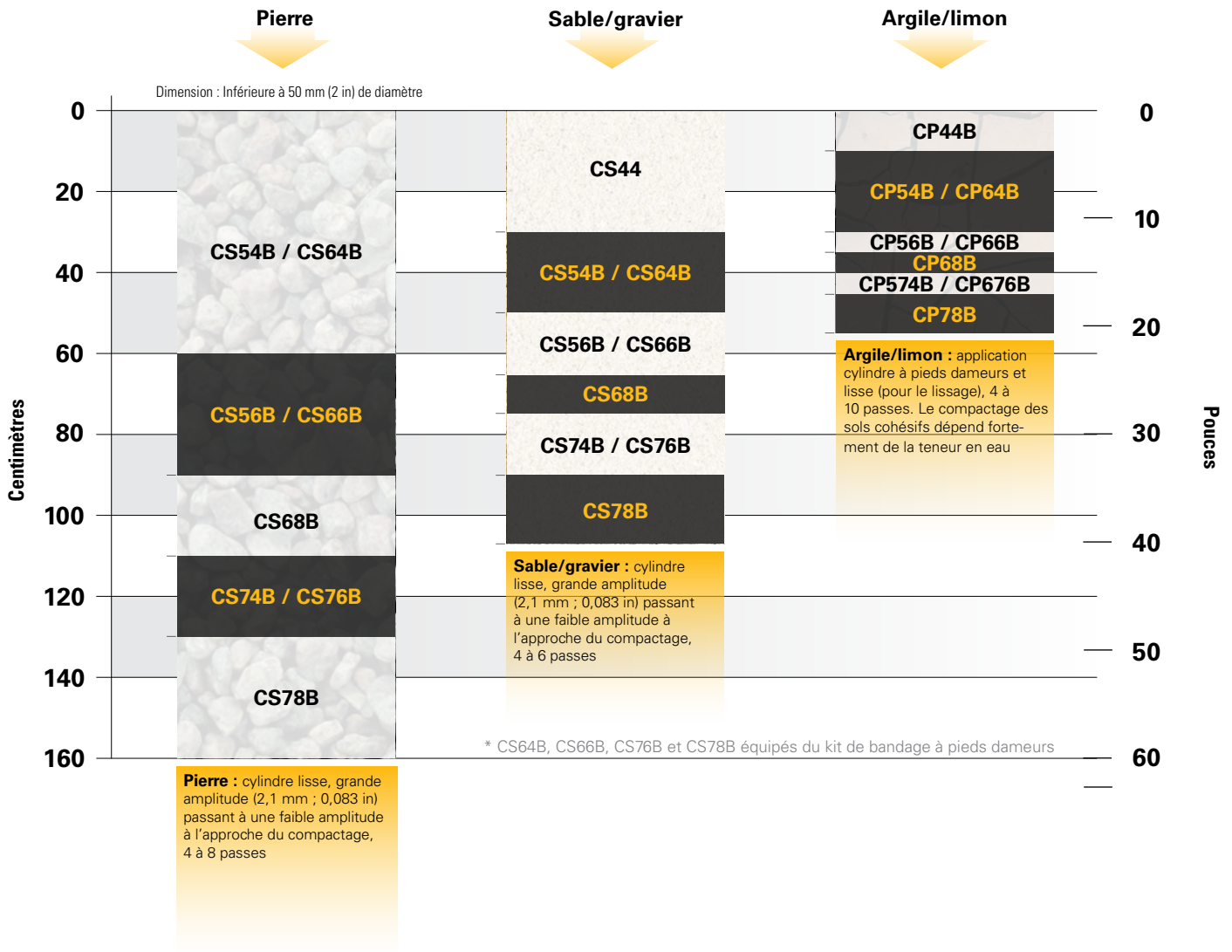


**Plaques arrière vibrantes** – Sur un matériau non cohésif, les compacteurs monocylindre vibrants peuvent être équipés de plaques arrière vibrantes, qui permettent d'obtenir une étanchéité de surface qui ne peut pas être atteinte avec le compacteur monocylindre vibrant seul. Ceci permet à l'opérateur d'avoir une idée du gradient de compactage : le compacteur monocylindre vibrant obtient un compactage en profondeur, et la plaque vibrante compacte et étanchéifie la surface.

Quand les plaques vibrantes ne sont pas nécessaires, déposez-les de la machine car leur poids peut réduire la charge linéaire du cylindre, ce qui peut avoir pour conséquence la nécessité d'effectuer des passes supplémentaires pour atteindre l'objectif de compactage.

**PROFONDEUR DE COMPACTAGE**

Part du principe que la spécification de densité est de 95 % de l'essai Proctor normal et peut varier considérablement en raison de différences de conditions du sol.







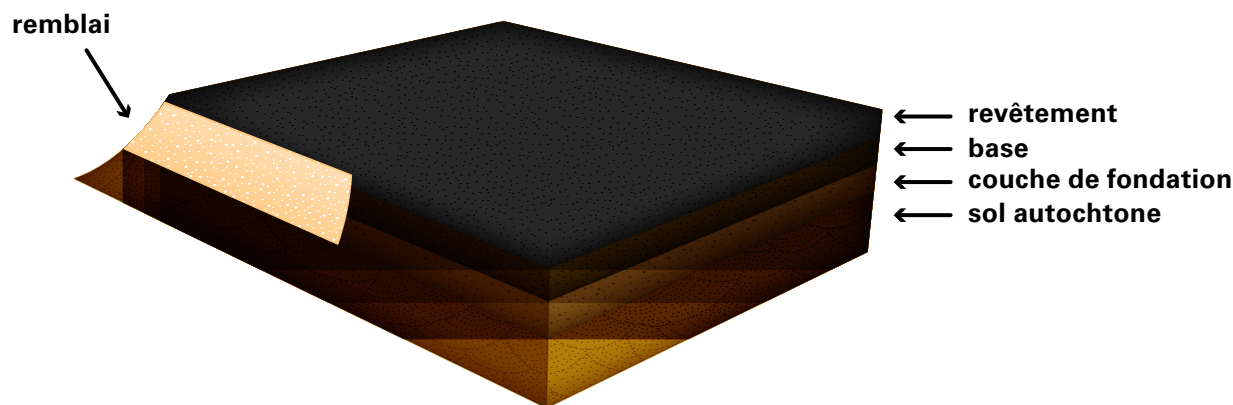


## Unité 4

# APPLICATION ET CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

Les paramètres du projet ont des conséquences importantes sur la mise en place des sols et leur compactage. Il vous sera utile d'apprendre à maximiser les résultats dans les conditions les plus variées pour vous aider à optimiser les rendements et éviter les reprises. Les méthodes de mesure ayant fait leurs preuves ainsi que les nouvelles méthodes vous aideront également à mieux gérer vos chantiers de compactage.





### [ ÉLÉMENTS DE STRUCTURE DU CHANTIER ]

Comme toutes les structures, une chaussée est composée de différents éléments qui jouent chacun un rôle spécifique. La terminologie peut varier selon les régions, mais ces éléments interagissent pour supporter la charge de circulation qui y transite.

**Sols naturels ou autochtones** – Parfois nommés « substrat », « couche de forme » ou « sol de fondation », il s'agit de la fondation d'une plateforme et comprend les sols et matériaux naturellement présents sans modification humaine ou chimique. Pendant le processus de construction d'une route, les sols en surface sont arrachés pour fournir une couche plane de niveau uniforme. Les matériaux exposés au fond de la découpe sont le sol naturel. Si les matériaux existants ne suffisent pas à supporter la charge de la chaussée, ils sont modifiés ou remplacés par des matériaux adaptés. La modification peut être mécanique et comprendre le compactage, le renforcement avec des géosynthétiques ou l'incorporation de granulats, ou encore chimique, par incorporation de liants tels que le ciment Portland, ou bien encore une combinaison de modification mécanique et chimique. L'objectif est d'améliorer la capacité portante du matériau. Enfin, cette fondation doit fournir le support adéquat à la structure qui sera placée dessus.

**Remblai** – Un remblai est tout ajout de terre aux emplacements dont la surface supérieure est plus haute que la surface adjacente. La plateforme est conçue pour être d'une certaine largeur et soutenir la route à un niveau et à une pente spécifiés. Dans certains cas, les ondulations naturelles du terrain peuvent requérir l'utilisation de matériau de remblayage pour fournir une couche de forme adéquate pour la plateforme. Les remblais sont conçus à cet effet en posant et en compactant des granulats adaptés pour former le terrain jusqu'à ce qu'il ait le niveau souhaité.

**Couche de fondation** – Les fonctions principales de cette couche sont de répartir la charge de la structure qu'elle soutient dans le substrat et de fournir une couche relativement plane sur laquelle est placée la couche de base. Cependant, la couche de fondation peut également remplir un certain nombre de fonctions supplémentaires en fonction de la composition du substrat, dont des fonctions de filtration ou de barrière contre l'eau capillaire. Cette couche contient en général principalement des matériaux du substrat, modifiés si nécessaire, et compactés. Il peut y avoir plusieurs couches de fondation, car il est possible d'ajouter des couches secondaires si des charges importantes doivent être supportées. En général, les granulats utilisés dans la couche de fondation sont plus gros que les granulats utilisés dans les couches que la couche de fondation supporte.

**Couche de base** – Les couches de base remplissent une fonction similaire à celle des couches de fondation. Elles répartissent également la charge qu'elles supportent et protègent contre les effets de l'eau et du gel. Il peut y avoir une seule ou plusieurs couches de base, selon les spécifications de la charge. La base est composée d'un mélange technique de gravier dont la taille de particules est inférieure à celle de la couche de fondation.

Les couches d'enrobé sont posées sur cette fondation. La qualité de la fondation affecte la longévité des couches d'enrobé qui y sont posées. Pour plus d'information sur les couches d'enrobé, consultez le « Guide du compactage d'enrobé » de Caterpillar.

**[ PROCÉDURES DE COMPACTAGE DU SOL ]**

**PLANIFICATION DU CHANTIER**

Avant de planifier un chantier de compactage, l'entrepreneur doit prendre en compte les questions suivantes, entre autres :

- Quelles sont la granulométrie et la classification du sol ?
- Quelles sont la densité sèche maximum et la teneur en eau optimum ?
- Quelles sont les exigences de compactage (%) ?
- Quels sont les réglages et la vitesse du compacteur ?

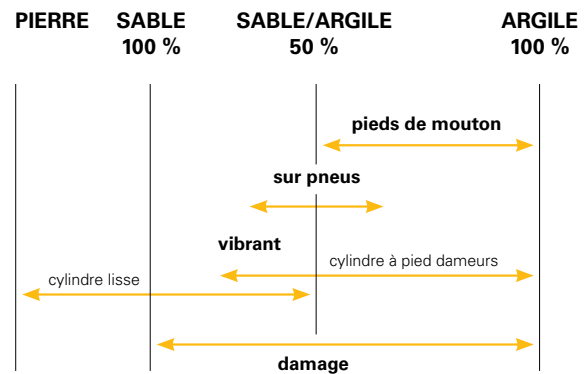
- Quelle est l'épaisseur de la couche ?

L'entrepreneur doit connaître le matériau, les exigences et l'application de chaque type d'équipement. Une fois ces variables connues, l'entrepreneur peut commencer à élaborer la meilleure approche du chantier, et peut également envisager les technologies disponibles qu'il pourrait appliquer.

**Application et dimensionnement du compacteur**

– Les caractéristiques de fonctionnement des différents types de compacteurs sont représentées dans la figure ci-contre. À des fins de comparaison, la figure ci-dessous représente les gammes d'applications dans lesquelles chaque compacteur est le plus performant. Les machines peuvent se superposer dans ces gammes, et il n'est pas rare de voir des machines travailler des matériaux hors de leur zone d'applications habituelle. Par conséquent, les informations figurant dans ces tableaux ne sont que des indications d'application.

**TABLEAU DES APPLICATIONS**



**Applications d'aménagement et de remblai**

– L'aménagement fait référence à une vaste gamme de constructions en terre, dont : la préparation des fondations, le nivellement, le remplissage et le remplissage de bassins. Il peut s'agir d'un chantier de construction, d'une route ou d'une autre surface ou structure.

**CARACTÉRISTIQUES EN ORDRE DE MARCHÉ DE L'ÉQUIPEMENT DE COMPACTAGE DES SOLS**

*Autotracté uniquement*

Machine	Pieds de mouton	Sur pneumatiques (15 tonnes et plus)	Pieds dameurs	Vibrant
<b>couche compactée épaisseur - mm (in)</b>	150 - 300 (6 - 12)	150 - 300 (6 - 12)	150 - 300 (6 - 12)	150 - 600 (6 - 24)*
<b>vitesse de travail moyenne - km/h (mph)</b>	6 - 10 (4 - 6)	6 - 19 (4 - 12)	16 - 32 (10 - 20)	2 - 8 (2 - 5)
<b>cycles</b> (1 cycle = 2 passes de la machine)	6 - 10	3 - 8	4 - 8	2 - 4

*\*Dépend de la taille du compacteur et de l'objectif de compactage*





### Remblai de pierre –

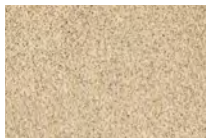
Les pierres sont un matériau de remblayage de plus en plus utilisé dans la construction de routes.

Elles sont également de plus en plus utilisées dans la construction de remblais de barrages, d'aéroports, de bâtiments et de ports. Les pierres abattues contiennent souvent tant de fines qu'elles se tassent fortement si le matériau n'est pas compacté.

Les remblais de pierre sont en général épandus en couches de 450 à 1 200 mm (18-48 in). La façon dont le matériau est épandu avant le compactage revêt une importance cruciale. L'épandage au tracteur par couches crée un remplissage uniforme, car la lame frontale réoriente les pierres et les chenilles exercent un certain compactage.

Par conséquent, une surface relativement dense et uniforme est préparée pour le compacteur.

Des forces de compactage importantes sont nécessaires après l'épandage pour replacer les grosses pierres afin d'atteindre une certaine densité et stabilité. Les compacteurs vibrants à cylindre lisse les plus grands sont sélectionnés pour cette tâche. Même ainsi, les compacteurs sont soumis à des contraintes importantes sur les remblais de pierres. Le cylindre doit être en acier épais de haute qualité. S'il y a un effet d'écrasement du matériau de surface, il peut être nécessaire de réduire le nombre de passes. Ou, si la machine est équipée de plus d'un réglage d'amplitude, il est possible d'utiliser une plus faible amplitude pour réduire la distorsion du matériau en surface.



### Sable et gravier –

Le compactage vibrant avec des machines à cylindre lisse est particulièrement adapté et économique sur le sable et le gravier. Il est possible d'atteindre des densités élevées en quelques passes, l'épaisseur de la couche étant déterminée par la taille du compacteur.

Le sable et le gravier perméables qui contiennent moins de 10 % de fines se compactent facilement, notamment quand ils sont presque saturés. Si une densité élevée est requise et que les couches sont épaisses, ajoutez de l'eau. Cette eau est drainée hors de la couche pendant le processus de compactage.

Si le sable et le gravier contiennent plus de 10 % de fines, le sol n'est plus perméable et peut devenir élastique si la teneur en eau est élevée. Ce type de sol a une teneur en eau optimum à laquelle il est possible d'atteindre une densité maximum. Le séchage du sol humide peut être nécessaire pour atteindre la teneur en eau optimum.

Sur le sable et le gravier à granulométrie insuffisante, il est difficile d'atteindre une densité élevée à proximité de la surface du remblai. Le sol à granulométrie insuffisante présente une faible résistance au cisaillement et la couche supérieure tend à gonfler derrière le cylindre. Ceci n'est pas un problème si plusieurs couches sont compactées. La couche supérieure précédente sera compactée lors du roulage de la couche suivante. Cependant, tenez compte de la difficulté de compactage de la surface lors des essais de densité.



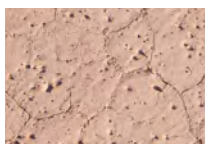
*Quand la teneur en eau est en dessous de l'optimum, il est possible d'ajouter de l'eau pour s'assurer que le compactage requis peut être atteint.*



**Limons** – Les limons sont des fines non plastiques qui sont en général compactées au moyen de compacteurs vibrants à cylindre lisse. Ils peuvent être épandus et roulés en couches épaisses.

Comme tous les sols à grains fins, leur compactibilité dépend de l'humidité. Pour des résultats de compactage optimum, la teneur en eau ne doit pas trop s'écarter de la teneur en eau

optimum. S'il y a trop d'eau, les limons approchent rapidement l'état liquide et le compactage est impossible. Ceci signifie qu'il peut être nécessaire d'aérer les couches avec des disques, de les mélanger avec du sol plus sec (procédure onéreuse) ou de mieux drainer le matériau d'emprunt. Les sols limoneux qui contiennent également de l'argile peuvent présenter une cohésion considérable. Sur ces sols, un compacteur à cylindre à pieds dameurs, un compacteur statique à pieds dameurs ou un compacteur sur pneumatiques obtiendra de meilleurs résultats.



**Argile** – Les argiles ont des propriétés plastiques, ce qui signifie que leurs caractéristiques de compactage dépendent fortement de la teneur en

eau. Quand la teneur en eau est faible, l'argile est dure et ferme. Au-dessus de la teneur en eau optimum, l'argile devient de plus en plus plastique et difficile à compacter.

Souvent, lors du compactage de l'argile, le problème principal est le besoin d'ajustement de la teneur en eau. L'ajout d'eau à l'aide de camions d'eau, l'utilisation de disques ou d'agents stabilisants prend du temps. L'infiltration d'eau dans la carrière d'emprunt peut représenter une meilleure alternative. Le séchage de l'argile humide peut être réalisé uniquement en cas de temps chaud et sec, même en cas d'utilisation de disques et d'agents stabilisants. L'on procède parfois à un roulage prolongé avec des compacteurs à pieds de mouton pour réduire la teneur en eau.

Même à la teneur en eau optimum, l'argile nécessite une énergie de compactage supérieure et une épaisseur de couche moindre par rapport aux sols non cohésifs. Les compacteurs à cylindre à pieds sont les plus adaptés car les pieds pénètrent dans le sol et cassent les liaisons cohésives naturelles entre les particules. Les compacteurs sur pneumatiques peuvent être utilisés sur des argiles avec un indice de plasticité faible à moyen.



*Quand la teneur en eau est trop élevée, l'ouverture du sol accélère le temps de séchage.*

Sur les chantiers présentant une exigence de production élevée et dans lesquels de l'argile est utilisée comme matériau de remplissage, il est possible d'obtenir de bons résultats en utilisant des compacteurs statiques à pieds dameurs associés à des compacteurs vibrants à cylindre à pieds dameurs. Les compacteurs statiques à pieds dameurs équipés de lames frontales épandent efficacement le remblai et cassent facilement les gros morceaux d'argile durs qui se trouvent souvent dans les matériaux d'emprunt argileux. Ces machines effectuent les premières passes. La densité finale est atteinte à l'aide de compacteurs vibrants à cylindre à pieds dameurs.

### Applications couche de base et de fondation –

La couche de base et de fondation sont les couches construites sur un remblai ou un sol naturel. Ces couches servent de fondation pour la mise en place d'une structure de surface telle qu'une route ou un bâtiment. La résistance augmente à mesure qu'elles approchent de la surface de finition.

**Sols naturels (autochtones)** – D'un point de vue économique, il est préférable d'utiliser les sols disponibles sur place. Si ces sols sont adaptés, ils peuvent être utilisés sans traitement chimique ou additif. Un bon compactage de ces sols augmente sensiblement leur capacité portante et permet de contrôler d'autres facteurs tels que la perméabilité, l'action de capillarité, ainsi que le retrait et le foisonnement.

**Sols traités (stabilisation du sol)** – Le mélange de produits chimiques à des sols naturels ou d'emprunt peut fortement en augmenter la stabilité et les caractéristiques de capacité portante. Ce procédé s'appelle la stabilisation du sol.

Après mélange de chaux ou de ciment dans le sol, celui-ci devrait être compacté à l'aide d'un compacteur vibrant. Le type de compacteur utilisé dépend des caractéristiques d'origine du sol non traité, mais, en général, il convient d'utiliser un compacteur vibrant de 15 tonnes (33 000 lb). En présence d'un grand volume de sol cohésif, un compacteur statique à pieds dameurs peut s'avérer plus économique qu'un compacteur vibrant. Il est possible de compacter les volumes moins importants avec un compacteur sur pneumatiques.

Au début du travail, il est recommandé de procéder à un essai d'adaptation de la stabilisation pour s'assurer que les résultats sont suffisants.

**Roche concassée** – Les spécifications du chantier peuvent requérir l'utilisation de roche concassée à granulométrie étalée pour la couche de base et de fondation. En cas d'utilisation de matériau concassé, il est possible de contrôler la granulométrie pendant le processus de concassage pour respecter les spécifications. La roche concassée est en général plus facile à épandre et à compacter que les sols fins. Par ailleurs, les résultats de compactage sont plus facilement prévisibles. Cependant, ces avantages au compactage sont pondérés par le coût

des matériaux utilisés dans ces couches dépendent du type de charges que la route ou le bâtiment devront supporter.

En général, des spécifications très strictes sont définies pour les matériaux de base et de fondation, pour l'épaisseur de la couche, la densité requise et le module de déformation.

L'équipement de compactage devra être sélectionné en fonction du type de sol. En général, des sols granulaires non cohésifs sont spécifiés pour le matériau de la couche de base et de fondation. Les compacteurs à cylindre lisse ou sur pneumatiques sont le plus souvent utilisés pour cette application.



*La stabilisation du sol améliore les qualités techniques d'un sol.*

du concassage et les trajets de transport vers le chantier souvent plus longs.

La roche concassée est en général transportée sur le chantier en camions à vidage par l'arrière et mise à niveau avec une niveleuse ou une épanduse. Le matériau de base est ensuite épandu et mis en forme en couches allant de 150 à 250 mm (6-10 in). Après l'épandage, le compactage est réalisé par des compacteurs à cylindre lisse (statique ou vibrant) ou des compacteurs sur pneumatiques.



## [ CONSEILS POUR LE COMPACTAGE DU SOL ]

Malgré sa simplicité apparente, le compactage du sol peut être l'un des aspects les plus difficiles d'un projet de construction. Sur leurs équipements de compactage, de nombreux fabricants offrent des options qui permettent à l'opérateur de régler les vibrations, la fréquence et l'amplitude de la machine pour respecter les spécifications du chantier.

Il n'y a pas de façon facile de régler les paramètres de fonctionnement d'un compacteur en fonction du matériau à compacter. La meilleure méthode est souvent le tâtonnement. Naturellement, l'utilisateur devra sélectionner un compacteur de taille appropriée (largeur du cylindre, poids, etc.) pour répondre aux exigences de production. Cependant, pour obtenir l'énergie de compactage maximum, il est souvent nécessaire de procéder par essais successifs avec des variables que l'opérateur peut contrôler (fréquence, amplitude et vitesse de roulement), puis d'analyser les performances et de procéder aux réglages nécessaires.

Les fabricants intègrent de plus en plus de technologie dans leurs machines afin d'aider l'opérateur à maximiser leur efficacité. Mais, même en augmentant la technologie et la sophistication des équipements, pour obtenir les meilleurs résultats de compactage du sol, vous devrez peut-être revoir certains principes de base de compactage des sols qui ont fait leurs preuves sur les chantiers depuis des années. Vous trouverez ci-après des conseils de compactage des sols pour vous donner une orientation de base.

### QUEL COMPACTEUR POUR QUELLE APPLICATION ?

#### MATÉRIAU COHÉSIF

*Couches fines*

Compacteur monocylindre (pieds dameurs)



#### MATÉRIAU FIN

*Sensible à l'eau*

Compacteur monocylindre, lisse ou à pieds dameurs



#### MATÉRIAU DE FRICTION

*(sable 0,063-2 mm/0,002-0,07 in)*

*Perméable en cas de teneur en fines < 7 %*

Compacteur monocylindre, compacteur tandem, compacteur sur pneumatiques



#### MATÉRIAU À GROS GRAINS, PERMÉABLE

*Matériau de friction*

Compacteur monocylindre, compacteur tandem



#### GROS GRAINS

*(gravier 2-63 mm/0,07-2,5 in)*

*Perméable*

*Matériau de friction*

Compacteur monocylindre, compacteur tandem



#### MATÉRIAUX GROSSIERS

*Particules lourdes*

Gros compacteur monocylindre à grandes plaques (>12,7 tonnes)



	Perméabilité	Support de fondation	Couche de forme du revêtement	Expansif	Difficulté de compactage
<b>Gravier</b>	Très élevée	Excellent	Excellent	Non	Très facile
<b>Sable</b>	Moyenne	Bon	Bon	Non	Facile
<b>Limon</b>	Moyenne-basse	Mauvais	Mauvais	Un peu	Un peu
<b>Argile</b>	Aucune+	Modéré	Mauvais	Difficile	Très difficile
<b>Organique</b>	Faible	Très mauvais	Non acceptable	Un peu	Très difficile

**Uniformité de la couche, vitesse et plan de compactage** – La structure des bâtiments et des routes dépend des bases du sol qui ne doivent pas uniquement être compactées selon les spécifications, mais également de façon uniforme. Les variations de densité de la couche de base peuvent causer des nids de poule ou des ornières sur les routes et des tassements des fondations sous les bâtiments. L'une des causes les plus importantes de variation de densité du sol est l'utilisation de différents types de sols côte-à-côte.

Comme ces différents types de sol se compactent différemment et donnent différents résultats de compactage, veillez à utiliser des matériaux similaires pour chaque couche lors de la construction. Si différents types de matériaux sont requis, essayez d'utiliser le même type pour chaque couche, n'utilisez pas de matériaux différents sur un épandage horizontal. Ceci est essentiel pour obtenir des résultats de compactage uniformes.

L'une des autres causes de variation de densité est une teneur en eau non homogène. Étant donné qu'il est plus difficile de compacter un sol trop sec ou trop humide, la teneur en eau optimum déterminée à l'aide de l'essai Proctor doit toujours être recherchée pendant le compactage, sur tout le chantier. Ceci permet d'obtenir les résultats les plus uniformes et denses possibles.

En général, l'épaisseur de la couche n'est pas strictement contrôlée, à l'exception peut-être de la couche de base sous un revêtement. Si tous les autres facteurs, tels que la teneur en eau et le type de matériau, sont constants, une épaisseur de

**Épaisseur de couche** – La technologie des compacteurs évolue en permanence et offre plus d'options et de possibilités de variation du processus de compactage. Cependant, après application d'une énergie de compactage égale, même avec le compacteur le plus sophistiqué, les couches épaisses de matériau sont moins denses que les couches moins épaisses. Il y a des exceptions à cette règle, mais il convient toujours de définir une épaisseur d'une couche qui optimise la productivité en fonction de la densité et du nombre minimum de passes du compacteur requis.

L'état de la couche précédente ou de la couche de base sous-jacente a également un effet sur le compactage. Si une couche sous-jacente n'a pas été compactée correctement, elle contiendra des zones relativement meubles. Le compactage



couche uniforme donne une densité uniforme sur le chantier. Si l'épaisseur de la couche est négligée, vous risquez de ne pas remplir les spécifications du chantier.

De même, l'on accorde souvent trop peu d'attention aux autres facteurs qui affectent le compactage, notamment à la couverture et au nombre de passes. Les paramètres tels que le nombre de passes, la vitesse du compacteur et les réglages des vibrations peuvent être facilement contrôlés. La technologie de compactage intelligent, comme le Cat Compaction Control avec cartographie GNSS peut fournir une référence visuelle pour s'assurer que la couverture et le nombre de passes sont respectés. Une couverture uniforme est plus efficace et sera plus réussie qu'un compactage aléatoire du matériau.



de la couche suivante aura alors des résultats variables non souhaitables. Chaque couche doit être compactée entièrement et uniformément pour s'assurer que les couches suivantes seront compactées correctement elles aussi.

**Énergie de compactage** – L'énergie de compactage est la quantité d'énergie transmise dans le sol afin d'en réorganiser et d'en compacter les particules. Les différents paramètres de la machine tels que le poids, la largeur, la pression des pneus, l'amplitude de vibration et la fréquence peuvent modifier l'énergie de compactage. Certains de ces paramètres peuvent être réglés sur une machine. Pour d'autres, la largeur par exemple, une machine différente peut être nécessaire pour modifier l'énergie de compactage. Certaines plages de valeurs de ces paramètres sont nécessaires pour chaque projet.



**Vitesse de travail** – En général, la vitesse de déplacement joue un rôle important dans la productivité du chantier. Plus la machine est rapide, plus le travail est terminé rapidement. Cependant, avec les compacteurs vibrants, contrairement aux autres types de compacteurs, la productivité augmente en général en réduisant la vitesse de déplacement. Il existe une vitesse optimum de rentabilité qui permet à un compacteur d'obtenir le compactage requis.



**Règles générales de mise en place et de compactage du sol** – Ci-après figurent des règles générales que vous, la direction du chantier et les opérateurs devrez prendre en compte au début de chaque projet de compactage.

- Lors de la pose d'une nouvelle couche de matériau, épandez-le uniformément sur toute la zone. Ne posez pas de sol ayant une teneur en eau trop élevée. Épandez le matériau avec une niveleuse à déplacement lent et mettez en forme le profil approprié. N'enterrez pas les couches saturées sous de nouveaux matériaux.
- Les cavités en surface ou les zones présentant une ségrégation visible doivent être supprimées en y ajoutant du matériau à granulométrie étalée de même composition.
- Immédiatement après l'épandage, compactez le sol, en commençant par l'extérieur et en travaillant vers le centre de la zone.
- Les zones de remblai/épaulement doivent également être compactées. Compactez l'épaulement en partant des bords extérieurs et travaillez vers le centre. Lissez et étanchéifiez la surface.
- Lorsque vous travaillez avec des matériaux sensibles aux intempéries, tous les sols posés doivent avoir une pente de talus de 6 % environ pour éviter l'accumulation d'eau.
- En cas de mauvais temps, compactez chaque couche en travaillant sur une bande de la largeur d'un compacteur monocylindre jusqu'à ce qu'elle soit compactée. Passez ensuite à la bande suivante, en répétant le processus et procédez ainsi pour toute la couche jusqu'à ce que toute la zone soit compactée. Veillez à lisser et à étanchéifier la surface en fin de journée pour éviter la pénétration d'eau supplémentaire.
- Lorsque vous compactez une base meuble, il convient d'utiliser une basse amplitude et une fréquence élevée si la base est suffisamment rigide. Utilisez une amplitude élevée et une fréquence moyenne à basse quand vous compactez la base avec la première couche.
- Les meilleurs résultats sont parfois obtenus en utilisant une combinaison de compactage statique et vibrant (d'abord vibrant puis statique).



## [ MÉTHODES DE MESURE DU COMPACTAGE ]

La densité est la méthode conventionnelle de quantification du compactage du sol en laboratoire, et la méthode la plus utilisée d'un point de vue historique pour définir et mesurer les exigences de compactage sur le terrain. Les essais de laboratoire (Proctor par exemple), déterminent la teneur en eau à laquelle la densité maximum peut être obtenue. Les densités cibles sur le terrain sont exprimées en pourcentage de la densité sèche maximum en laboratoire.

En général, les densités sur le terrain requises sont de 95 % de l'essai Proctor normal pour les remblais et jusqu'à 100 % de l'essai Proctor modifié pour les fondations de chaussées. De même, la teneur en eau doit être comprise dans une plage donnée de la teneur en eau optimum déterminée en laboratoire.

Des essais de terrain point à point ont longtemps été exigés pour s'assurer que les deux éléments essentiels (densité cible et teneur en eau) étaient

conformes aux spécifications sur la totalité d'un chantier de construction donné. Ces essais peuvent également indiquer le rendement des équipements de compactage et des méthodes de construction utilisées. Depuis peu, les méthodes de mesure du compactage intégrées à la machine sont mieux acceptées comme moyen de déterminer la qualité du compactage sur le chantier.

De nombreux organismes exigent désormais le « compactage intelligent », qui désigne l'association des systèmes de mesure du compactage intégrés à la machine à des systèmes de cartographie qui relient les mesures à leur emplacement sur le chantier et fournissent des données pour l'analyse et la documentation.

## HISTORIQUE DE LA MESURE DU COMPACTAGE



**méthodes traditionnelles**

- Contrôle du processus/ spécifications de méthode
- Essai « point à point »
  - *Jauge Troxler/nucléaire*
  - *Pénétromètres*
  - *Défectomètres*
  - *Essais à la table*

Relativement précis

Teste en général un échantillon inférieur à 1 % de la zone de travail totale



**mesure du compactage intégrée à la machine**

- Accéléromètre
  - Machine Drive Power (MDP)
- Indications en temps réel pour l'opérateur de la rigidité ou de la capacité portante
- Difficile à corréler avec les mesures traditionnelles point à point
- Variabilité de la mesure dans certains types de sol ou applications



**compactage intelligent**

- Ajoute des fonctions de cartographie satellite
- Renforce la mesure du compactage intégrée à la machine en corrélant les mesures et les données de la machine avec l'emplacement exact où elles ont été prises
- Fournit des cartes détaillées pour voir le travail réalisé
- Fournit des données pour l'analyse et la documentation

Certaines méthodes les plus courantes sont détaillées ci-après. Tenez compte du fait que chaque méthode d'essai mesure les propriétés du sol différemment (densité, résistance, etc.), et que, par conséquent, pour corrélérer les résultats des différents essais, il est nécessaire de

### Méthodes de mesure sur le terrain

**(traditionnelles)** – Mesures concernant la densité du sol : deux méthodes de base sont principalement utilisées pour mesurer la densité du sol sur le terrain :

#### 1. Mesure de la réponse du sol aux particules radioactives avec une jauge dite Troxler ou « jauge de densité nucléaire ».

Ces appareils se sont imposés comme la méthode la plus courante de mesure de la densité du sol sur le terrain, mais ils présentent l'inconvénient d'exiger une licence d'utilisation et une surveillance/un essai périodique de la source de rayonnement nucléaire de l'appareil. Des démarches administratives et des autorisations sont souvent exigées pour transporter les appareils.

L'appareil donne une indication de la teneur en eau à une profondeur de 50 mm (2 in) environ et de la densité à une profondeur de 300 mm (12 in) ou moins en émettant respectivement des neutrons et des rayons gamma dans le sol testé. Cet essai est rapide et peut être réalisé sans altérer le matériau. Les meilleurs résultats sont obtenus dans les sols homogènes.

Il existe trois procédures de base pour mesurer la densité avec une jauge nucléaire : transmission directe, rétrodiffusion et utilisation de la « méthode de l'éloignement ».

La *méthode de transmission directe* est la plus précise, donne le moins d'erreurs de composition et de rugosité de surface. Elle peut être utilisée pour tester une gamme de profondeurs de 50 à 300 mm (2-12 in). L'aspect le plus important de la méthode de transmission directe est que l'opérateur contrôle directement la profondeur de mesure.

La *méthode de rétrodiffusion* élimine le besoin de creuser un trou d'accès dans le sol compacté parce que l'unité repose sur la surface. Cependant, la précision est réduite et les erreurs de composition sont possibles. Cette méthode fonctionne mieux à de faibles profondeurs de 50 à 75 mm (2-3 in).

comprendre leurs différences d'un point de vue physique. Par ailleurs, par essence, la procédure d'essai point à point nécessite de partir de l'hypothèse que les résultats de l'essai point à point s'appliquent également aux zones adjacentes non testées ou à tout le chantier.



Jauge dite Troxler ou jauge de densité nucléaire

La *méthode d'éloignement* offre une amélioration en termes d'erreur de composition et peut être utilisée en mode direct ou rétrodiffusion. L'appareil d'essai est soulevé au-dessus de la surface testée pour réduire l'erreur de composition, mais la précision n'atteint toujours pas celle de la méthode de transmission directe.

Les équipements d'essai nucléaires sont limités par les précautions à prendre lors de la manipulation de matériaux radioactifs et par le fait que les sols ou matériaux organiques ayant une teneur en sel et/ou radioactive élevée peuvent causer des erreurs de mesure. Les vibrations du sol provenant des équipements de construction peuvent également être une source d'erreurs de mesure.



La méthode du cône de sable a prouvé son efficacité.

**2. Excavation et pesée d'un volume de sol et mesure du volume du trou où ce dernier a été prélevé.** La pesée d'un échantillon de sol est directe si une balance précise est disponible. La mesure du volume du trou dans lequel l'échantillon de sol a été prélevé n'est pas aussi simple, mais deux procédures ont été mises au point à cet effet et sont utilisées avec une précision raisonnable. Deux exemples sont décrits ci-dessous :

*Méthode du cône de sable* – La méthode du cône de sable est une procédure en plusieurs phases qui prend plus de temps que la méthode par jauge nucléaire ou Troxler, mais sa précision est démontrée. Elle est parfois utilisée en association avec la méthode nucléaire pour vérifier l'étalonnage de la jauge de densité nucléaire. Cette méthode se concentre sur la mesure du volume de sable nécessaire pour remplir le vide laissé par l'échantillon de sol prélevé. Le sable s'écoule facilement dans un vide et a une densité consistante, ce qui signifie qu'il ne change pas sensiblement de densité lorsqu'il est transféré d'un récipient au vide du sol.

*Méthode du ballon* – La méthode du ballon est également nommée essai au densimètre Washington. Les trois premières étapes de l'essai (creuser un échantillon, le peser et le sécher) sont les mêmes que pour la méthode du cône de sable. Elles permettent de calculer la teneur en eau.

Cependant, au lieu d'utiliser un cône de sable pour mesurer le volume du trou creusé, on utilise un densimètre Washington. Le densimètre, appareil rempli de liquide, est placé au-dessus du trou. Un ballon attaché à la plaque de base est placé dans le trou. Une vanne est ouverte sur le côté du densimètre et le liquide étalonné entre en force dans le ballon. À mesure que le ballon se remplit, il prend la forme du trou. Le densimètre est étalonné de façon à ce que la personne qui réalise l'essai puisse lire le volume de liquide et ainsi le volume du trou.

La densité (densité humide) est déterminée en divisant le poids de l'échantillon creusé par le volume du trou, comme avec la méthode du cône de sable. La densité sèche peut également être calculée en divisant la densité humide par un plus la teneur en eau.

La méthode du ballon présente les limites suivantes : le temps nécessaire pour obtenir les résultats et le fait que la précision dépend de la capacité du ballon à se conformer aux irrégularités des bords du trou.





Utilisation d'un pénétromètre dynamique à cône.

#### Mesures de résistance et de rigidité du sol –

La densité du sol est la mesure conventionnelle de compactage du sol, pour définir les exigences et évaluer les résultats. Cependant, l'on tend de plus en plus à utiliser des mesures de compactage du sol plus directement liées aux exigences techniques, qui concernent le plus souvent la résistance du sol. Plusieurs mesures de résistance sont utilisées sur le terrain, nous en décrivons quelques unes dans ce guide. Les mesures de résistance utilisées sur le terrain rentrent dans trois catégories principales :

#### 1. Résistance du sol à la pénétration –

La mesure de pénétration du sol la plus couramment utilisée est celle du *pénétromètre dynamique à cône (DCP)*. L'essai permet de mesurer la force/énergie ou la résistance au cisaillement/de frottement nécessaire pour faire pénétrer un petit cône dans le sol à l'aide d'un marteau de poids fixe qui tombe à une distance connue. Cet appareil peut être utilisé pour estimer l'indice portant californien et les valeurs de portance en newtons par millimètre carré (livres par pouce carré) jusqu'à une profondeur de 1 830 mm (72 in). Une utilisation incorrecte du marteau ou un comptage incorrect des coups du marteau et de la modification de profondeur par coup (ou série de coups) cause des mesures erronées. L'utilisation dans des sols rocheux peut également produire des résultats contestables.

Le cône généralement utilisé a une surface de base de 20 mm (¾ in) avec un angle de pointe de 60°. Le cône entre dans le sol par la chute d'un poids heurtant une plaque qui transmet la force dynamique au cône et le fait entrer dans le sol. Les données sont notées comme distance de pénétration par coup. Dans les sols durs, plusieurs coups sont nécessaires pour que le cône pénètre dans le sol, et le nombre de coups et la distance de pénétration sont notés.

Le DCP a l'avantage de mesurer la résistance du sol à une profondeur plus importante que les autres méthodes. Un cône peut pénétrer d'1 m (39 in) et plus, bien que le frottement du sol sur l'arbre du pénétromètre du cône puisse influencer la mesure (notamment à plus d'1 m de profondeur). Le DCP ne fonctionne pas sur les matériaux très durs, tels que le sol stabilisé à la chaux après traitement. Il est intense du point de vue physique et peut être fatigant après une utilisation répétée.

### 2. Réponse d'un sol à la chute d'un poids –

Le principe sous-jacent est le suivant : les sols plus rigides causent plus de rebond quand un poids chute sur leur surface. Le déflectomètre à masse tombante portable (LWD) permet d'effectuer cette mesure. Il en existe une version plus lourde, le déflectomètre à masse tombante.

Le *défectomètre à masse tombante portable (LWD)* mesure la rigidité du sol ou le module élastique des couches de surface de la construction en faisant tomber un poids fixe à une distance connue sur une plaque équipée d'un ou de plusieurs accéléromètres et d'autres capteurs. En détectant le fléchissement, ou le mouvement de la plaque, le module d'élasticité dynamique du sol est calculé en mégapascals (MPa) à une profondeur de 150 mm environ (6 in). Pour son utilisation, la surface du sol doit être lisse et plate. Des essais ont montré que les déflectomètres de différents fabricants donnent des résultats différents pour les mêmes conditions du sol.

Le *défectomètre à masse tombante (FWD)* est une version plus grande de l'appareil portable décrit ci-dessus.

Le FWD est monté sur remorque et n'est pas facile à transporter, mais il utilise les mêmes principes pour heurter une plaque bien plus grande, créant ainsi une zone d'influence plus étendue et permettant une mesure à une profondeur plus importante. Alors que le LWD peut mesurer à une profondeur de 150 mm (6 in), la version FWD peut transmettre une énergie qui peut aller à 1 m (39 in) dans le sol, qui ressemble plus à l'impact créé par un compacteur vibrant.



Un déflectomètre à masse tombante portable

### 3. Résistance du sol à un poids statique –

Cette méthode est similaire aux essais à masse tombante car elle mesure la rigidité du sol depuis sa surface, mais elle est différente car elle utilise une pression statique au lieu d'une force dynamique. Étant donné que l'objectif du compactage est de produire un sol rigide, il est nécessaire d'utiliser une force importante pour obtenir un fléchissement efficace avec une pression statique. Pour mesurer la rigidité du sol, une plaque de dimensions approximativement égales à la profondeur de mesure souhaitée doit être utilisée, c'est-à-dire une plaque d'un diamètre proche de 30 cm (12 in) plutôt qu'une plaque de quelques centimètres (ou pouces).

*Essai à la table* – Il existe plusieurs appareils d'essai à la table, avec différents diamètres de plaque. Plus le diamètre de la table est grand, plus la force nécessaire pour créer un mouvement vers le bas de la table dans le sol est importante. Quand la table est chargée, le fléchissement pour une force donnée est mesuré et tracé. Ceci donne le module du sol (rigidité) et indique la capacité portante du sol. Pour les essais avec une grande table, une force de plusieurs milliers de livres est nécessaire pour enfoncer la plaque dans le sol (en général 300 mm [12 in]).



Préparation d'un essai à la table

Les équipements de constructions disponibles sont souvent utilisés comme source de la charge. Les mesures à l'aide d'essais à la table sont utilisées directement pour définir l'épaisseur du revêtement.





*Un compacteur d'essai*

*Autres mesures sur le terrain* – Enfin, d'autres méthodes de mesure du compactage sur le terrain mais qui ne rentrent pas dans les catégories décrites plus haut sont utilisées. Ces méthodes sont utilisées depuis de nombreuses années, seules ou associées à d'autres essais pour définir la capacité portante d'un sol. Un grand nombre d'entre elles sont encore utilisées aujourd'hui.

**1. Compacteur d'essai** – Le roulage d'essai est couramment utilisé en Amérique du Nord comme méthode alternative d'essai ponctuel afin d'identifier directement la réponse de la surface compactée à une charge appliquée. Cet essai permet d'identifier les points meubles et d'assurer une capacité portante uniforme. Le processus comprend le roulage d'une masse lourde sur roues sur une surface compactée et la mesure de la profondeur des ornières ou du fléchissement. Des ornières trop importantes indiquent un compactage incorrect.

**2. Étuve d'humidité de sol portable** – L'étuve d'humidité de sol portable est un appareil servant à mesurer la teneur en eau du sol pour la corrélérer aux mesures de capacité portante effectuées par d'autres appareils. Les mesures d'autres appareils décrits ici ne sont pas valides si la teneur en eau du sol n'est pas connue.

L'essai de roulage n'offre pas une mesure aussi directe de la résistance du sol que certaines des mesures décrites précédemment, mais s'avère une mesure plus directe de la qualité du compactage quand l'objectif du compactage est simplement d'augmenter la rigidité du sol pour des structures comme des routes ou des parkings. Si la base du sol n'ornièrè pas sous le poids d'un compacteur d'essai chargé, elle ne devrait pas fléchir sous l'effet de la circulation, en supposant que la route est bien drainée et reste stable dans le temps.

De toutes les procédures conventionnelles d'essai du compactage, le roulage d'essai est la méthode qui fournit la plus grande taille d'échantillon car elle permet de tester de façon économique un espace bien plus étendu que les essais ponctuels.



*Une étuve d'humidité de sol portable*

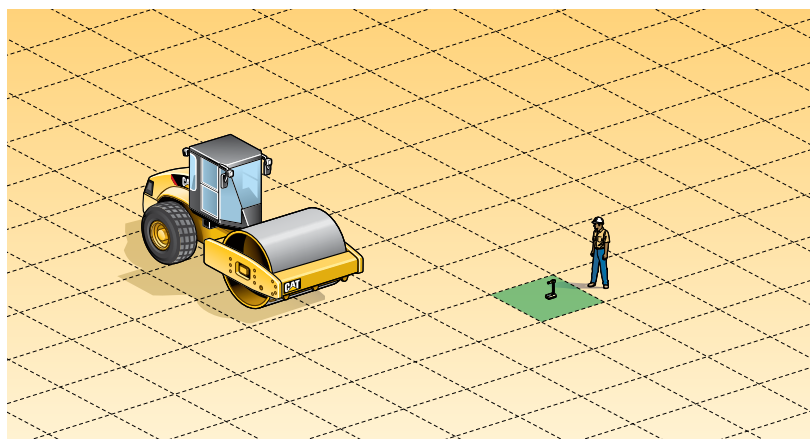


### Méthodes de mesure du compactage intégrées à la machine

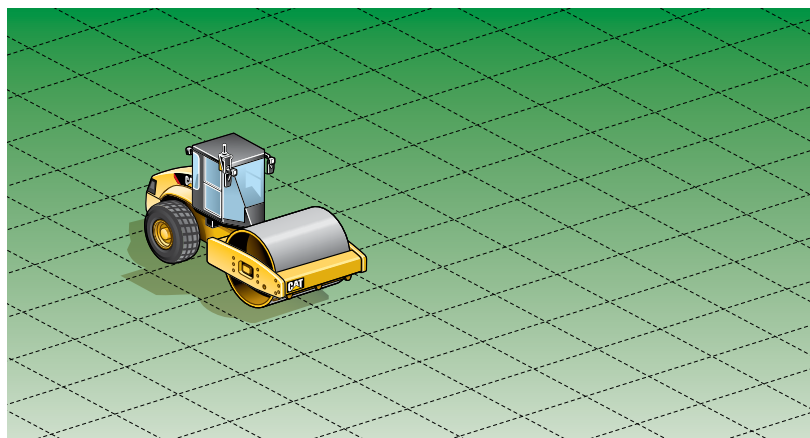
– D'un point de vue historique, le compactage est principalement un processus de tâtonnement. Les opérateurs, en l'absence de données fiables sur l'état du sol, se fient à leur expérience et à leurs impressions pour décider si le compactage est terminé. Ou alors, une spécification de méthode indique une procédure mise au point par les ingénieurs pour produire des résultats satisfaisants si elle est suivie correctement. Le sol compacté est ensuite soumis à des essais ponctuels sur une zone donnée. Si les résultats ne sont pas satisfaisants, la zone est reprise. En alternative aux essais ponctuels, des compacteurs d'essai sont utilisés sur certaines zones, en général une remorque lourdement chargée ou un camion benne. Comme indiqué plus haut, le compacteur d'essai est remorqué sur le site et la profondeur des ornières indique les zones de compactage insuffisant.

Quelle que soit la méthode d'essai de la qualité de compactage, les opérateurs émettent surtout des suppositions sur la qualité de leur travail à mesure que le chantier avance. La méthode de contrôle de la qualité à l'aide d'essais ponctuels et d'essais de roulage teste une surface proportionnellement petite par rapport à la surface totale compactée, bien plus étendue. Ceci comporte le risque que de nombreuses zones ne soient pas suffisamment compactées, problème qui peut s'avérer onéreux s'il cause par la suite un défaut du bâtiment ou de la route.

Les systèmes de mesure du compactage intégrés à la machine changent la donne en fournissant aux opérateurs des données sur l'état du compactage. Les opérateurs formés peuvent utiliser la mesure du compactage intégrée à la machine pour savoir quand le compactage est conforme aux spécifications, ou quand une zone a des problèmes d'humidité. La mesure du compactage intégrée à la machine peut les alerter en cas de présence d'objets enterrés qui peuvent affecter la qualité du compactage (boules d'argile, troncs d'arbres ou grosses pierres).



*Les systèmes de mesure conventionnels analysent uniquement une petite partie de la surface compactée.*



*La mesure du compactage intégrée à la machine analyse la totalité de la surface compactée.*



*Les systèmes de mesure du compactage intégrés à la machine fournissent une prévision ou une indication de la rigidité du sol.*

Que mesure la technologie de compactage intégrée à la machine ? Il est important de comprendre que ces systèmes ne mesurent pas la densité du sol, bien que le terme densité soit fréquemment utilisé lorsque l'on aborde les résultats. En raison de la variabilité du processus de compactage, ils n'effectuent aucune mesure directe. Ils mesurent un certain nombre de facteurs qui donnent une prévision ou une indication concernant la rigidité du sol. Comme indiqué plus haut, la rigidité est la capacité d'un sol d'une certaine forme et composition à résister au fléchissement sous l'influence d'une charge. C'est une meilleure

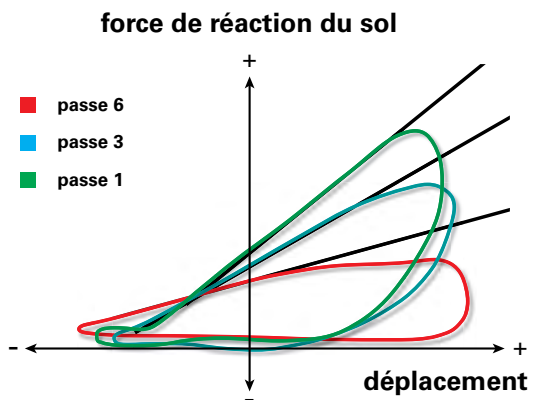
indication de la capacité portante que la densité du matériau, car certains matériaux denses peuvent être fragiles sous charge. Le matériau doit être souple, mais ne doit pas casser.

Deux types de technologies de mesure différents sont disponibles : les systèmes à accéléromètre et les systèmes à mesure d'énergie. Ils mesurent de façon totalement différente, et par conséquent ne mesurent pas la même chose.

**Mesure à accéléromètre** – Les systèmes à accéléromètre sont disponibles chez la plupart des fabricants. Ils utilisent un accéléromètre monté sur le cylindre pour mesurer la réaction du sol aux chocs du cylindre vibrant. Ces mesures sont effectuées à l'aide de deux méthodes.

La première est la méthode des déplacements de force. Elle utilise un accéléromètre monté sur l'essieu du cylindre pour mesurer le déplacement du cylindre. En mesurant l'accélération du cylindre, en connaissant les caractéristiques de ce dernier, du système vibrant, le poids hors tout et la distribution de la machine, il est possible de calculer la force nécessaire pour obtenir un déplacement donné. Plus le sol est rigide, plus la force nécessaire pour que le cylindre entre dans le sol à une certaine profondeur est grande. En d'autres termes, une force constante enfonce moins le cylindre dans le sol à mesure que ce dernier se rigidifie. Étant donné que la zone de contact du cylindre varie avec l'impact dans le sol, cette méthode est une estimation et non une mesure exacte.

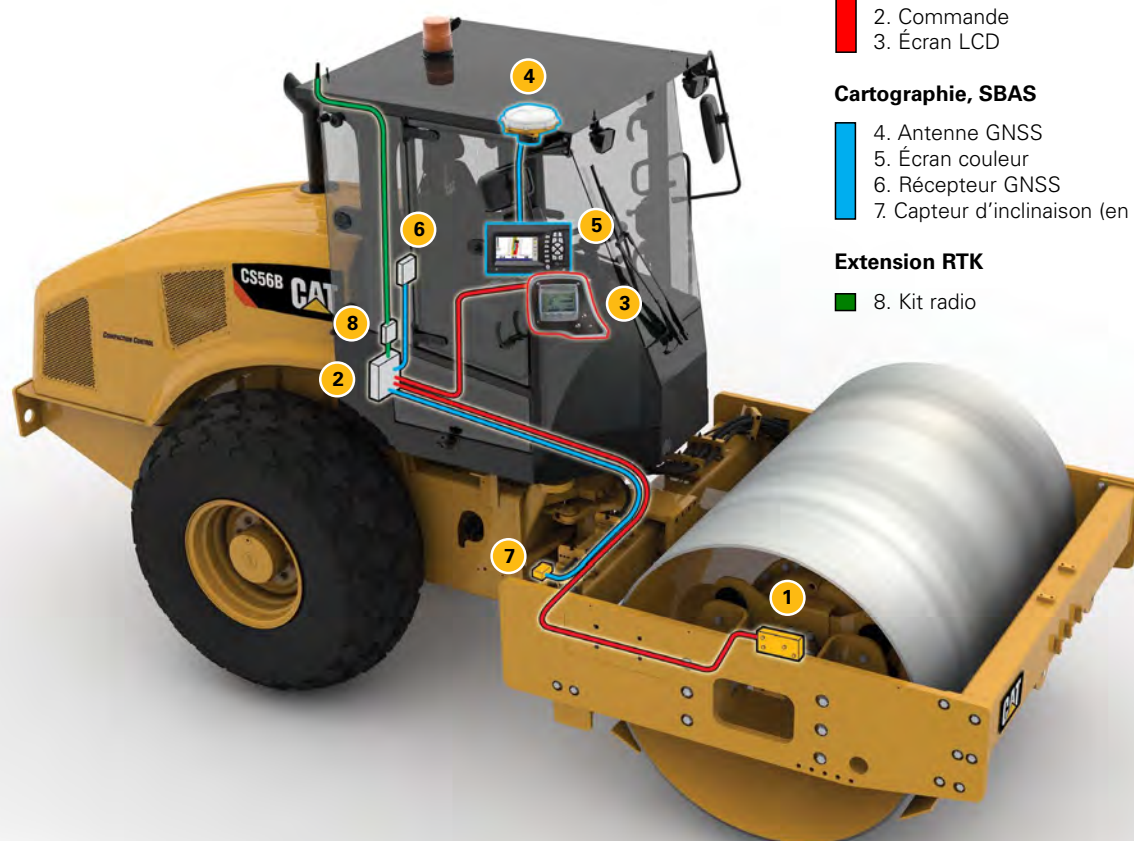
## DÉPLACEMENT DES FORCES



Plus la courbe est inclinée, plus le sol est rigide.



Les accéléromètres mesurent la réaction du sol lorsqu'il est heurté par le cylindre vibrant.



## Système de mesure

- 1. Accéléromètre
- 2. Commande
- 3. Écran LCD

## Cartographie, SBAS

- 4. Antenne GNSS
- 5. Écran couleur
- 6. Récepteur GNSS
- 7. Capteur d'inclinaison (en option)

## Extension RTK

- 8. Kit radio

## VALEUR DE MESURE DE COMPACTAGE (CMV)

La seconde méthode est la valeur de mesure de compactage (CMV). Inventée par l'entreprise suédoise Geodynamik dans les années 70, cette méthode est actuellement utilisée par Caterpillar et par plusieurs autres fabricants. Au lieu de calculer le déplacement du cylindre, l'accéléromètre monté sur ce dernier mesure le rebond ou l'accélération de la force G à la fréquence de vibration et mesure également les forces G à 2 fois la fréquence de vibration du cylindre (également nommée « première harmonique »). En intégrant ces deux valeurs dans une formule, l'on peut calculer une valeur de compactage qui indique la rigidité du sol, nommée valeur de mesure de compactage (CMV).

En d'autres termes, le principe de base de cette mesure se concentre sur le changement de la réponse dynamique du compacteur à mesure que la rigidité du sol sous-jacent augmente. Un peu comme un déflectomètre à masse tombante, le système à accéléromètre mesure le « rebond » du cylindre du compacteur sur le sol. Les sols non compactés tendent à absorber l'énergie vibratoire, mais à mesure que le sol se rigidifie sous les passes supplémentaires du compacteur, l'énergie commence à être réfléchiée par la surface et le cylindre tend à rebondir plus rapidement sous l'effet de la force vibratoire. La mesure de cette augmentation du rebond peut être traduite en indicateur de compactage.



À mesure que le sol se rigidifie, le rebond est plus prononcé. Quand la fréquence de résonance du sol correspond à la fréquence de vibration de la machine, le sol a atteint sa rigidité maximum et ne peut plus recevoir l'énergie de compactage du compacteur. À ce stade, la machine commence à découpler. Quelle que soit la méthode de mesure employée, les systèmes à accéléromètre surveillent l'approche du découplage par la machine. Cette mesure est nommée valeur de mesure de résonance (RMV) et est utilisée pour évaluer la validité de la mesure de rigidité (plus la machine est proche du découplage, moins la mesure est valide).

Les systèmes à accéléromètre mesurent un volume profond de sol, 1 à 1,2 m environ (36-48 in) en fonction de sa composition et des caractéristiques du compacteur. Une moyenne de cette valeur est établie, il n'est par conséquent pas possible d'isoler des indications de rigidité précises à une profondeur donnée. Mais cette mesure en profondeur est excellente pour détecter des objets enterrés (dans la couche de fondation par exemple) qui pourraient affecter la qualité du travail et les performances à long terme de la structure.

L'un des inconvénients des systèmes à accéléromètre est que le cylindre doit vibrer pour pouvoir effectuer les mesures. Les systèmes à accéléromètres ne sont donc pas adaptés pour les sols cohésifs et semi-cohésifs en raison de l'effet d'amortissement de ces matériaux. Pour cette raison, les systèmes à accéléromètre ne sont pas efficaces sur des compacteurs à pieds dameurs ou dans les applications à compactage statique, car les mesures ne peuvent pas être prises sans vibrations.

L'un des autres inconvénients des systèmes à accéléromètre est la profondeur de mesure. Comme indiqué plus haut, selon le type de sol et la rigidité du matériau compacté, la profondeur de mesure peut aller jusqu'à 1,2 m (4 ft), à savoir beaucoup plus loin que les couches compactées. Ceci donne une valeur de rigidité moyenne sur un certain nombre de couches, ou également de rigidité du matériau de la couche de fondation.

## CMV - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

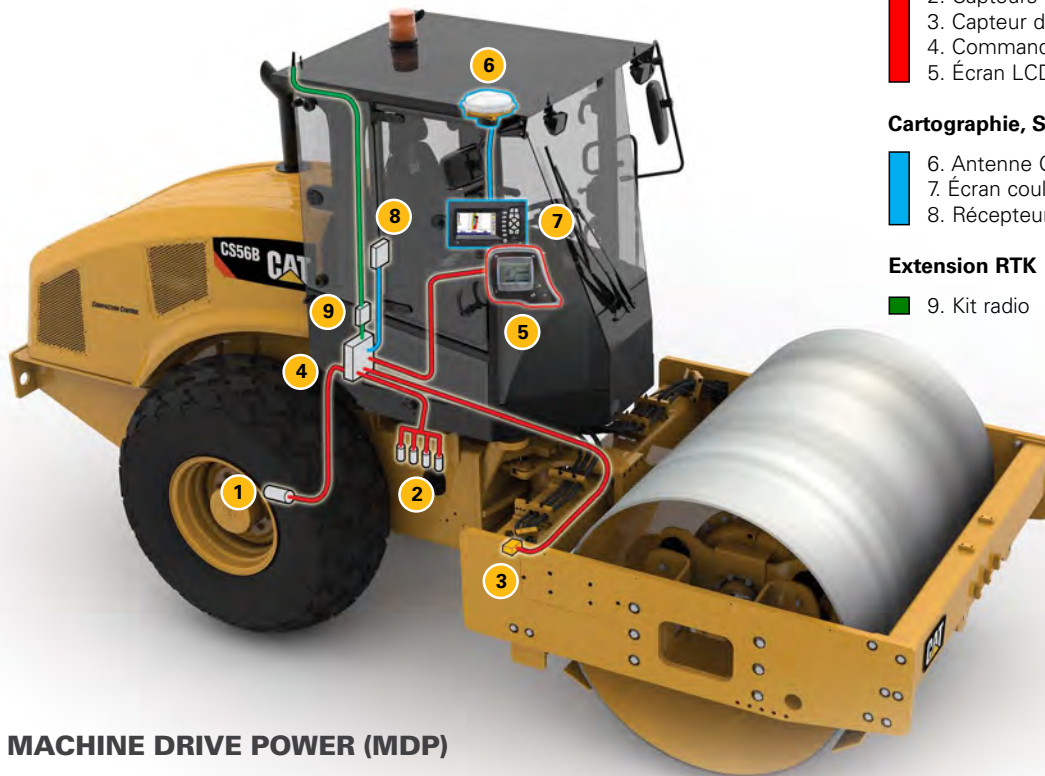


*L'énergie vibratoire est transmise au sol par le cylindre vibrant.*



*Le matériau vibre en retour, ce qui détecté et mesuré par l'accéléromètre.*

**La CMV calcule une indication théorique de rigidité du sol.**



## Système de mesure

- 1. Capteur de vitesse
- 2. Capteurs de pression
- 3. Capteur d'inclinaison
- 4. Commande
- 5. Écran LCD

## Cartographie, SBAS

- 6. Antenne GNSS
- 7. Écran couleur
- 8. Récepteur GNSS

## Extension RTK

- 9. Kit radio

## MACHINE DRIVE POWER (MDP)

*Mesure en fonction de l'énergie* – L'autre technologie de mesure disponible aujourd'hui mesure la résistance au roulement du compacteur lorsqu'il roule sur le sol. Elle fonctionne sur le principe qu'une énergie supérieure est nécessaire pour surmonter la résistance au roulement des sols meubles que des sols denses. Après passage, le sol se compacte, sa rigidité et sa capacité portante augmentent. À mesure que la résistance du matériau s'amointrit, le compacteur a besoin de moins d'énergie pour avancer sur la zone compactée. La résistance au roulement et l'énergie nécessaire pour la surmonter peuvent par conséquent être corrélées à la rigidité du matériau. Seul Caterpillar offre actuellement une technologie de mesure du compactage en fonction de l'énergie, nommée Machine Drive Power (MDP).

La mesure en fonction de l'énergie présente de nombreux avantages. L'utilisation de Machine Drive Power est similaire à l'essai de roulement : moins une roue s'enfonce dans le sol, moins l'énergie nécessaire pour déplacer la roue sur le sol est importante. Ainsi, une forte corrélation existe entre le MDP et la profondeur d'ornièrè résultant des essais de roulement. Il y a également une relation étroite entre le MDP et la rigidité du sol, mais l'avantage principal de la mesure en fonction

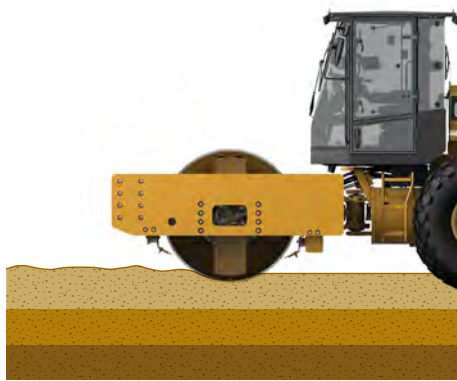
de l'énergie est qu'il s'agit d'un calcul plus tangible et direct de la capacité portante d'un sol. Si le sol est suffisamment rigide pour réduire l'énergie transmise par le compacteur, il est suffisamment résistant pour remplir les exigences de compactage du sol. Cette relation, qui peut être mesurée pour les compacteurs vibrants et statiques, est la raison d'être du compactage des sols.

Comme la méthode de mesure du compactage en fonction de l'énergie ne nécessite pas la mesure de l'énergie vibratoire dans le calcul de rigidité du sol, elle fonctionne sur tous les types de sol, y compris les sols cohésifs et non-cohésifs. Elle fonctionne aussi bien sur un compacteur à cylindre à pied dameurs que sur un compacteur à cylindre lisse. Elle fonctionne aussi bien quand le système vibrant est actif que quand il est désactivé. Pour ces raisons, les systèmes à mesure d'énergie sont plus polyvalents et peuvent être utilisés pour plus d'applications que les systèmes à accéléromètre.

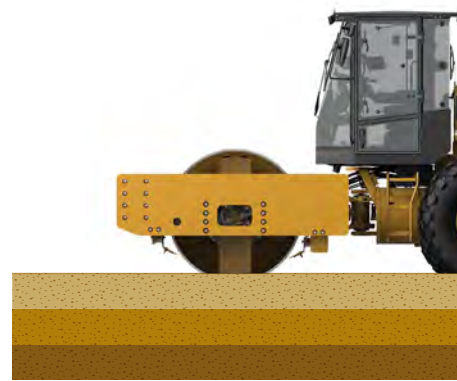
Par ailleurs, les systèmes à mesure d'énergie ne mesurent pas aussi profondément que les systèmes à accéléromètre, à 30-60 cm (12-24 in) en fonction de la composition du sol et des caractéristiques du compacteur. La profondeur est plus proche de celle d'une couche normale, ils mesurent donc le sol en cours de compactage plutôt qu'une moyenne de quelques couches et/ou du matériau de la couche de fondation sous la couche en cours de compactage. La profondeur est également plus comparable à la profondeur d'essai des appareils d'essai portables, ce qui permet aux entrepreneurs de les corrélérer avec moins de risques.

Les systèmes à mesure d'énergie présentent également certains inconvénients. Ils mesurent moins profondément, par conséquent ils sont moins susceptibles de détecter des objets enterrés ou des zones insuffisamment compactées dans la couche de fondation que les systèmes à accéléromètre. Par ailleurs, lors de l'utilisation d'un système à mesure d'énergie lorsque le système vibrant est en marche, la machine ne peut pas transmettre à l'opérateur des données l'avertissant de l'imminence du découplage.

## MDP - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT



*La progression sur sol meuble requiert plus d'énergie.*



*La progression sur sol rigide requiert moins d'énergie.*

**Le MDP mesure l'énergie nécessaire pour surmonter la résistance au roulement, mesure plus tangible et directe de la rigidité du sol.**

### Facteurs influençant les résultats de mesure du compactage intégrée à la machine –

Comme expliqué plus haut, le compactage vibrant est un processus complexe dans lequel de nombreux facteurs influencent la force totale de compactage nécessaire pour atteindre les objectifs de compactage/densité. Avec la technologie de mesure du compactage intégrée à la machine, les opérateurs ont des données sur 100 % de la surface compactée, comparées aux moins de 1 % à l'aide des appareils portables /méthodes d'essai conventionnels. Ceci permet à l'opérateur de localiser les zones insuffisamment compactées ou les zones dures et d'y remédier, pour un résultat final plus homogène et une qualité supérieure.

Par conséquent, un grand nombre de facteurs influencent les résultats de mesure du compactage intégrée à la machine et leur corrélation aux

données d'essai sur le terrain connues, quelle que soit la technologie mise en œuvre. Pour exploiter pleinement la technologie de mesure du compactage intégrée à la machine, il est nécessaire de comprendre l'impact de chaque facteur. La connaissance de l'influence de chaque facteur sur la mesure permet à l'entrepreneur d'effectuer des mesures cohérentes avec de très faibles écarts. Pour ce faire, il est essentiel de connaître parfaitement les trois facteurs primaires :

- Préparation correcte du site d'essai
- Méthode d'essai et de collecte des données
- Paramètres de la machine



## Préparation du site d'essai

Une préparation correcte du site d'essai et un contrôle strict de l'état du matériau testé ont une importance cruciale. Une mauvaise homogénéité du matériau et uniformité du compactage, en termes d'état de la couche de forme et de matières premières, peut avoir une influence directe sur la qualité et la précision des données d'essai.

### 1. Construction de la couche de base ou de fondation à l'aide de plusieurs matériaux –

Souvent, plusieurs matériaux sont utilisés pour construire la couche de base ou de fondation. Par exemple, une base de roche concassée dure peut toucher une couche en argile relativement meuble. Lorsqu'elle est couverte d'une épaisse couche de gravier d'1 m (39 in) par exemple, la CMV mesurée sur la base en pierre est considérablement plus élevée que la CMV mesurée sur la base argileuse. L'essai de la densité de surface avec un appareil d'essai portable donnerait des valeurs quasiment identiques, car ces appareils ne peuvent pas mesurer plus profondément que le gravier en surface. La rigidité de la base a un effet profond sur les mesures à accéléromètre, mais peut également avoir un effet limité sur les mesures en fonction de l'énergie.

Une couche de base ou de fondation plus rigide permet de compacter plus facilement et profondément le matériau placé dessus. Pour cette raison, Caterpillar recommande de cartographier ou d'effectuer un roulage d'essai sur le niveau d'excavation le plus bas pour en déterminer l'état avant de verser, d'épandre et de compacter du matériau de remblayage supplémentaire. Il peut être nécessaire de corriger certaines zones plus dures ou meubles que la majorité du chantier. L'uniformité de compactage est l'objectif de l'essai et pour ce faire une couche de base ou de fondation



Préparation d'un site d'essai

compactée uniformément et de rigidité portante uniforme est nécessaire.

### 2. Type de sol – Le type de sol compacté a une grande influence sur les résultats de la CMV ou du MDP.

Ceci est dû au fait que le taux de rebond interne du sol et les taux d'amortissement sont très différents pour les sols fins et les sols granulaires. Ceci affecte la réponse du sol aux vibrations, qui affecte à son tour la manière d'effectuer la mesure.

### 3. Teneur en eau – Tout compactage d'essai ou de production doit être réalisé dans un état du terrain connu et acceptable. Il n'est pas conseillé d'effectuer l'essai sur un sol humide « spongieux » ou saturé d'eau. La teneur en eau du sol est variable et a un impact considérable sur les résultats du compactage, problème qui sera régulièrement rencontré sur le chantier. C'est également l'une des premières causes de variation des CMV pour un même type de sol. L'entrepreneur peut contrôler ce facteur, en ajouter de l'eau avec un camion d'eau et en la mélangeant, ou en préparant le sol pour le faire sécher. Chaque sol a une teneur en eau optimum qui permet le compactage le plus efficace. Pour les sols sableux, elle va de 4 à 12 % et pour les sols argileux de 9 à 22 %.



Les mesures d'un système de mesure du compactage intégré à la machine (indication de la rigidité du sol) sont affectées par l'humidité du sol en raison de la façon dont elle comble les vides entre les particules. S'il y a plus d'air dans les vides, la compressibilité de l'air abaisse la mesure. S'il y a plus d'eau, son incompressibilité relative donne une valeur plus élevée. À un stade donné, le sol est tellement humide que l'eau agit comme lubrifiant entre les particules, qui glissent l'une sur l'autre. Ceci abaisse à nouveau la valeur CMV.

L'un des avantages de la technologie de mesure du compactage intégrée à la machine est qu'elle permet de détecter indirectement

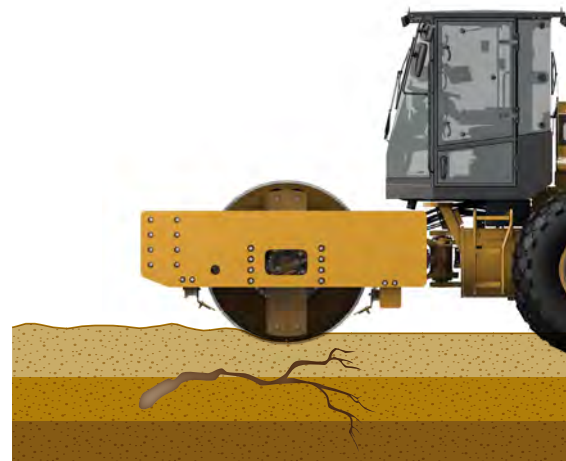
la teneur en eau d'un sol en fonction de la façon dont le sol se compacte. Par exemple, un compacteur qui roule sur des sols granulaires a besoin de plus de passes pour atteindre la valeur cible quand le sol sèche : plus le sol est sec, plus le nombre de passes nécessaire est élevé. L'opérateur peut suivre ceci graphiquement sur l'écran, et peut appeler un camion d'eau pour qu'il traite des zones spécifiques. Sur les sols humides, la force de compactage du compacteur peut causer la migration de l'eau des couches inférieures aux couches supérieures, ce qui donne des valeurs décroissantes. L'opérateur peut demander à une machine de venir ouvrir le sol pour permettre à l'humidité en excès de s'évaporer.

**4. Objets enterrés dans le sol** – Lors du compactage d'une couche de matériau qui semble uniforme, la mesure du compactage intégrée à la machine est parfois sensiblement supérieure ou inférieure à celle de la zone environnante. La première solution peut être de vérifier la surface à l'aide d'un instrument de lecture de surface, tel qu'un densimètre nucléaire ou un déflectomètre à masse tombante portable. Ce type de contrôle donnera rarement le même écart de mesure que la mesure intégrée, parce que ces appareils ne mesurent pas à la même profondeur.

L'une des causes probables de valeur mesure du compactage intégrée à la machine élevée localement peut être une grosse pierre ou un gros morceau de ciment enterré à quelques dizaines de cm. Une valeur faible localisée peut être due à une grosse boule d'argile ou à des pneus enterrés dans des granulats. Les variations des mesures du compactage intégrées sont réelles, mais il est nécessaire de creuser à l'emplacement concerné pour identifier l'objet qui pourrait en être la cause. Ceci peut s'avérer peu pratique.

Il est possible d'enfoncer une sonde équipée d'une longue tige ou un pénétromètre

dynamique à cône pour se faire une idée de la nature de l'anomalie sans qu'il soit nécessaire de creuser. Il convient ensuite de décider si la variation causera des problèmes à la couche de roulement finie de la route par la suite. Les variations de capacité portante (rigidité) du sol support peuvent causer des contraintes du revêtement et en réduire la durée de vie.



**AVERTISSEMENT** : Lorsque vous travaillez sur des chantiers où la présence de munitions non explosées sous la surface est possible, il est recommandé d'utiliser un détecteur de métaux avant l'excavation et le compactage.

## Méthode d'essai et de collecte des données

### 1. Corrélation avec une méthode d'essai sur le terrain connue

– Les entrepreneurs qui ne se sont pas encore familiarisés avec les systèmes de mesure du compactage intégrés à la machine souhaitent naturellement corréler les données/mesures à une méthode d'essai de compactage sur le terrain. Les essais de densité Troxler (nucléaires) et du cône de sable sont des normes d'usage depuis des années et présentent une certaine corrélation, mais ils ne mesurent pas les mêmes propriétés ou profondeurs du sol que les systèmes de mesure du compactage intégrés à la machine.

La méthode d'essai de compactage sur le terrain utilisée peut avoir un impact direct sur le niveau de corrélation avec une valeur de mesure du compactage intégrée à la machine. Le volume effectif de sol mesuré par la technologie de mesure du compactage intégrée à la machine (CMV ou MDP) est considérablement plus grand que celui mesuré avec une méthode de mesure sur le terrain conventionnelle. Aucun des appareils d'essai de mesure du compactage sur le terrain connus ne mesure à la même profondeur, ou le même volume de sol voire les mêmes propriétés du sol.

En raison de leur facilité de transport et d'utilisation, les méthodes d'essai sur le terrain suivantes sont souvent utilisées :

- Pénétromètre dynamique à cône - mesure à plus grande profondeur, mais mesure indirectement la résistance au cisaillement et le frottement du sol.
- Défectomètre à masse tombante portable - teste un volume effectif de matériau d'environ 1 % de ce qu'un système intégré à la machine mesurerait. De ce fait, toute non uniformité des matériaux testés pourrait être exacerbée voire augmentée par la différence de volume de matériau testé.

Les corrélations entre les données des appareils de mesure et des systèmes de mesure intégrés à la machine sont variables et dépendent du nombre et du type d'essais réalisés. Lors de la corrélation des données d'essais intégrés à la machine avec un essai de terrain connu, les résultats les plus satisfaisants sont ceux obtenus avec un essai à la table de grande taille ou un défectomètre à masse tombante.

Enfin, lorsque vous utilisez la technologie de mesure du compactage intégrée à la machine, souvenez-vous que la grandeur mesurée (une indication de la rigidité du sol) change pendant que vous la mesurez.





Par conséquent, vous ne pouvez pas obtenir à nouveau la même mesure au même emplacement lors de la passe suivante. Ceci peut poser un problème aux organismes qui vérifient les valeurs de mesure du compactage (CMV ou MDP) avec d'autres essais de compactage sur le terrain connus.

Les essais de terrain post-compactage à l'aide d'appareils portables peuvent être répétés car ils ne sont pas intrusifs et ne perturbent pas le sol. Une machine équipée d'un système de mesure du compactage intégré altère le sol à chaque passe en raison de son poids. L'essai à la table est le seul essai qui a un effet similaire sur le sol car la structure du sol est modifiée pendant la mesure.

Les valeurs de mesure du compactage intégrée à la machine deviennent de plus en plus répétables à mesure que le sol approche de son état de compactage maximum final. À ce stade, il y aura très peu de variations des résultats de mesure du compactage entre les passes. Cependant, si la structure du sol est fragile, les valeurs de compactage présenteront des écarts vers le haut et vers le bas car la structure du sol se compacte jusqu'à un certain point, puis se casse à la passe suivante.

Ce phénomène est nommé « décompactage » et se produit fréquemment avec certains types de sols granulaires.

### 2. Quantité de données d'essai enregistrées –

Une plage étroite ou un nombre limité de mesures peut également influencer le niveau de corrélation constaté avec la technologie de mesure du compactage intégrée à la machine. Nous vous recommandons d'utiliser une plage étendue de résultats d'essai de compactage sur le terrain pour les comparer aux résultats intégrés et d'éviter les corrélations de valeurs isolées, qui ne donnent pas assez d'informations pour pouvoir les interpréter correctement.

**3. Collecte de données –** L'incertitude de la corrélation des résultats d'essais sur le terrain aux valeurs de mesure du compactage intégrée à la machine peut causer des écarts et une mauvaise corrélation. Il est recommandé de veiller soigneusement à coupler des points de données correspondants ou d'utiliser un compacteur avec des fonctions de cartographie/collecte de données GNSS afin d'associer les détails de position sur le site d'essai et de les corréler correctement avec les données des essais de terrain.

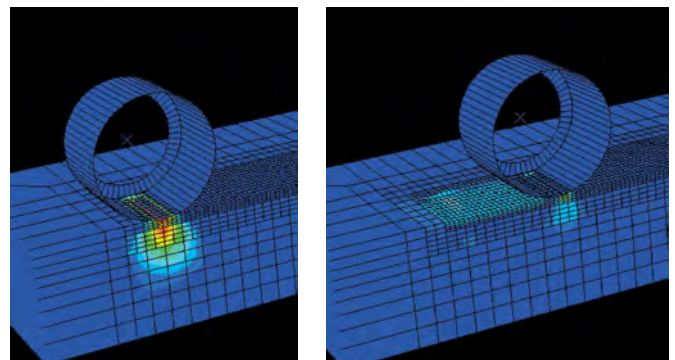
## Paramètres de la machine

D'un point de vue du développement, et sur la base de l'expérience acquise sur le terrain, il est connu que la technologie de mesure du compactage intégrée à la machine est sensible à certains paramètres de fonctionnement de la machine. Savoir ce que le système mesure permet de mieux comprendre comment une mauvaise utilisation de certains de ces facteurs peut avoir pour conséquence des données/résultats trompeurs.

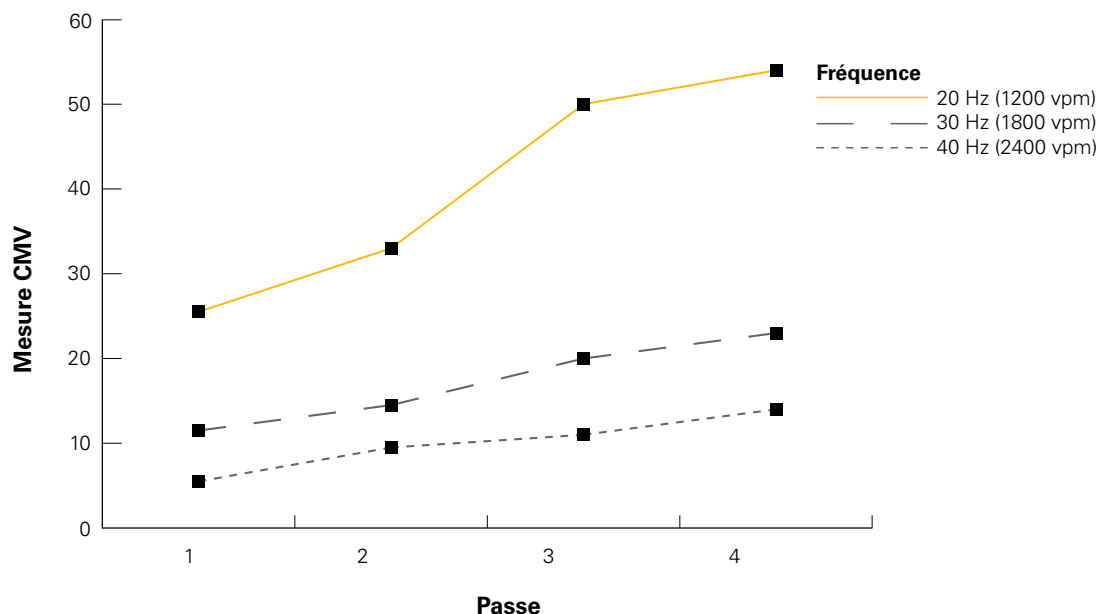
**1. Amplitude –** Si le cylindre a une amplitude élevée, l'effet de sa vibration est transmis plus en profondeur dans le sol. Cette profondeur de vibration modifie la mesure du compactage intégrée à la machine parce que la quantité de sol mesurée est plus importante. Il est également plus probable que le sol en profondeur ait une structure et un type différent.

Si vous recherchez des informations sur la variabilité des sols en profondeur,

utilisez une amplitude élevée. Si vous ne vous intéressez qu'aux couches supérieures, nous recommandons une amplitude plus faible. Même à faible amplitude, la profondeur de mesure du sol peut être d'un mètre ou plus pour la valeur CMV.



*Une amplitude élevée est transmise plus en profondeur dans le sol.*



**2. Fréquence** – Le Cat Compaction Control avec CMV utilise un rapport de la fréquence de vibration du cylindre et une mesure de la réponse de fréquence du sol dans le cylindre à deux fois la fréquence du cylindre pour calculer la valeur de compactage (CMV). La modification du réglage de la fréquence de vibration du compacteur change à son tour le résultat de mesure, même si la rigidité du sol reste la même. Ceci est dû au fait que, sur un sol de rigidité donnée, la mesure CMV tend à être plus élevée si elle est mesurée à basse fréquence, et tend à être plus basse si elle est mesurée à fréquence élevée. Les raisons de ce phénomène sont complexes et sont liées au rapport de la fréquence naturelle du sol à la fréquence du cylindre vibrant.

Le graphique représente la modification de la mesure CMV en fonction de la variation de fréquence. Si tous les autres paramètres de la machine et du sol sont les mêmes (vitesse au sol, amplitude, type de sol, etc.), il y a une différence non négligeable entre les CMV mesurées pour chaque réglage de fréquence. La fréquence utilisée affecte la mesure CMV. Ceci est vrai quelle que soit la rigidité du sol.

**3. Vitesse au sol** – La mesure du compactage intégrée à la machine est affectée dans une certaine mesure par la vitesse au sol. En général, les vitesses lentes permettent plus de contact du cylindre vibrant avec le sol, créent plus rapidement la rigidité du sol, et plus en profondeur, avec pour résultat moins de passes et un temps total nécessaire pour remplir les exigences de compactage moins long. Les données indiquent qu’une vitesse au

sol plus rapide abaisse en général les résultats de la CMV, mais peut aussi augmenter les résultats du MDP. Il est difficile de quantifier précisément ce phénomène, car les variations du type de sol, de la teneur en eau et d’autres facteurs masquent le problème pendant les essais.

Si plusieurs passes sont nécessaires pour obtenir les niveaux de compactage finaux (indiqués par la rigidité du sol), la méthode la plus efficace est d’utiliser une vitesse au sol lente et de laisser le système vibrant travailler le sol sous le cylindre. La vitesse lente permet un espacement plus rapproché du cylindre vibrant, plus de coups par distance parcourue, et nécessite moins de passes, avec pour résultat un temps total nécessaire pour remplir les exigences de compactage moins long.

Ceci permet également d’optimiser le carburant : deux passes à basse vitesse consomment moins de carburant que 6 passes à grande vitesse. Règle empirique générale : allez lentement pour compacter rapidement et maximiser l’efficacité, mais pas trop lentement pour ne pas causer de découplage ou de décompactage. Avec la technologie de mesure du compactage intégrée à la machine, il est recommandé de maintenir une vitesse uniforme et adaptée d’1 à 2,5 km/h environ (0,62-1,5 mph) sur les pierres et l’argile, et de 2 à 5 km/h (1,2-3,1 mph) sur le sable et le gravier. Il est possible d’utiliser la commande automatique de la vitesse des compacteurs Cat de la série B pour agir sur ce facteur.

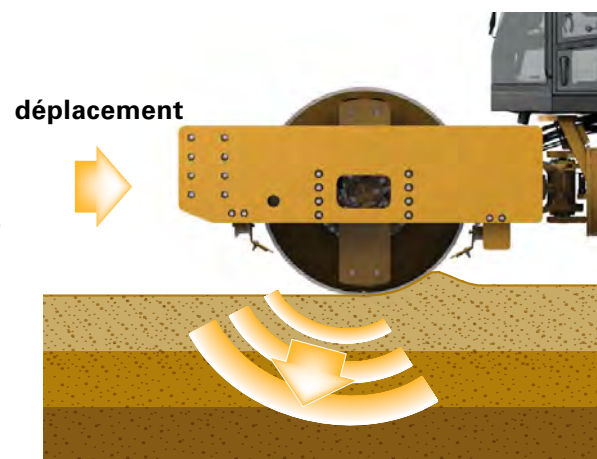
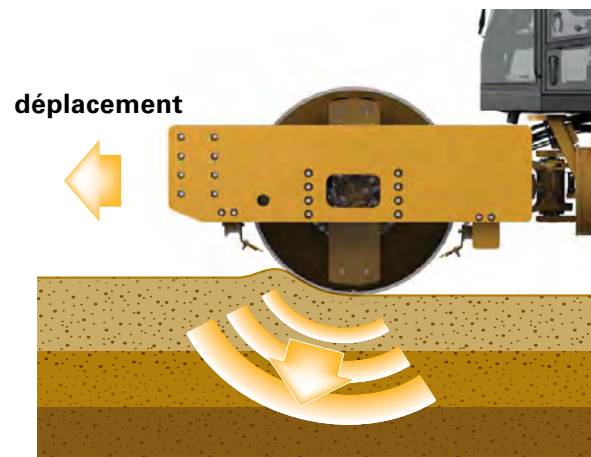
**4. Sens de déplacement** – Le sens de déplacement, en marche avant ou arrière, a un effet sur la valeur des données de mesure du compactage intégrée à la machine enregistrées pour une rigidité du sol donnée. L'écart entre les mesures en marche avant et en marche arrière va en général de 5 à 20 % avec un écart plus grand sur les sols extrêmement meubles.

Les résultats de mesure du compactage intégrée à la machine varient en fonction du sens de déplacement parce que la rotation du poids excentrique dans le cylindre s'ajoute ou se soustrait au couple net appliqué au cylindre lorsqu'il avance sur le sol (en raison également de l'équilibre du poids, des roues devant/derrière le cylindre et d'autres facteurs). Ce couple influence la direction des vibrations dans le sol et le cylindre détecte soit plus vers la zone déjà compactée, soit plus vers la zone meuble encore à compacter.

**5. État du système vibrant** – Un système de vibration activé peut également affecter les valeurs de mesure du compactage intégrée à la machine. L'impact peut avoir une importance selon le matériau. Pour les données d'essai, les technologies qui vous permettent de mesurer avec le système vibrant désactivé donnent des résultats plus fiables car moins de variables influencent la mesure. Ceci est possible avec les technologies de mesure en fonction de l'énergie comme le MDP.

**6. Découplage ou double-rebond** – Quand la rigidité du sol augmente, sa fréquence naturelle ou de résonance se rapproche de la fréquence de vibration du cylindre. Quand ceci se produit, le cylindre commence à rebondir entièrement de la surface du sol à la moitié de sa fréquence de vibration, et la RMV (valeur de mesure de résonance) mesurée augmente. La RMV est tout simplement une mesure du découplage du cylindre. Plus la machine découple, moins la mesure CMV est fiable.

## SENS DE DÉPLACEMENT



*Quand le sens du couple excentrique correspond au sens de déplacement de la machine (figure du haut), le couple net appliqué au cylindre fait que l'accéléromètre détecte le sol à un certain angle. Quand le sens du couple excentrique ne correspond pas au sens de déplacement de la machine, (figure du bas), les forces du couple changent et modifient l'angle de mesure. Ceci donne des CMV sensiblement différentes pour le fonctionnement en marche avant et en marche arrière.*



### [ PROCÉDURES DE MESURE DU COMPACTAGE INTÉGRÉE À LA MACHINE ]

Les compacteurs de sol équipés de la technologie de mesure du compactage intégrée peuvent mesurer des facteurs qui donnent aux opérateurs des indications en temps réel de la rigidité du sol dans la cabine. De nombreux facteurs variables influencent l'efficacité de cette méthode et influencent directement l'homogénéité des mesures. Pour cette raison, les mesures sont souvent vérifiées au moyen de l'une des méthodes présentées plus haut ou d'autres équipements d'essai portables. Plus les systèmes sont élaborés, mieux leur utilisation est comprise et plus les résultats sont acceptés.

La mesure du compactage intégrée à la machine a en général deux modes de fonctionnement : le mode production et le mode essai.

**Mode Production** – Le mode Production est utilisé pendant le processus de compactage initial. Ce mode de fonctionnement sert à compacter autant de sol que possible à un niveau acceptable, aussi rapidement et efficacement que possible. En mode Production, la technologie de mesure du compactage intégrée à la machine fournit à l'opérateur une indication en temps réel de la rigidité du sol, et identifie les zones mal compactées dans lesquelles il peut être nécessaire de ramener la densité aux spécifications.

En mode Production, l'amplitude de la machine est en général élevée et le sol est compacté uniquement jusqu'à ce que la valeur cible nominale soit atteinte. L'opérateur surveille l'écran pour voir les zones compactées correctement. La première préoccupation est de travailler efficacement, en compactant autant de sol que possible sans sur-compacter les zones suffisamment rigides.

Comme la machine fonctionne à amplitude élevée, elle peut découpler en certains points. En raison des différentes variables (vitesse au sol, direction, découplage, variation d'humidité du sol), les valeurs de mesure du compactage intégrée relevées dans ce mode de fonctionnement présentent normalement des variations supérieures à celles qu'il serait possible d'atteindre. Ceci peut être considéré comme une approche grossière de la mesure du compactage et le manque de précision ou les données à moins de variables dans ces zones ne sont pas si importants à ce stade.

**Mode Essai** – Une fois le compactage en mode production terminé, le système de mesure du compactage peut être utilisé comme compacteur d'essai pour vérifier la qualité du travail en mode Essai. En général, ce procédé est plus précis que le mode production. De nombreuses variables sont contrôlées et maintenues homogènes, dont la vitesse et le sens de déplacement. Ceci permet de s'assurer que ces variables n'influencent pas la mesure.

Le mode Essai est utilisé quand les autorités contractantes demandent des données « de terrain » donnant des indications précises sur la rigidité du sol pour une phase ou zone de construction donnée. Cette procédure peut être exécutée à intervalles de construction réguliers, quand il est facile de faire rouler le compacteur sur une phase du projet terminée, de façon contrôlée.

Pour obtenir des résultats précis, l'opérateur doit garder les variables les plus constantes possible. Ceci est considéré comme la phase de précision du compactage du sol.



## PROCÉDURE D'ESSAI RECOMMANDÉE

1. Piquetez la partie du chantier à tester et prévoyez un plan de compactage qui permette à l'opérateur d'aller en marche avant pendant l'opération d'essai de compactage.
2. Définissez une vitesse au sol cible entre 2,5 et 4 km/h (1,5 à 2,5 mph) que vous pourrez maintenir. Une vitesse lente est préférable, et l'utilisation de la commande de vitesse automatique optimisera l'uniformité de la vitesse, ce qui permet une meilleure mesure des données et un meilleur compactage.
3. Réglez une faible amplitude. Ceci réduit les risques de découplage du cylindre et donne une mesure qui pénètre moins profondément dans le sol. Ceci facilite la corrélation avec d'autres méthodes d'essai.
4. Activez la vibration (ou le compactage statique avec MDP) et avancez pour commencer la mesure du compactage à une vitesse au sol, amplitude et fréquence constantes en procédant en marche avant.
5. Les passes du cylindre doivent se toucher ou à peine se chevaucher. Chevauchez les passes aux extrémités ou aux zones de retournement. *Remarque : les zones de chevauchement sont considérées comme des passes multiples et peuvent causer des écarts des données.*
6. La collecte manuelle des données peut être laborieuse et doit être mise en relation le plus précisément possible avec la position sur le chantier dans les limites des parties piquetées. La plupart des systèmes de mesure du compactage intégrée à la machine ne permettent pas un stockage automatique des données sans l'option GNSS (GPS). Utilisez un tableur comme Excel pour trier les données par sens de déplacement, et utilisez uniquement les données collectées en marche avant pour l'analyse. Repérez physiquement les zones suffisamment importantes pour être vérifiées ou testées en corrélation avec une méthode de mesure du compactage sur le terrain connue.
7. Pour une meilleure qualité, mesurez la teneur en eau du sol selon un schéma en grille sur toute la surface mesurée et compactée. La taille de la grille peut être ajustée à l'échelle du chantier et aux exigences de l'autorité contractante. Ceci donne des informations supplémentaires pour l'analyse des valeurs de compactage, et le schéma en grille permet d'établir une carte isobare de la teneur en eau du sol. Prélevez des échantillons de sol pour les mesures d'humidité le plus tôt possible une fois que le compacteur a terminé une zone.
8. Étudiez les données enregistrées manuellement pour sélectionner les zones à corréler à un autre type d'appareil de mesure du compactage. Sélectionnez les zones présentant des valeurs élevées, basses et intermédiaires. Sélectionnez plusieurs zones pour chacune de ces valeurs.
9. Procédez aux essais de corrélation pour les emplacements marqués précédemment. Ne travaillez pas de manière approximative, car les conditions du sol peuvent varier fortement à de très courtes distances.

**REMARQUE :** Afin d'exploiter pleinement les capacités de la technologie intégrée à la machine, des fonctions de cartographie GNSS (GPS) sont nécessaires pour enregistrer toutes les données avec leurs détails de positionnement sur le chantier. Consultez le chapitre « Compactage intelligent » du présent guide pour plus de détails.

**Résumé de la mesure du compactage intégrée à la machine** – Sur tous les projets de compactage, les préoccupations principales sont la qualité et les coûts. Il est crucial d'atteindre efficacement et de façon rentable les objectifs de compactage. Il existe à cet effet de nombreuses spécifications et méthodes conventionnelles de mesure du compactage sur le terrain. Grâce aux méthodes de mesure du compactage intégrée à la machine, les opérateurs ont désormais des outils plus adaptés, qui leur assurent la meilleure qualité de compactage au coût le plus bas.

La mesure du compactage intégrée à la machine est une excellente technologie lorsqu'elle est appliquée correctement, mais elle possède elle aussi ses limites. La mesure du compactage intégrée à la machine ne peut pas vous dire sur quel type de sol vous travaillez, ni décrire la teneur en eau d'un sol ou ses caractéristiques physiques.

La technologie de mesure du compactage intégrée à la machine mesure la réponse du sol pour fournir un instantané de sa capacité portante. S'il est configuré et utilisé correctement, un compacteur de sol vibrant avec mesure du compactage intégrée fournit des informations que l'opérateur ne pourrait pas obtenir autrement. Ces informations permettent à l'opérateur formé d'en déduire l'état du sol. Ces données sont une indication de la rigidité du sol, mais pas une garantie. Il y a tout simplement trop de variables. Cependant, un opérateur formé comprendra ce que les mesures indiquent et la procédure à suivre en fonction de ces mesures. Les procédés utilisés sont souvent plus importants que la technologie elle-même.







## Unité 5

# COMPACTAGE INTELLIGENT

Le compactage intelligent est la dernière avancée dans l'application de compacteurs de sol vibrants. La possibilité de mesurer le compactage avec précision, de corrélérer les mesures aux coordonnées GNSS, de les afficher sur la carte du chantier dans le poste de conduite ainsi que d'enregistrer les données pour la documentation était jusqu'à présent inconcevable. Seul le temps nous dira quelles seront les prochaines innovations technologiques. Caterpillar sera aux premières lignes de cette avancée et des découvertes qui s'ensuivront.





## [ QU'EST-CE QUE LE COMPACTAGE INTELLIGENT ? ]

Actuellement, et depuis peu, le compactage intelligent est un terme appliqué aux systèmes de mesure du compactage intégrés dans un compacteur de sol vibrant. La définition de compactage intelligent varie en fonction des différents organismes gouvernementaux et des fabricants d'équipements. D'une manière générale, le compactage intelligent peut être défini comme une technologie intégrée au compacteur appliquée au processus de compactage pour améliorer le rendement du chantier en éliminant le travail au jugé des opérateurs. Ces technologies fournissent aux opérateurs des informations de compactage en temps réel, qui les aident à évaluer la progression et/ou la fin du compactage.

Sur la base de cette définition, nous pouvons dire que la technologie de mesure du compactage intégrée à la machine est une forme de compactage intelligent. Les systèmes intégrés sur les compacteurs de sol fournissent des détails sur l'énergie de compactage en temps réel sur le chantier, ce qui permet aux opérateurs et aux chefs de chantier d'accéder à des informations auxquelles ils n'avaient pas accès auparavant.

Les systèmes les plus élaborés peuvent également cartographier les données pour donner un aperçu graphique du travail effectué et enregistrer les données pour leur analyse ultérieure.

Exemple de première spécification pour un State Department of Transportation (USA) :

### **Compactage intelligent (IC)**

Ce processus comprend la mesure **et l'enregistrement de l'heure, de l'emplacement et des paramètres de compactage** du traitement granulaire pendant le processus de compactage au moyen d'un

compacteur vibrant équipé d'un système de mesure à accéléromètre et d'un système GPS.

Il existe maintenant une définition ou exigence séparée concernant les compacteurs intelligents :

### **Compacteur de compactage intelligent (IC)**

Les compacteurs doivent être des compacteurs vibrants équipés d'un système de mesure à accéléromètre et **en mesure d'enregistrer les mesures des paramètres de compactage.**

En même temps, la Federal Highway Administration (FHWA) américaine décrit le compactage intelligent comme suit :

**Le compactage intelligent (IC)** fait référence au compactage de matériaux routiers, tels que les sols, les bases de granulats ou les matériaux d'enrobage, à l'aide de compacteurs vibrants modernes équipés d'un système de mesure intégré, **d'un système de rapport informatique embarqué, d'une cartographie par système de localisation GPS** et d'un contrôle rétroactif en option. Les compacteurs IC facilitent la surveillance en temps réel du compactage et les ajustements à temps du processus de compactage en intégrant des systèmes de mesure, de **documentation** et de contrôle. Les compacteurs IC gardent également un enregistrement continu de points à codes de couleurs, permettant à l'utilisateur de voir les tracés de l'emplacement précis du compacteur, le nombre de passes et les mesures de rigidité du matériau.

L'Union Européenne a également créé un moyen de définir l'utilisation du compactage intelligent. Dans son guide « Guidelines to evaluate soil and asphalt compactors equipped with continuous compaction control (CCC) » (Instructions pour l'évaluation des compacteurs de sol et d'enrobé équipés d'un contrôle continu du compactage [CCC]), le CECE (Comité européen des fabricants d'équipements pour le génie civil) a créé une matrice permettant de classer les équipement munis de technologies de contrôle continu du compactage. (En annexe.)



Il est important de noter que les définitions plus récentes du compactage intelligent définissent clairement non seulement les fonctions de mesure du compactage intégrée et l'affichage en temps réel pour l'opérateur, mais également la capacité d'enregistrer les données de positionnement et de les garder en mémoire aux fins de la documentation, de l'analyse et de la conservation des enregistrements. De ce fait, la définition du compactage intelligent évolue en permanence.

Pour Caterpillar, un compacteur intelligent doit mesurer le compactage, corrélérer les mesures aux coordonnées GNSS, afficher une carte des mesures, enregistrer les données et documenter les résultats. Ces fonctions présentent de nombreux avantages en termes de temps et de coûts pour les opérateurs, les entrepreneurs et les maîtres d'ouvrage. Par conséquent, la définition du compactage intelligent actuellement utilisée par Caterpillar est la suivante :

**Compactage intelligent (IC)  
Système qui mesure le compactage du sol, affiche les mesures pour l'opérateur, enregistre et cartographie les résultats du compactage à l'aide d'un système de cartographie GNSS et contrôle ou guide l'énergie de compactage de la machine en réponse au système de mesure.**

Cette définition peut être utilisée pour les compacteurs vibrants et statiques et ne nécessite pas de système de mesure à accéléromètre. Comme décrit plus haut, le MDP est une nouvelle technologie et présente de nombreux avantages par rapport à la technologie de mesure du compactage à accéléromètre, selon les applications.

Dans la suite du document, nous ne ferons référence au compactage intelligent que dans les cas où le compacteur est équipé de fonctions de mesure du compactage intégrées (CMV ou MDP), de fonctions de cartographie et de la possibilité d'enregistrer et de mémoriser les données pour la documentation et l'analyse hors de la machine.

#### **Positionnement du compacteur sur le chantier**

La technologie de mesure du compactage intégrée à la machine peut être complétée par la technologie GNSS (géolocalisation et navigation par satellite), qui permet un positionnement précis sur le chantier par l'utilisation de différentes constellations de satellites. La technologie GNSS a une disponibilité étendue et offre différents niveaux de précision, dont certains requièrent une infrastructure externe fournissant des données de correction du positionnement.



Avec le niveau de données et de détails, la technologie de mesure du compactage peut maintenant être associée à l'emplacement physique sur un chantier et peut être configurée afin de cartographier ces valeurs, avec le comptage du nombre de passes, le sens de déplacement de la machine et de nombreux autres réglages de la machine.

Quelle que soit la technologie de mesure du compactage intégrée à la machine employée, le système fournit à tout moment une mesure en temps réel du sol en cours de compactage. L'ajout de la fonction de cartographie, d'enregistrement et de traçage des mesures à leur emplacement précis sur une carte augmente fortement l'utilité des informations.

*Données de positionnement - Principe de fonctionnement.* Les systèmes de positionnement utilisent la géolocalisation et navigation par satellite (GNSS) pour fournir des données de cartographie pour chaque mesure enregistrée. Ceci comprend le GPS (exploité par le Ministère de la Défense américain) et GLONASS (exploité par le gouvernement russe), ainsi que d'autres systèmes qui seront connectés à l'avenir, dont Galileo pour l'UE et Compass en Chine.

# COMPACTAGE

La localisation est tracée par triangulation avec la position connue des satellites de ces systèmes. Les systèmes satellites ne sont pas assez précis pour pouvoir être utilisés sans quelques corrections. Les systèmes de cartographie des compacteurs de sol utilisent l'augmentation pour corriger les signaux satellites et atteindre un niveau de précision exploitable. Deux formes principales d'augmentation sont disponibles : SBAS et RTK.

La plupart des systèmes utilisent SBAS (système de renforcement satellitaire) pour corriger les signaux de positionnement satellites. Le SBAS triangule vers plusieurs sites au sol qui fournissent des « points d'ancrage » connus à partir desquels il fournit une mesure de correction. Les systèmes SBAS sont en général précis jusqu'à 1 m (3 ft) et ne nécessitent aucune infrastructure extérieure.

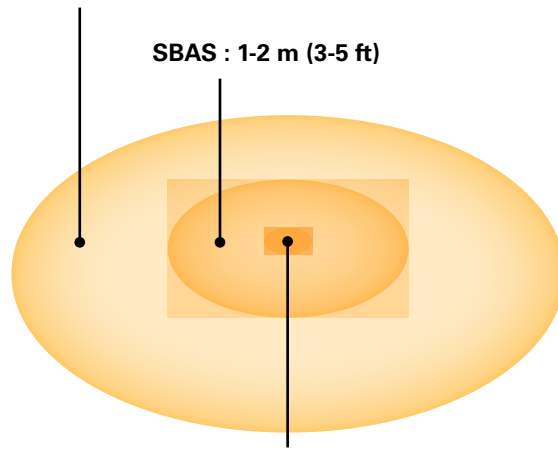
En alternative, de nombreux fabricants peuvent augmenter le signal avec la correction RTK (cinématique en temps réel). Cette technologie nécessite l'utilisation de stations radio de base locales pour fournir les données de correction.

En réalité, la technologie récente permet des précisions RTK par téléphone portable ou modem ou même par des stations de référence virtuelles (VRS), mais ceci nécessite une organisation et une assistance informatiques plus élaborées. Les stations de base coûtent cher et la technologie nécessite une ligne de site du récepteur du compacteur à la station de base ou aux unités mobiles. Cependant, la RTK a une précision plus élevée que le SBAS, jusqu'à quelques centimètres (inches). Elle permet également au système d'enregistrer les données de nivellement, qui permettent au compacteur de cartographier le nivellement de la pente.

## PRÉCISION DU SYSTÈME SATELLITE

**Autonome : 10 m (30 ft)**  
pas de correction

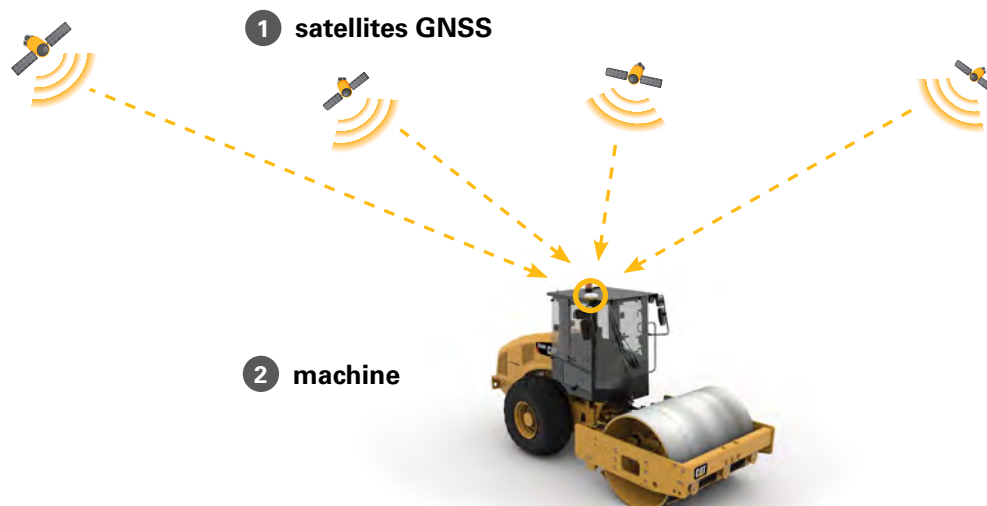
**SBAS : 1-2 m (3-5 ft)**



**RTK : 1 cm (0,4 in) horizontalement, 2 cm (0,8 in) verticalement**  
(avec base locale ou VRS)

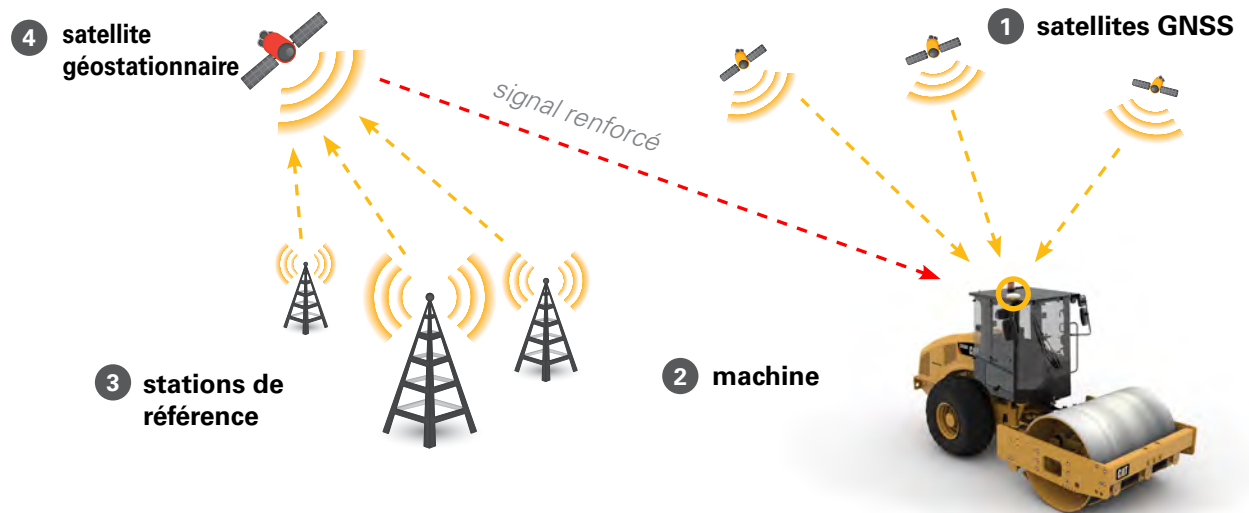
Ceci représente un avantage de poids, car le compacteur est souvent le dernier engin à passer sur un chantier de terrassement, et il est ainsi possible de réaliser des économies considérables en temps/argent sur les activités de relevé final du nivellement.

## AUTONOME

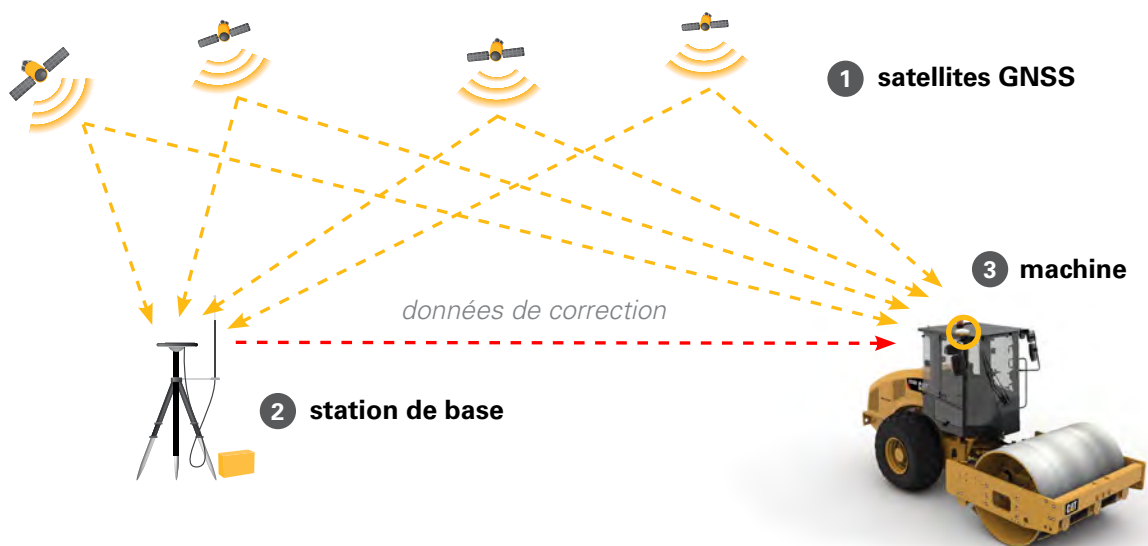




**SBAS (SYSTÈME DE RENFORCEMENT SATELLITAIRE)**



**RTK (CINÉMATIQUE EN TEMPS RÉEL)**



**Avantages des données de positionnement**

À elle seule, la mesure du compactage intégrée à la machine peut révéler de nombreux éléments sur l'état du compactage en temps réel, mais ces informations sont très spécifiques et reflètent uniquement un moment dans le temps. Les données de positionnement permettent au système de ne pas fournir uniquement une seule mesure, lorsqu'elle est prise, mais TOUTES les mesures dans le contexte dans lequel elles ont été prises. Ceci change le point de vue de momentané à global, et permet une analyse en profondeur. L'opérateur et la direction du chantier ont accès à une image globale de la qualité du compactage sur tout le chantier au lieu d'un instantané ponctuel.

Cette fonction fait une grande différence pour les systèmes IC par comparaison aux autres méthodes d'essai. Habituellement, le personnel au sol

réalise les essais de qualité à l'aide de procédures d'essai portables, en quelques points donnés. Ce processus prend du temps et coûte cher. Les résultats des essais servent à représenter une surface bien plus étendue que la surface testée, souvent à un rapport d'1:1 million, pas exactement rassurant d'un point de vue statistique. L'IC peut mesurer tout le chantier dans le temps nécessaire à le compacter.

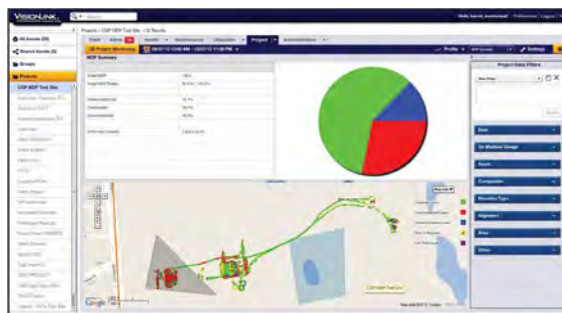
Par ailleurs, certains systèmes peuvent importer des conceptions techniques ou architecturales en 3D dans l'affichage embarqué. Ceci présente un avantage sur un chantier où le contrôle de la pente sans piquets est déjà utilisé ou sur lequel les piquets de niveau et autres repères ne sont pas disponibles.

## Utilisation des données collectées

Les avantages pour l'opérateur de disposer de données supplémentaires sont manifestes. Elles lui permettent notamment d'obtenir un compactage de qualité de façon plus efficace et rentable. De nombreux inspecteurs et services de voirie exigent des rapports en temps réel et des rapports de terrain de base, qui sont des données textuelles documentant la progression générale du compactage par une application d'impression dans la cabine. Désormais, de nombreuses administrations se concentrent sur des rapports externes plus détaillés. Ceci nécessite la transmission de toutes les données de compactage enregistrées de la machine sur le chantier à un PC dans un bureau. Les données peuvent être déplacées manuellement par clé USB ou sans fil au moyen d'un matériel et logiciel de communication.

Une fois toutes les données reçues sur l'ordinateur de bureau, les utilisateurs doivent les filtrer et les trier pour établir la documentation de rapport demandée par les organismes d'inspection et de voirie. Il existe aujourd'hui de nombreux logiciels pour vous aider dans cette tâche, dont AccuGrade Office, SiteVision Office, VisionLink, Veda et bien d'autres encore. Ces solutions logicielles varient en termes de format de fichier, de fonctions et de prix.

## INTERFACE VISIONLINK



## [ AVANTAGES DU COMPACTAGE INTELLIGENT ]

**Documentation de contrôle et d'assurance qualité** – Le compactage intelligent permet de documenter le travail réalisé. Il permet également un contrôle en cours de travail grâce à la possibilité de surveiller la progression sur une base journalière ou quasiment en temps réel, ainsi qu'un stockage électronique et l'analyse des résultats qui peuvent être corrélés avec des enregistrements à long terme ou historiques des données du chantier.

**Productivité de l'opérateur optimisée** – Les informations sont affichées pour l'opérateur et lui permettent de savoir si le sol a atteint la rigidité voulue. Il a ainsi à disposition des données en temps réel qui lui permettent de réagir en conséquence. Le système peut par exemple alerter l'opérateur en cas de points meubles, indiquer des problèmes potentiels de teneur en eau et, avec la précision RTK, le compacteur peut également vérifier les pentes et le nivellement final du chantier.

**Des chantiers plus rentables** – La sortie des résultats donne une carte de toute la zone compactée, qui peut indiquer les zones qui doivent être plus compactées, et les zones qui sont déjà terminées. Ceci réduit le nombre de passes et la consommation de carburant, et peut rapidement réduire le nombre d'essais de compactage nécessaires sur le chantier, en maintenant un niveau de production constant tout en réduisant les frais d'essais, avec moins d'échantillons à étiqueter et à stocker.

**Des résultats fiables** – Le positionnement précis permet de localiser avec précision les problèmes de compactage à un stade précoce du processus de construction, ce qui permet des corrections plus rentables et réduit le risque de reprise par la suite. Les données fournissent une référence fiable concernant la qualité globale du chantier dans un format graphique facile à interpréter. Ceci permet aux opérateurs formés de savoir quand le travail est terminé, pour leur permettre de passer en toute confiance à la zone suivante au lieu d'attendre les résultats des essais conventionnels.

## RÉSULTATS DE MESURE



### [ SPÉCIFICATIONS ACTUELLES DU COMPACTAGE INTELLIGENT ]

Le compactage intelligent pour les applications sol est de plus en plus utilisé car les agences gouvernementales ont étudié et accepté les avantages de cette technologie et ont établi des spécifications pour son utilisation. Les spécifications permettent de s'assurer que la technologie est appliquée de manière à produire un résultat acceptable pour l'agence qui a émis la spécification.

L'organisme américain Federal Highway Administration (FHWA) a établi un ensemble de spécifications génériques pour l'utilisation du compactage intelligent sur les sols. Ces spécifications sont destinées aux départements des transports des différents états américains, pour une utilisation telles quelles ou pour être modifiées selon leurs exigences. Ci-après figure un exemple des spécifications publiées :

Les compacteurs IC doivent répondre aux exigences suivantes :

1. Les compacteurs IC doivent être des compacteurs monocylindre vibrants autotractés équipés d'accéléromètres montés dans ou à proximité du cylindre pour mesurer les interactions entre les rouleaux et les matériaux compactés afin d'évaluer l'énergie de compactage appliquée. Les compacteurs IC peuvent être à cylindre lisse ou à pieds dameurs.
2. Le rendement du compacteur est entendu comme valeur de mesure du compactage intelligent (IC-MV), qui représente la rigidité des matériaux en fonction des vibrations du cylindre du compacteur et de la réponse des matériaux sous-jacents.

3. Les unités radio GPS et réceptrices doivent être montées sur chaque compacteur IC afin de surveiller l'emplacement du cylindre et de suivre le nombre de passes des compacteurs.
4. Les compacteurs IC doivent comprendre un système de documentation intégré embarqué en mesure d'afficher en temps réel des cartes à codes de couleurs des valeurs de mesure IC, dont les valeurs de réponse de rigidité, l'emplacement du compacteur, le nombre de passes du compacteur, sa vitesse, ainsi que la fréquence de vibration et l'amplitude des cylindres du compacteur.
5. L'unité d'affichage doit pouvoir transmettre les données par port USB.
6. Une imprimante embarquée pouvant imprimer les données suivantes doit être présente : l'identité du compacteur, la date des mesures, la zone du chantier cartographiée, le pourcentage de la surface de construction cartographiée, la IC-MV cible, et les zones qui ne sont pas conformes aux valeurs IC-MV cibles. (Option d'impression à sélectionner par le département des transports de chaque état.)

Les autorités gouvernementales d'autres pays ont développé leurs propres spécifications en fonction du processus de construction de chaussées en vigueur dans le pays concerné. Bien qu'elles soient différentes des spécifications de la FHWA, l'objectif en est le même : elles visent à fournir un cadre d'utilisation de l'équipement.



Spéc.	Équipement	Taille du terrain	Spécifications d'emplacement	Documentation
<b>Mn/DOT (USA)</b>	Compacteur de sol vibrant à cylindre lisse ou pieds dameurs (25 000 lbs.)	100 m x 10 m (minimum à la base). Épaisseur maxi 1,2 m	Une bande d'étalonnage/ de contrôle par type ou source de matériau	Compactage, rigidité, humidité, activités de CO <sub>2</sub> , et actions correctrices (rapport hebdomadaire)
<b>ISSMGE (International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering)</b>  <a href="http://www.issmge.org/">www.issmge.org/</a>	Compacteur sélectionné sur la base de l'expérience	100 m par la largeur du chantier	Surface plane et homogène. Chevauchement des passes ≤ 10 % de la largeur du cylindre	Plan de compactage, séquence de compactage et passes de mesure, amplitude, vitesse, valeurs de mesure dynamique, fréquence, mode saut et emplacements correspondants
<b>Earthworks (Autriche)</b>	Compacteurs à cylindre vibrant à pneumatiques et cylindres lisses conseillés	100 m de long par la largeur du chantier	Pas d'inhomogénéités à proximité de la surface (matériaux ou teneur en eau). Chevauchement des passes ≤ 10 % de la largeur du cylindre	Plan de compactage, séquence de compactage et passes de mesure, vitesse, amplitude, fréquence, valeurs de mesure dynamique, mode saut et emplacements correspondants
<b>Société de recherche pour les routes et la circulation (Allemagne)</b>	Les compacteurs autotractés à entraînement sur pneumatiques sont privilégiés. Des compacteurs vibrants remorqués par un véhicule remorqueur peuvent convenir	Chaque zone d'étalonnage doit couvrir au moins 3 terrains partiels de 20 m de long environ	Plat et sans flaques. Type de sol, teneur en eau, épaisseur de couche et capacité portante des couches porteuses similaires. Recouvrement de la piste ≤ 10 % de la largeur de la machine	Valeur de mesure dynamique, fréquence, vitesse, mode saut, amplitude, distance, temps de mesure, type de compacteur, type de sol, teneur en eau, épaisseur de couche, date, heure, nom de fichier ou numéro d'enregistrement, conditions météo, position des pistes d'essai et sens de roulage, hauteur absolue ou position de l'application, conditions locales et remblais dans les zones marginales, paramètres machine et écarts perçus
<b>Vägverket (Suède)</b>	Compacteur monocylindre vibrant ou oscillant. Charge linéaire minimum 15-30 kN	Épaisseur de la couche la plus grande 0,2–0,6 m	La couche doit être homogène et non gelée. Les couches de protection < 0,5 m doivent être compactées avec la couche de fondation	—

Spéc. de compactage	Vitesse	Fréquence
90 % des mesures du compactage du compacteur et la moyenne des mesures du module LWD (sur la base de 3 essais) doivent être à 90 % des valeurs cibles établies dans la bande d'étalonnage	Ceci s'applique au compactage d'étalonnage et de production	
Coefficient de corrélation $\geq 0,7$ . Valeur minimum $\geq 95$ % d'Ev1, la moyenne doit être $\geq 105$ % (ou $\geq 100$ % en mode saut). Les valeurs de mesure dynamiques doivent être inférieures au minimum spécifié sur $\leq 10$ % de la piste. Le minimum mesuré doit être $\geq 80$ % du minimum spécifié. L'écart standard (de la moyenne) doit être $\leq 20$ % en une passe	Constante 2–6 km/h ( $\pm 0,2$ km/h)	Constante ( $\pm 2$ Hz)
Coefficient de corrélation $\geq 0,7$ . Valeur minimum $\geq 95$ % d'Ev1, la moyenne doit être $\geq 105$ % (ou $\geq 100$ % en mode saut). Les valeurs de mesure dynamiques doivent être inférieures au minimum spécifié sur $\leq 10$ % de la piste. Le minimum mesuré doit être $\geq 80$ % du minimum spécifié. Le maximum mesuré en une passe ne peut pas dépasser le maximum défini (150 % du minimum défini). L'écart standard (de la moyenne) doit être $\leq 20$ % en une passe	Constante 2–6 km/h ( $\pm 0,2$ km/h)	Constante ( $\pm 2$ Hz)
Le coefficient de corrélation résultant d'une analyse de régression doit être $\geq 0,7$ . Les unités des différentes zones (largeur du cylindre du compacteur) doivent avoir une valeur de mesure dynamique comprise dans 10 % de la zone adjacente pour pouvoir être adaptées à l'étalonnage	Constante	
Les exigences de capacité portante ou de degré de compactage peuvent être remplies. Moyenne des valeurs de compactage pour deux points d'inspection $\geq 89$ % pour la couche de fondation sous la couche de base et pour les couches de protection de plus de 0,5 m d'épaisseur. La moyenne doit être $\geq 90$ % pour les couches de base. La moyenne requise pour deux rapports de capacité portante varie en fonction du type de couche		Constante 2,5–4,0 km/h

### PROCÉDURES DE FONCTIONNEMENT EN COMPACTAGE INTELLIGENT

Comme l'utilisation de la technologie de mesure du compactage intégrée à la machine abordée plus haut, les compacteurs de sol vibrants à compactage intelligent doivent suivre des processus similaires, avec de légères différences dues aux fonctions supplémentaires offertes par ces systèmes plus élaborés. Il y a deux modes de fonctionnement : mode production et mode essai.

*Mode Production* – L'objectif de ce mode de fonctionnement est de compacter autant de sol que possible à un niveau acceptable, aussi rapidement et efficacement que possible en marche avant et arrière jusqu'à atteindre une valeur cible nominale. Le compactage s'effectue avec des paramètres de travail normaux : vitesse de déplacement de 1 à 2,5 km/h (0,6-1,6 mph) sur les remblais de pierres et d'argile, 2 à 5 km/h (1,2-3,1 mph) sur les sols sableux et limoneux non cohésifs. L'amplitude de la machine est généralement élevée.

Dans le cas d'un compacteur équipé des fonctions de compactage intelligent, l'opérateur peut désormais recevoir d'autres informations que de simples nombres sans dimension donnant une indication sur la rigidité du sol ou sa capacité portante. Avec l'écran couleurs supplémentaire et les fonctions de collecte et de stockage des données, l'opérateur a un aperçu du compactage à l'emplacement exact du compacteur et peut surveiller le chantier en suivant le nombre de passes, le pourcentage de la valeur de mesure

de compactage cible, ou même le pourcentage de modification de la valeur de compactage cible sur une base passe par passe (pour les zones suffisamment compactées et les zones mal compactées). Si nécessaire, l'opérateur peut également marquer numériquement des points et des zones où il peut être nécessaire d'intervenir pour amener le compactage aux spécifications. Toutes les données enregistrées peuvent être sorties de la machine pour les vérifier, les filtrer et les analyser.

Dans ce mode de fonctionnement, le système de cartographie fournit à l'opérateur un aperçu de la progression du compactage sur le chantier et un niveau modéré d'assurance qualité. Cependant, en raison des différentes variables (vitesse au sol, direction, découplage, variation d'humidité du sol), les données de compactage collectées dans ce mode de fonctionnement sont encore de qualité inférieure aux possibilités. Il donne malgré tout à l'opérateur des données pour optimiser l'efficacité et l'uniformité et éliminer le besoin de travailler au jugé pendant le processus de compactage.

Quand les valeurs atteignent une plage proche de la valeur cible, l'opérateur peut passer à une nouvelle zone pendant que le personnel responsable de la qualité procède aux essais pour s'assurer que le travail est conforme aux spécifications ou que la zone peut être préparée pour une passe en mode essai.





*Mode essai* – Une fois le processus de compactage terminé, le système de mesure du compactage peut être utilisé comme compacteur d'essai pour vérifier la qualité du travail dans ce mode de fonctionnement plus précis. Cette approche est utilisée quand les autorités contractantes demandent une documentation ou une carte donnant des indications précises sur la rigidité du sol pour une phase de construction donnée.

Il est de la plus grande importance de s'assurer que les variables sont contrôlées et cohérentes, ainsi les paramètres de travail sont maintenant une vitesse de déplacement constante de 3 km/h (2 mph) avec une faible amplitude (ou désactivée si nécessaire en cas de sur-compactage ou de découplage ou d'autres problèmes avec une machine équipée

de MDP). Ceci permet de s'assurer que ces variables n'influencent pas la mesure et les données collectées et stockées pour les rapports.

Notez également que lorsque l'on parle d'essai de compactage, ce que l'on mesure (le degré de compactage du sol) change pendant la mesure. À mesure que le compacteur lourd se déplace, son poids statique transmet de la pression et d'autres forces dans le sol sous-jacent. Pour cette raison, les opérateurs doivent veiller à réduire la force transmise lorsqu'ils effectuent les mesures. La capacité des systèmes de mesure en fonction de l'énergie à mesurer avec un cylindre statique (sans vibration) en font l'équipement idéal pour cette application.



### PROCÉDURE D'ESSAI RECOMMANDÉE

1. Prévoyez un plan de compactage qui permette à l'opérateur d'aller en marche avant pendant l'opération de cartographie.
2. Définissez une vitesse au sol cible entre 2,5 et 4 km/h (1,5 à 2,5 mph) que vous pourrez maintenir. Une vitesse lente est préférable, et l'utilisation de la commande de vitesse automatique permettra une vitesse uniforme, qui permet une meilleure mesure des données et un meilleur compactage.
3. Réglez une faible amplitude. Ceci réduit les risques de découplage du cylindre et donne une mesure qui pénètre moins profondément dans le sol. Ceci facilite la corrélation avec d'autres méthodes d'essai.
4. Sélectionnez « proofing on » (mode essai activé) dans le menu à l'écran, activez la vibration (ou le compactage statique avec MDP) et avancez pour commencer la mesure du compactage à une vitesse au sol, amplitude et fréquence constantes en procédant en marche avant.
5. Utilisez les fonctions de positionnement GNSS pour guider la machine de façon à faire une seule passe sur la zone concernée. Les passes du cylindre doivent se toucher ou à peine se chevaucher. Chevauchez les passes aux extrémités ou aux zones de retournement. Remarque : les zones de chevauchement sont considérées comme des passes multiples et peuvent causer des écarts des données enregistrées.
6. Quand toute la zone est couverte, sélectionnez « proofing off » (mode essai désactivé) à l'écran.
7. Pour une meilleure qualité, mesurez la teneur en eau du sol selon un schéma en grille sur toute la surface mesurée et compactée. La taille de la grille peut être ajustée à l'échelle du chantier et aux exigences de l'autorité contractante. Ceci donne des informations supplémentaires pour l'analyse des valeurs de compactage, et le schéma en grille permet d'établir une carte isobare de la teneur en eau du sol. Prélevez des échantillons de sol pour les mesures d'humidité le plus tôt possible une fois que le compacteur a terminé une zone.
8. Étudiez la carte et les données de compactage pour sélectionner les zones à corréler à un autre type d'appareil de mesure du compactage. Sélectionnez les zones présentant des valeurs élevées, basses et intermédiaires. Sélectionnez plusieurs zones pour chacune de ces valeurs.
9. Procédez aux essais de corrélation à l'aide d'un rover GNSS portable pour localiser les zones d'essai sélectionnées le plus précisément possible. Ne travaillez pas de manière approximative, car les conditions du sol peuvent varier fortement à de très courtes distances. (Consultez les indications concernant la corrélation des équipements d'essai au chapitre suivant.)

### [ PLAN EN ÉCHELONS AVEC DEUX COMPACTEURS ]

Il est possible d'utiliser plusieurs méthodes pour étalonner une valeur cible de mesure du compactage (CMV ou MDP) et le nombre de passes nécessaire. Certaines de ces méthodes sont imposées par l'autorité contractante et peuvent différer des indications du présent guide.

Le secteur tend de plus en plus à mettre l'accent sur le fait que la zone doit être compactée de façon uniforme à un niveau acceptable, et exige de moins en moins une valeur de compactage ou de densité spécifique pour toutes les zones du chantier.

### Étalonnage du chantier à l'aide d'une bande d'essai et d'un appareil d'essai indépendant

Cette méthode vise à éliminer le plus de variables possible du processus de mesure, et d'utiliser les sols et méthodes qui seront utilisés pendant la construction de la route ou du terrain à bâtir. Elle prend beaucoup de temps et de ressources, mais représente le meilleur moyen de comprendre le processus et d'avoir une compréhension de base des technologies mises en œuvre.

1. Identifiez une zone d'essai qui peut être laissée intacte pendant toute la durée du projet et a des sols, pentes et une structure du sous-sol similaires à ceux de la majorité du projet.
2. Creusez/remblayez la zone d'essai pour l'aplanir et la niveler afin de créer la couche de fondation de la bande d'essai.
3. Amenez le compacteur de sol vibrant et créez une carte de base du compactage à l'aide du système de compactage intelligent en mode essai et à faible amplitude, fréquence constante (ou avec la vibration désactivée pour le MDP), et direction d'avance constante à 3 km/h (2 mph).
4. Si la carte de compactage indique une grande variabilité (90 % des valeurs doivent présenter un écart allant jusqu'à 20 % de la valeur moyenne), essayez de compacter la base à amplitude élevée pour rapprocher le niveau de compactage des zones meubles de celui des zones présentant une valeur plus élevée. Répétez le point 3.
5. Si la couche de fondation est maintenant compactée uniformément (essai conforme : 90 % des valeurs ont un écart allant jusqu'à 20 % maximum de la valeur moyenne), passez au point 6. Si ce n'est pas le cas, il peut soit être nécessaire de sélectionner une autre bande d'essai (point 1), soit d'effectuer des travaux de correction de la couche de fondation pour obtenir une carte plus uniforme. Les travaux de correction peuvent impliquer l'excavation d'objets cachés tels que pierres et boules d'argiles ou la stabilisation du sol avec de la chaux ou d'autres agents. En cas d'utilisation d'un agent stabilisant sur la bande d'essai, il doit également être utilisé sur le chantier pour que la bande d'essai soit valide.
6. Mesurez le compactage de la couche de fondation à l'aide d'un essai à la table portable ou d'un déflectomètre à masse tombante portable, suivant un schéma de points d'essais uniforme sur toute la surface de la bande d'essai. Évitez d'utiliser des appareils d'essai de densité nucléaires ou au cône de sable car ils ne mesurent pas la même caractéristique du sol (densité) que le compacteur vibrant (rigidité). Les points d'essai doivent être localisés à l'aide d'un appareil GNSS de précision (précision au décimètre) afin de pouvoir être corrélés correctement à la carte de compactage GNSS élaborée par le compacteur intelligent. Au lieu d'effectuer l'essai selon un schéma en grille, il est possible d'utiliser la carte GNSS du compacteur pour sélectionner plusieurs emplacements dispersés qui représentent les valeurs de compactage élevées, moyennes et basses. Trois essais au moins sont nécessaires pour chaque plage de valeurs (9 points d'essai minimum). Plus le nombre de points d'essai est élevé, plus le résultat est précis du point de vue statistique.
7. Mesurez la teneur en eau à chacun des points d'essai. Si la teneur en eau présente des variations importantes, les corrélations ne donneront pas de résultat uniforme.

**Mise en garde :** n'oubliez pas que l'appareil d'essai portable utilisé pour étalonner la valeur de mesure du compactage intégrée au compacteur a sa propre variabilité de mesure. Ceci signifie qu'il pourrait être utilisé pour mesurer plusieurs fois un même sol de propriétés identiques sans donner toutefois des résultats identiques. Par exemple, les mesures de densité nucléaires peuvent varier de 15 % sur un même échantillon. La pratique courante est de prendre une mesure, de tourner l'appareil de 90 degrés et de prendre une autre mesure. La moyenne des deux mesures est enregistrée comme valeur mesurée.



8. Corréliez les valeurs d'essai de compactage aux valeurs de la carte GNSS du compacteur et tracez les résultats avec les valeurs de mesure du compactage sur l'axe des ordonnées y et les résultats d'essai de terrain portables sur l'axe des abscisses x. Vous obtenez un diagramme de dispersion.
9. Utilisez la méthode d'ajustement de courbe pour définir la meilleure courbe d'étalonnage entre les valeurs de mesure du compactage intégrée et la méthode d'essai sur le terrain. Cet outil sera utilisé uniquement pour ce type de sol sur le chantier et pour les essais de compactage de la couche de fondation.
10. Amenez la première couche de matériau de remplissage et posez-la uniformément à la profondeur spécifiée.
11. Compactez le matériau jusqu'à ce qu'il soit uniformément compacté et que les valeurs de mesure du compactage intégrée ne changent pas sensiblement lors du déplacement vers l'avant.
12. Répétez les points 2 à 9 pour cette couche de matériau. Cette couche de base a sa propre courbe d'étalonnage, qui sera utilisée sur tout le chantier pour cette couche de matériau.
13. Répétez les points 10 à 12 pour toutes les couches de remblai amenées, chaque couche ayant sa propre courbe d'étalonnage.
14. Si l'état du sol change en raison de la météo, effectuez un nouvel essai de compactage sur la bande d'essai pour redéfinir le niveau d'acceptation pour la valeur de mesure du compactage intégrée.



### Étalonnage des résultats de mesure du compactage intégrée et comptage du nombre de passes à l'aide d'un compacteur de sol (sans appareil d'essai sur le terrain indépendant)

Ce procédé (ou procédé similaire) est utilisé dans certains pays scandinaves. Il est plus pragmatique et requiert moins de temps et de ressources tout en permettant un bon contrôle du compactage sans utiliser d'autres mesures du compactage de référence. Son objectif est d'utiliser le compacteur pour établir un niveau de compactage maximum nominal pour les matériaux du chantier et de définir le nombre de passes nécessaire pour atteindre ce niveau. Il vise à créer un niveau de compactage uniforme sur tout le chantier. Le procédé suivant utilise une bande d'essai pour définir les valeurs de référence de compactage. La bande d'essai est facultative, car il est possible de compacter une partie du chantier ou tout le chantier comme s'il s'agissait d'une bande d'essai.

1. Identifiez une zone d'essai qui peut être laissée intacte pendant toute la durée du projet et a des sols, pentes et une structure du sous-sol similaires à ceux de la majorité du projet.
2. Creusez/remblayez la zone d'essai pour l'aplanir et la niveler afin de créer la couche de fondation de la bande d'essai.
3. Amenez le compacteur de sol vibrant et créez une carte de référence du compactage (carte d'essai) à l'aide du système de compactage intelligent en mode essai et à faible amplitude, fréquence constante (ou avec la vibration désactivée pour le MDP), et direction d'avance constante à 3 km/h (2 mph).
4. Vérifiez la teneur en eau du sol en plusieurs points de la bande d'essai. Si elle est trop élevée ou trop basse, corrigez-la avant de poursuivre le compactage.
5. Si la carte de compactage indique une grande variabilité (90 % des valeurs doivent présenter un écart allant jusqu'à 20 % de la valeur moyenne), compactez la base à amplitude élevée jusqu'à ce que les valeurs de mesure du compactage soient plus homogènes sur la bande d'essai. Répétez le point 3.
6. Lorsque vous obtenez un compactage uniforme, vérifiez la teneur en eau en plusieurs points et notez les résultats.
7. Amenez la première couche de matériau de remplissage. Sélectionnez la fonction carte d'essai et compactez la couche de matériau à amplitude élevée et une vitesse au sol lente uniforme de 3 km/h (2 mph). Terminez une passe en avant et une en arrière dans chaque piste pour rouler sur du matériau non compacté. La teneur en eau doit être uniforme et à un niveau optimum pour le sol ou le remblai de pierres utilisé.
8. Répétez le cycle de compactage sur toute la surface, en notant le niveau de la valeur de mesure du compactage prédominante pour chaque passe de compactage.



9. Répétez le point 8 jusqu'à ce que le niveau de compactage entre les passes ne varie plus sensiblement ou que le compacteur commence à découpler.
10. La valeur moyenne à laquelle la mesure du compactage commence à se stabiliser est la valeur cible, et le nombre de passes nécessaire pour atteindre ce niveau de compactage est votre nombre de passes cible.
11. Enregistrez ces résultats, et réglez la valeur cible affichée et le nombre de passes pour cette couche.
12. Répétez les points 7 à 11 avec une nouvelle carte d'essai pour chaque nouvelle couche. Lorsque vous aurez terminé, vous aurez une valeur de mesure du compactage et un nombre de passes cible pour chaque couche.
13. Si plusieurs couches ont des valeurs quasi identiques, utilisez une seule valeur de mesure du compactage cible pour toutes les couches de remplissage correspondantes.
14. Compactez le chantier comme d'habitude, en utilisant la carte de compactage comme guide pour obtenir un compactage uniforme sur toute la surface.
15. Avec le temps et l'expérience acquise dans une région, les opérateurs qualifiés peuvent être en mesure de définir les valeurs de mesure du compactage et le nombre de passes cibles sans bande d'essai.
16. Si vous souhaitez une mesure plus précise du niveau de compactage final, utilisez le compacteur en mode essai (faible amplitude, vitesse constante de 3 km/h [2 mph]), fréquence constante et marche avant uniquement).







### Utilisation des valeurs de compactage intelligent sans étalonnage sur le chantier

Ce procédé est le plus pragmatique et requiert peu ou pas de temps supplémentaire. Notez que ce procédé est le plus adapté à ce que nous avons décrit plus haut comme le mode production de compactage et nécessite une certaine expérience du système, une compréhension du mode de fonctionnement de la technologie et du processus général de compactage du sol.

L'objectif de ce procédé est d'utiliser la technologie de compactage intelligent pour comparer le changement de la progression du compactage sur une base passe par passe, afin de savoir quand la physique de l'énergie de compactage est adaptée aux conditions présentes. Comme indiqué précédemment, l'utilisation du compactage intelligent et de la technologie de mesure du compactage intégrée n'est pas une garantie du compactage ou de la densité, et, souvent, le procédé mis en œuvre est plus important que les outils et la technologie utilisés sur un chantier. Un compacteur de caractéristiques données peut être peu efficace après un certain nombre de passes sur un matériau donné, empêchant d'atteindre l'objectif de compactage et réduisant l'utilité de toutes les passes successives. Il serait avantageux de savoir quand cette condition se produit afin de ne plus gaspiller de temps et de carburant.

1. Choisissez la taille du compacteur de sol vibrant équipé de fonctions de compactage intelligent du mieux possible en tenant compte des objectifs de compactage, des types de sol, des niveaux d'humidité, de l'épaisseur de couche, etc. Les détails donnés plus haut décrivent certains des facteurs à prendre en considération lors du dimensionnement et de la sélection de la configuration du compacteur.
2. Commencez le compactage sur le chantier avec l'écran de compactage intelligent configuré pour cartographier les valeurs de mesure du compactage et comparer la variation en pourcentage d'une passe à la suivante.
3. La fonction de cartographie peut être définie et personnalisée pour affecter une couleur à une plage de variation en pourcentage donnée, d'une passe à l'autre. Par exemple, réglez l'écran pour représenter en rouge les zones présentant une variation de 50 à 100 %, en jaune pour les zones présentant une variation de 10 à 49 % et enfin en vert les zones présentant une variation de 0 à 9 %, d'une passe à l'autre. Ces plages peuvent être modifiées si nécessaire en fonction de l'expérience ou des conditions sur le chantier.

4. Continuez à rouler et à compacter, avec pour objectif d'obtenir une carte verte.
5. Si certaines zones ne passent pas en vert (peu à pas de variation d'une passe à l'autre), ceci indique qu'il peut y avoir des problèmes de compatibilité du sol dans cette zone, ou des problèmes de la couche de fondation à régler.
6. Quand la carte est suffisamment verte et qu'il n'y a plus de variation des valeurs de mesure du compactage d'une passe à l'autre, utilisez un essai à la table portable ou un déflectomètre à masse tombante portable comme décrit dans les exemples. Veillez à suivre un schéma uniforme des points d'essai sur toute la surface compactée/testée ou selon les exigences particulières pour vérifier si le compactage atteint le compactage cible spécifié pour le projet.
7. Si les essais révèlent un niveau de compactage acceptable, continuez le processus sur le chantier comme indiqué.
8. Si les essais indiquent que les objectifs de compactage ne sont pas atteints, l'un des deux phénomènes suivants se produit.
  - 1) La taille de la machine et son poids en ordre de marche ne sont pas adaptés au type de sol et à l'épaisseur de couche et/ou
  - 2) la teneur en eau du sol est incorrecte (sol trop sec ou trop humide). Dans les deux cas, le compacteur sur le chantier ne sera pas en mesure de faire progresser le compactage tant que certaines conditions ne sont pas modifiées.



## [ DIAGNOSTIC DES ANOMALIES DE RÉSULTATS DU COMPACTAGE INTELLIGENT ]

Comme indiqué plus haut, certaines conditions du chantier et facteurs liés au fonctionnement peuvent affecter les résultats des systèmes de compactage intelligent. Avec l'expérience, les opérateurs commenceront à reconnaître certains modèles et à comprendre la cause probable d'un écart par rapport aux valeurs prévues. Nous décrivons ci-après certains problèmes courants et leurs causes et solutions. La maîtrise de ces informations vous aidera à résoudre plus rapidement les problèmes sur le chantier.

### **Problème : Les valeurs de mesure du compactage sont inférieures aux valeurs prévues**

**Cause :** Le sol granulaire est trop sec pour le compactage. Un compactage supplémentaire cause la rupture de la structure du sol et son décompactage.

**Solution :** Augmentez l'humidité du sol avant de continuer à le compacter. Les sols granulaires peuvent absorber beaucoup d'eau avant de devenir trop humides, car l'eau tend à être drainée. Ajoutez un peu plus d'eau que nécessaire pour permettre le séchage et le drainage du sol.

**Cause :** Le sol est plutôt composé d'argile que de gravier ou de matériaux granulaires. Ou bien l'argile peut être enterrée sous la surface et continuer à affecter les mesures.

**Solution :** Enlevez l'argile du sol si ceci est possible ou acceptez des valeurs plus basses. Vous pouvez également utiliser une technologie de mesure du compactage intégrée au compacteur qui mesure en fonction de l'énergie (MDP par exemple), qui n'est pas aussi perturbée par les sols cohésifs.

**Cause :** Le cylindre découple sur les zones les plus dures du terrain. En cas de découplage du cylindre, les RMV sont élevées et les valeurs de mesure du compactage (CMV) tendent à être plus basses que ne le laisserait supposer l'état du sol.

**Solution :** Réglez une faible amplitude. Si le découplage continue, le compactage est terminé. Poursuivre le compactage en cas de découplage peut causer un décompactage.

**Cause :** Le sol argileux est trop humide.

**Solution :** Utilisez un disque, une herse ou une tritureuse pour ouvrir le sol de façon à ce qu'il sèche avant de le compacter. Vous pouvez également utiliser une technologie de mesure du compactage intégrée au compacteur qui mesure en fonction de l'énergie (MDP par exemple), qui n'est pas aussi perturbée par les sols cohésifs, mais notez que les niveaux d'humidité peuvent encore ne pas être adéquats pour obtenir le compactage souhaité.

**Cause :** Le matériau compacté a été posé sur une base non compactée ou non stabilisée. Par conséquent, il fléchit trop pendant le compactage et ne se compacte pas.

**Solution :** La couche supérieure du sol doit être enlevée et la couche inférieure doit être corrigée. Ceci peut nécessiter un séchage et recompactage, l'ajout de chaux ou d'un autre agent stabilisant voire l'excavation du sol concerné et son remplacement.

**Cause :** La fréquence du cylindre est supérieure à la fréquence réglée (improbable).

**Solution :** La fréquence du cylindre doit être proche de 30 Hz (1 800 VPM) pour obtenir des résultats plus homogènes. Demandez à un mécanicien de déterminer pourquoi la vitesse de vibration n'est pas correcte et de la corriger. Vous pouvez également utiliser une technologie de mesure du compactage intégrée au compacteur qui mesure en fonction de l'énergie (MDP par exemple) en mode statique pour voir si elle a un effet sur l'uniformité des résultats de compactage.

**Cause :** Il y a un ou des objets enterrés qui ne sont pas aussi rigides que le sol environnant, une cuvette dans laquelle sont enterrés des arbres ou une autre forme de biomasse, des déchets enterrés ou une boule d'argile. Ce phénomène apparaît sur la carte sous forme de zone relativement localisée.

**Solution :** Creusez et remplacez les matériaux par du sol de bonne qualité si la situation est suffisamment grave pour l'exiger.

**Cause :** La vitesse de déplacement est trop élevée.

**Solution :** Ralentissez pour avoir une meilleure productivité et des valeurs de compactage plus élevées. Utilisez la commande de vitesse automatique si le compacteur est équipé de cette option.

**Cause :** Le sens de déplacement affecte les valeurs de mesure du compactage intégrée.

**Solution :** Ceci est normal, les valeurs obtenues sont différentes en marche avant et en marche arrière. Il n'y a pas d'autre solution que de rouler dans une seule direction ou d'accepter les valeurs de compactage d'une seule direction pour l'analyse.



### Problème : Les valeurs de mesure du compactage sont supérieures aux valeurs prévues

**Cause :** Le type de sol de la couche de base ou de fondation est plus rigide que prévu.

**Solution :** Aucune, testez à l'aide d'un pénétromètre dynamique à cône et vérifiez la résistance au cisaillement du sous-sol. Si elle est plus importante, acceptez les résultats comme normaux.

**Cause :** Un objet est enterré sous la surface. Il peut s'agir d'une pierre, d'une dalle de béton, d'un ancien revêtement ou des fondations d'un bâtiment.

**Solution :** Extrayez l'objet pour obtenir un compactage uniforme.

**Cause :** La vitesse de déplacement est trop basse par moments. (Ceci est improbable à moins que l'opérateur n'essaie de compacter suivant un nombre de passes donné).

**Solution :** Maintenez une vitesse constante. Utilisez la commande de vitesse automatique si le compacteur est équipé de cette option.

**Cause :** Le sol est gelé.

**Solution :** Aucune.

### Problème : Les valeurs de mesure du compactage sont irrégulières

**Cause :** Les conditions actuelles du sol varient soit en surface soit sous la surface. Ceci se produit plus souvent qu'on ne le croit. Des objets enterrés, des changements de matériau de remplissage et les variations de la teneur en eau peuvent affecter les valeurs de mesure du compactage intégrée au compacteur.

**Solution :** En cas d'écarts importants à corriger, commencez d'abord par la solution la plus facile. Vérifiez la teneur en eau du sol et ajustez-la. Extrayez les objets enterrés et remplacez le sol si nécessaire.

**Cause :** Les valeurs de mesure du compactage intégrée au compacteur mesurées en marche avant sont supérieures/inférieures aux valeurs mesurées en marche arrière.

**Solution :** Ceci est normal, et varie en fonction du type de sol et du niveau de compactage. En général, les différences s'atténuent à mesure que le sol est compacté.



**Cause :** Le cylindre découple pendant le compactage. Le découplage peut causer de grands écarts des valeurs de mesure du compactage intégrée au compacteur, car les valeurs moyennes tendent à baisser quand le cylindre commence à découpler sur un sol plus dur.

**Solution :** Réglez une faible amplitude. En cas de découplage à faible amplitude, le sol a atteint la rigidité maximum que le compacteur peut obtenir. Vous pouvez également utiliser une technologie de mesure du compactage intégrée au compacteur qui mesure en fonction de l'énergie (MDP par exemple) en mode statique (vibration désactivée) pour voir si elle a un effet sur l'uniformité des résultats de compactage.

## [ L'AVENIR DU COMPACTAGE INTELLIGENT ]

Comme nous l'avons expliqué, la mesure de rigidité du sol est extrêmement complexe en raison de toutes les variables en jeu. Cependant, plus l'IC est utilisé, mieux vous comprendrez les fonctions et les carences de cette technologie. À mesure que vous acquerez de l'expérience, de nouvelles technologies, telles que le Machine Drive Power, émergeront et offriront encore plus d'avantages pour permettre de surmonter les problèmes liés aux applications que la dernière vague de progrès a généré. Avec le temps, le coût des solutions matérielles pour les technologies existantes baisse, ce qui les rend plus accessibles pour les adapter aux applications de compactage du sol.

Le compacteur d'avenir aura probablement à disposition plusieurs technologies de mesure, car chaque technologie présente différentes fonctions utiles. De nouvelles technologies de mesure apparaîtront, peut-être des radars pénétrant le sol, une imagerie par ultrasons ou magnétique. Il sera peut-être possible de créer des images 3D documentant la totalité de la chaussée. Des technologies de détection de l'eau pourront avertir l'opérateur qu'il doit appeler un camion d'eau ou une désoucheuse. Tous les opérateurs de compacteurs pourraient avoir accès aux informations de toutes les machines du chantier (communications machine à machine). Ceci donne un aperçu en temps réel de la progression du chantier avec des avantages plus facilement perceptibles avec plusieurs compacteurs ou appareils de mesure. Les chefs de chantier pourront surveiller et utiliser les données pour prendre les décisions les plus rentables au jour le jour.

À l'avenir, les données seront de plus en plus importantes. L'un des secteurs à développer spécifiquement concernera les données de capteurs et leur capacité à prélever rapidement et facilement les données du chantier et à les transmettre à d'autres applications extérieures (PC, tablettes, etc.). Les technologies actuelles fournissent déjà plus de données qu'il est possible de trier facilement pour que les chefs de chantier et inspecteurs puissent les exploiter. La fonction de filtrage extérieur des données, de tri et création d'un rapport de chantier qui devra répondre aux besoins de l'utilisateur final revêtira une importance cruciale et est un domaine pour lequel de nombreuses spécifications seront bientôt établies.

La science du compactage vit une époque passionnante, le temps nous dira quels progrès et technologies s'imposeront, mais une chose est sûre : grâce aux économies, à la qualité et aux performances que le compactage intelligent permet d'atteindre, la technologie sera de plus en plus exigée et incluse dans les spécifications des chantiers du monde entier.

## ANNEXE

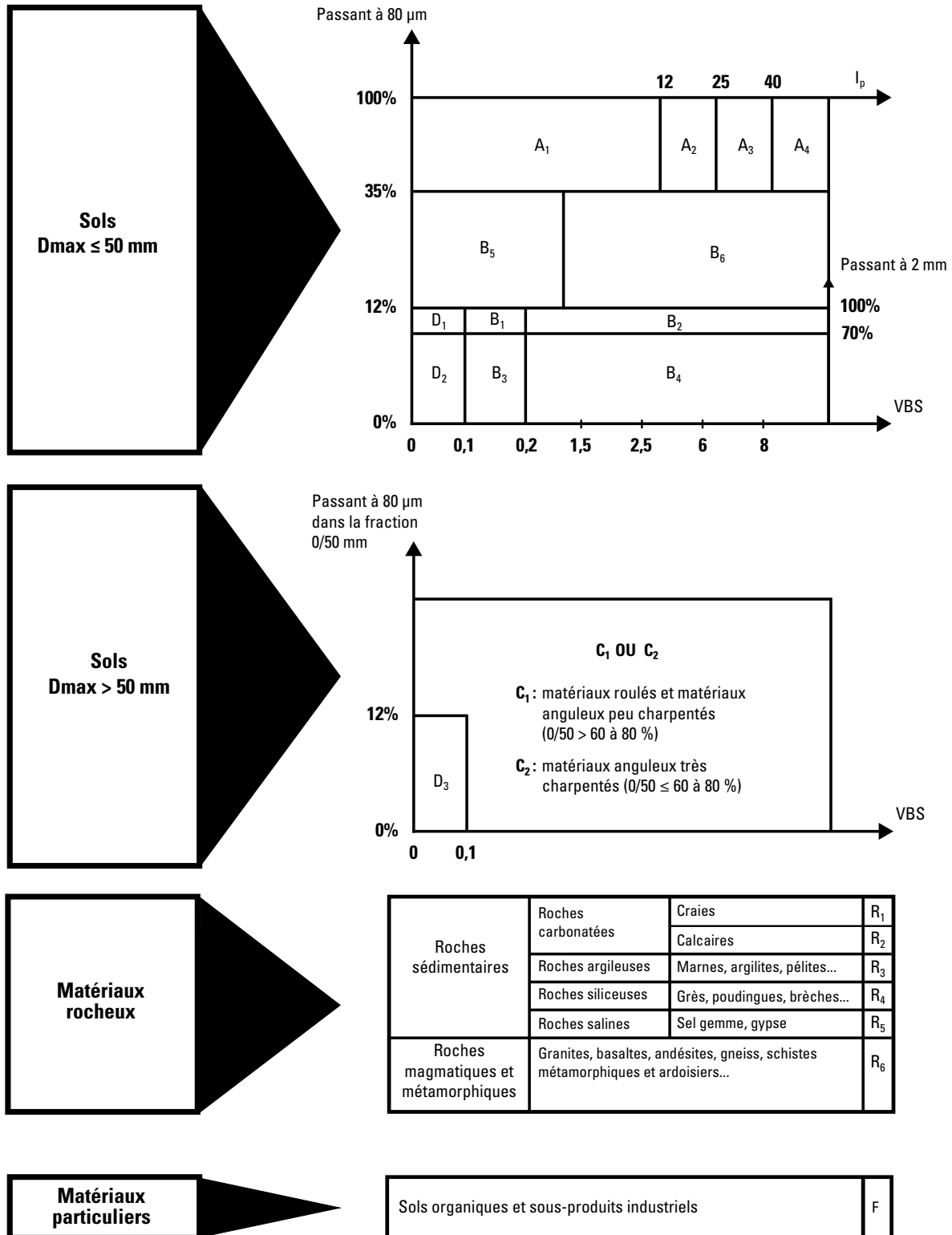
## [ SYSTÈMES DE CLASSIFICATION DU SOL ]

<b>AASHTO CLASSIFICATION OF HIGHWAY SUBGRADE MATERIALS</b> (with suggested subgroups)											
General Classification	Granular Materials (35% or less passing #200)							Silt-Clay Materials (more than 35% passing #200)			
Group Classification	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
<b>Sieve Analysis Percent Passing:</b>											
# 10	0-50		51-100								
#40	0-30	0-50	0-10	0-35	0-35	0-35	0-35	36-100	36-100	36-100	36-100
#200	0-15	0-25	0-10	0-35	0-35	0-35	0-35	36-100	36-100	36-100	36-100
<b>Characteristics of Fraction Passing #40:</b>											
Liquid Limit				0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+
Plasticity Index	0-6		N.P.	0-10	0-10	11+	11+	0-10	0-10	11+	11+
<b>Group Index</b>	0		0	0		0-4		0-8	0-12	0-16	0-20
<b>Usual Types of Significant Constituent Materials</b>	Stone Fragments Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
<b>General Rating as Subgrade</b>	Excellent to Good						Fair to Poor				

Système de classification du sol AASHTO



## Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature



*Système français de classification du sol*

Hauptgruppe	Korngrößenanteil ≤ 0,06 mm	Korngrößenanteil > 2,0 mm	Gruppe (allgemein)	Gruppe (detailliert)	Kurzzeichen Gruppensymbol
Grobkörniger Boden	≤ 5	< 40	Kies	Enggestufte Kiese	GE
				Weitgestufte Kies-Sand-Gemische	GW
				Intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische	GI
			Sand	Enggestufte Sande	SE
				Weitgestufte Sand-Kies-Gemische	SW
				Intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische	SI
Gemischtkörniger Boden	5 bis 40	< 40	Kies-Schluff	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GU
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GU*
			Kies-Ton	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GT
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GT*
		≤ 40	Sand-Schluff	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	SU
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	SU*
			Sand-Ton	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	ST
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	ST*
Feinkörniger Boden	< 40	—	Schluff	Leicht plastische Schluffe $W_L \leq 35$	UL
				Mittelpastische Schluffe $W_L = 35$ bis 50	UM
			Ton	Leicht plastische Tone $W_L \leq 35$	TL
				Mittelpastische Tone $W_L = 35$ bis 50	TM
				Ausgeprägt plastische Tone $W_L = 50$	TA
				—	—
Organogener Boden	< 40	—	Nicht brenn- und schwelbar	Organogene Schluffe $W_L = 35$ bis 50	OU
	≤ 40			Organogene Tone $W_L > 50$	OT
				Grob bis gemischtkörnige Böden mit humosen Beimengungen	OH
				Grob bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kieseligen Bildungen	OK
Organischer Boden	—	—	Brenn- und schwelbar	Nicht bis mäßig zersetzte Torfe	HN
				Zersetzte Torfe	HZ
				Mudden (Faulschlamm)	F
Auffüllung <sup>1</sup>	—	—	—	Auffüllung aus Fremdstoffen	A

1 - Eine Auffüllung ist eine unter menschlicher Einwirkung entstandene Schüttung aus natürlichen Böden oder Fremdstoffen.

Systeme allemand de classification du sol

## USCS SOIL CLASSIFICATION SYSTEM

SOIL FRACTION	SYMBOL	SIZE RANGE	
<b>Boulders</b>	<b>None</b>	Greater than 12"	
<b>Cobbles</b>	<b>None</b>	75 mm (3") to 12"	
<b>1- Course Grained Soils:</b>			
<b>Gravel</b>	<b>G</b>	75 mm (3") to #4 Sieve (4.25 mm)	
Course Gravel		75 mm to 19 mm	
Fine Gravel		#4 Sieve to 19 mm	
<b>Sand</b>	<b>S</b>	#4 Sieve to #200 Sieve (0.075 mm)	
Course Sand Medium Sand Fine Sand			
<b>2- Fine Grained Soils:</b>			
Fines		Less than #200 Sieve	
Silt	<b>M</b>	Use Atterberg Limits	
Clay	<b>C</b>	Use Atterberg Limits	
<b>3- Organic Soils</b>			
	<b>O</b>	Use Atterberg Limits	
<b>4- Peat</b>			
	<b>Pt</b>	Visual Identification	
<b>Gradation Symbols</b>		<b>Liquid Limit Symbols</b>	
Well-graded	<b>W</b>	High LL	<b>H</b>
Poorly-graded	<b>P</b>	Low LL	<b>L</b>

*Système de classification unifié*



SOIL GROUPS GRAVEL and SAND may be qualified sandy GRAVEL and gravelly SAND where appropriate			SUB-GROUPS and in-laboratory identification				
			GROUP SYMBOL	SUB-GROUP SYMBOL	FINES % < 0.06 mm	LIQUID LIMIT	
COARSE SOILS less than 35% of the material is finer than 0.06 mm	GRAVELS More than 50% of coarse material is of gravel size (coarser than 2 mm)	Slightly silty or clayey GRAVEL	G GW GP	GW GPu CPg	0 to 5		
		Silty GRAVEL	G-F	G-M	GWM GPM	5 to 15	
		Clayey GRAVEL		G-C	GWC GPC		
		Very silty GRAVEL	GF	GM	GML, etc.	15 to 35	
		Very clayey GRAVEL		GC	GCL GCI GCH GCV GCE		
		SANDS More than 50% of coarse material is of sand size (finer than 2 mm)	Slightly silty or clayey SAND	S	SW SP	SW SPu SPg	0 to 5
	Silty SAND		S-F	S-M	SWM SPM	15 to 35	
	Clayey SAND			S-C	SWC SPC		
	Very silty SAND		SF	SM	SML, etc.	15 to 35	
	Very clayey SAND	SC		SCL SCI SCH SCV SCE			
FINE SOILS more than 35% of the material is finer than 0.06 mm	Gravelly or sandy SILTS and CLAYS 35% to 65% fines	Gravelly SILT	FG	MG	MLG, etc.		
		Gravelly CLAY		CG	CLG CIG CHG CVG CEG		
		Sandy SILT	FS	MS	MLS, etc.		
	Sandy CLAY	CS		CLS, etc.			
	SILTS and CLAYS 65% to 100% fines	SILT (M SOIL)	F	M	ML, etc.		
		CLAY		C	CL CI CH CV CE		< 35 35 to 70 50 to 70 70 to 90 > 90
<b>ORGANIC SOILS</b>		Description letter 'O' suffixed to say group or sub-group symbol		Organic matter in significant amount e.g. MHO – organic silt of high LL			
<b>PEAT</b>		Pt – consists predominantly of plant remains (fibrous or amorphous)					

**Primary Letter**

G = Gravel  
S = Sand  
M = Silt  
C = Clay  
O = Organic Soil  
Pt = Peat

**Secondary Letter**

W = Well graded  
P = Poorly graded  
M = With non-plastic fines  
C = With plastic fines  
L = Of low plasticity (LL < 50)  
H = Of high plasticity (LL > 50)

Classification v1.00 Sept 2010

*Systeme de classification du sol britannique*

[ EXIGENCES DE COMPACTAGE ]

Dispositifs intégrés au compacteur effectuant une application de contrôle continu du compactage

BASIC/MINIMUM REQUIREMENTS					
One of the lower 3 blocks (one value)	At least 2 blocks	3 top blocks	Top block or 4 lower blocks	2 lower blocks	At least one block
		Time stamp	Close-loop mode		
Qualitative observation (ex: double-jump...)		Mapping on board	Actual N passes	Data post-treatment facilities, & additional information	
Dimensional bearing capacity (ex: modulus...)	Number of passes (actual vs. target value)	Automatic positioning on board 2D or 3D	Actual frequency	Result by histogram and statistics	Data exchange between machines
Dimensional (ex: stiffness...)	Relative evolution (% related to target values D or ND)	Manual positioning 2D + layer (optional)	Actual amplitude A0	Result by distance or surface	Remote data exchange
Non-dimensional value	End of compaction (D or ND)	Distance 1D	Actual speed V	Identification of machine and CCC device	Data exchange from office (USB stick)
<b>1</b> Behaviour of the material (dynamic response)	<b>2</b> Status of compaction (Comparison)	<b>3</b> Positioning, traceability during process	<b>4</b> Operational information (record and display)	<b>5</b> Control report, documentation	<b>6</b> Communication, others

From the pamplet *CECE – Guidelines to evaluate soil and asphalt compactors equipped with continuous compaction control (CCC)*

## GLOSSAIRE TERMINOLOGIQUE

### - A -

- À granulométrie insuffisante** Également appelé sol à granulométrie uniforme ; sols à gros grains contenant des particules ayant une taille relativement uniforme, ce qui le rend difficile à compacter.
- À granulométrie uniforme** Également : à granulométrie médiocre ; qualité des sols à gros grains contenant des particules de taille relativement uniforme, ce qui les rend difficile à compacter.
- À granulométrie étalée** Qualité des sols à gros grains contenant des particules de différentes dimensions, ce qui facilite leur compactage.
- Amplitude** Mesure d'une moitié du mouvement vertical total crête à crête d'un cylindre vibrant par cycle complet.
- Argile** Matériau (sol) à faible granulométrie qui se lie bien à l'eau en utilisant les charges superficielles électrochimiques.
- Assurance qualité (AQ)** Méthodes d'essai et données utilisées par le maître de l'ouvrage pour documenter la qualité du compactage obtenue sur un chantier.

### - B -

- Base** Appelée également « couche de base » ; couche du matériau spécifié ou sélectionné d'épaisseur prévue, construite sur la couche de fondation afin de remplir une ou plusieurs fonctions dont : répartition de la charge, drainage et réduction de l'effet du gel.

### - C -

- Capacité portante** Capacité d'un matériau à supporter une charge.
- Capillarité** Capacité d'un matériau à absorber l'eau vers le haut ou latéralement.
- Charge linéaire** Mesure utilisée dans l'industrie pour comparer la force de compactage des compacteurs à cylindre lisse statique.
- Coefficient d'uniformité** Paramètre décrivant la répartition de la granulométrie (courbe granulométrique) d'un sol.
- Cohésion** Capacité d'un matériau à conserver sa résistance lorsqu'il est non restreint, c'est-à-dire à adhérer et à conserver sa forme malgré les changements de teneur en eau ou sa submersion.
- Compactage intelligent** D'une manière générale, le compactage intelligent peut être défini comme une technologie intégrée au compacteur appliquée au processus de compactage pour améliorer le rendement du chantier en éliminant le travail au jugé des opérateurs.
- Compactage** Processus de réduction des vides dans un matériau par manipulation mécanique, pour en augmenter la densité.
- Compactibilité** Niveau auquel un matériau peut dépasser sa résistance à la déformation spécifique.
- Compressibilité** Degré de réduction de volume d'un matériau lorsqu'une force lui est appliquée.
- Contrôle qualité (CQ)** Procédure mise en œuvre par l'entrepreneur pour s'assurer que les travaux de compactage sont réalisés conformément aux spécifications.
- Couche de fondation** Couche située entre la couche de forme et de base.
- Couche** Une couche simple de matériau mis en place. Son épaisseur est variable.



## - D -

<b>Densité</b>	Mesure de la masse par unité de volume, indicateur conventionnel de la capacité portante.
<b>Double-rebond</b>	Voir Découplage.
<b>Décompactage</b>	Perte de compactage due à la ré-application d'une force de compactage non nécessaire.
<b>Découplage</b>	Également nommé « double-rebond », phénomène dans lequel le cylindre rebondit suite à un impact vibratoire, suffisamment haut pour que la vibration suivante se produise lorsque le cylindre est encore en l'air.

## - E -

<b>Élasticité</b>	Tendance d'un matériau à revenir à sa forme d'origine (ou presque) une fois la charge de compression enlevée.
<b>Essai Proctor (normal ou modifié)</b>	Essai de laboratoire qui définit la densité sèche maximum d'un matériau ainsi que la teneur en eau optimum pour atteindre la densité maximum.
<b>Étalonnage</b>	Processus d'ajustement des paramètres du système pour maximiser ses capacités avec le matériau du chantier.

## - F -

<b>Fines</b>	En général, matériaux dont les particules sont de très petite taille, en dessous d'un seuil établi par essai au tamis. Les fines passent à travers le tamis le plus petit. Les organismes du monde entier ont leur propre définition de la taille du tamis, mais elles sont fondamentalement similaires.
<b>Force centrifuge</b>	Force causant l'accélération d'un poids en rotation non équilibré en l'éloignant de son axe.
<b>Force totale appliquée</b>	Calcul de l'énergie vibratoire maximum que le compacteur peut appliquer au sol.
<b>Forme</b>	Sol préparé pour supporter une structure routière. Il fait office de fondation de la structure et est quelquefois appelé « sol de fondation » ou « couche porteuse ».
<b>Fréquence de résonance</b>	Pour les compacteurs vibrants, point auquel la vibration du matériau de sol contribue à la vibration du compacteur et fait que l'énergie de compactage dépasse la force centrifuge générée, c'est à dire que le rendement est supérieur à l'énergie.
<b>Fréquence</b>	Mesure du nombre de cycle complets (vibrations par exemple) sur une période donnée.
<b>Fréquence propre</b>	Fréquence de vibration d'une masse en raison de ses caractéristiques.

## - G -

<b>GLONASS</b>	Constellation satellite russe similaire au GPS.
<b>Gradient de compactage</b>	Degré de compactage sur la profondeur d'influence. Le sol tend à être moins compact en surface, plus compact sur une zone centrale étendue et à nouveau moins compact vers la fin de la profondeur d'influence.
<b>Grain</b>	Particule minérale.
<b>Granulat</b>	Composant granulaire minéral porteur d'une chaussée, en général du sable, du gravier, des coquilles, scories, pierre concassée ou fines.
<b>Granulométrie</b>	Plage de taille des particules du sol.
<b>Gravier</b>	Matériau minéral à gros grains, défini par l'USCS comme des particules de diamètre inférieur à 75 mm (3 in) qui ne passent pas dans un tamis n°4.

### - I -

**Impact** Force de magnitude croissante générée en faisant passer une pression de statique à dynamique, par exemple en faisant tomber un poids. Les chocs à basse fréquence ou à fréquence irrégulière (50 à 600 chocs par minute) sont considérés comme des forces de choc.

**Indice de plasticité** Différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité d'un sol. Cette mesure est utilisée pour déterminer la méthode de stabilisation du sol convenant le mieux aux sols à grains fins.

### - L -

**Limite de liquidité** Limite d'Atterberg très significative : point auquel un sol contient une quantité d'eau telle qu'il est considéré comme étant liquide.

**Limite de plasticité** Limite d'Atterberg très significative : seuil auquel un sol retient une quantité d'eau telle qu'il est considéré comme étant plastique.

**Limon** Matériau (sol) minéral à grains fins non cohésif.

### - M -

**Manipulation** Processus de pétrissage qui agence les particules en masse plus dense.

**Mesure du compactage intégrée à la machine** Mesure du compactage avec des technologies intégrées à la machine qui effectue le compactage.

**Mode essai** Réglage du compacteur qui optimise l'utilisation du système pour les applications de haute précision dans lesquelles la productivité de la machine n'est pas l'objectif principal.

**Mode Production** Réglage du compacteur qui optimise l'utilisation du système pour les applications à production élevée dans lesquelles la précision n'est pas l'objectif principal.

**Méthode de la valeur de mesure de compactage** Méthode d'indication de la rigidité du sol inventée par l'entreprise suisse Geodynamik et utilisée par Caterpillar.

**Méthode de mesure en fonction de l'énergie** Principe du Machine Drive Power (MDP), méthode propriétaire Caterpillar pour déterminer le compactage en mesurant l'énergie nécessaire pour passer sur le sol (résistance au roulement).

**Méthode des déplacements de force** Méthode permettant d'indiquer la rigidité du sol en utilisant les caractéristiques du cylindre et les mesures d'accélération du cylindre pour calculer son déplacement.

**Méthode des limites d'Atterberg** Ensemble de normes décrivant les 7 phases du passage des caractéristiques de l'état solide à liquide. Les phases les plus importantes sont la limite de plasticité et la limite de liquidité.

### - P -

**Passe** Nombre de passages d'un compacteur sur une zone du terrain. Parfois, une « passe » est définie comme un aller-retour, en passant deux fois sur une zone donnée, et parfois une passe signifie un seul passage d'un compacteur sur une zone donnée. Caterpillar définit une passe comme un seul passage sur une zone, en marche avant ou arrière.

**Pente** Inclinaison d'une surface.

**Perméabilité** Capacité d'un matériau à permettre le passage d'un gaz ou d'un liquide.

<b>Plasticité</b>	Propriété d'un sol à grains fins qui en permet des déformations importantes, en grande partie non réversibles, sans apparition de fissures et sans variation notable de volume.
<b>Pression statique</b>	Poids appliqué à l'énergie de compactage.
<b>- R -</b>	
<b>Remblai</b>	Tout remblayage dont le haut de la surface est plus haut que la surface adjacente.
<b>Remédiation</b>	Processus d'altération du sol par des moyens mécaniques ou chimiques afin d'en améliorer les propriétés techniques.
<b>Rigidité (sol)</b>	Capacité d'un matériau (sol) à résister à un fléchissement sous charge ; constitue un indicateur essentiel de capacité portante.
<b>Répartition des particules</b>	Voir répartition granulométrique.
<b>Répartition granulométrique</b>	Mesure de la plage et de la répartition des différentes tailles de particules dans le sol.
<b>Résistance au cisaillement</b>	Capacité des particules du sol à résister au glissement l'une sur l'autre quand une force de compactage est appliquée.
<b>Résistance au roulement</b>	Énergie nécessaire pour faire rouler une forme ronde sur un matériau.
<b>Résonance</b>	Convergence des fréquences de vibration de deux masses vibrantes.
<b>- S -</b>	
<b>Sable</b>	Particule minérale non cohésive de taille et de forme définie.
<b>Sol</b>	Matériau non consolidé composé de particules minérales pouvant contenir des substances organiques.
<b>Sols à grains fins</b>	Sols composés principalement de fines.
<b>Sol à gros grains</b>	Classification d'un sol comprenant des particules (grains) qui manquent de cohésion. Le sable et le gravier sont considérés comme des sols à gros grains. Les sols à gros grains sont classés en sols à granulométrie étalée ou à granulométrie médiocre, qui indique leur capacité à être compactés.
<b>Stabilisation du sol</b>	Processus d'optimisation de l'adéquation d'un sol à un projet de construction donné.
<b>Station</b>	Surface non standard définie par les ingénieurs et piquetée sur le chantier afin de contrôler la préparation par sections gérables.
<b>Système de navigation globale par satellite (GNSS)</b>	Terme générique décrivant les technologies de cartographie par satellite, comprenant le GPS et GLONASS.
<b>Système mondial de positionnement (GPS)</b>	Système de navigation radio mondial exploité par les USA, composé d'une constellation de 24 satellites et de leurs stations au sol.
<b>- T -</b>	
<b>Tassement</b>	Processus de réduction du niveau de la surface dû à la consolidation du matériau de remblayage.
<b>Teneur en eau</b>	Quantité de liquide (eau) par volume d'une masse.
<b>Texture</b>	Propriété définissant le frottement superficiel d'une particule du sol.



### - U -

**Uniformité** Maintien d'une homogénéité des matériaux et des applications.

### - V -

**Valeur de mesure de compactage (CMV)** Indication de la rigidité du sol calculée en mesurant les forces G à la fréquence de vibration du cylindre et à la première harmonique (2 fois la fréquence de vibration du cylindre).

**Valeur de mesure de résonance (RMV)** Indication du degré de découplage du cylindre.

**Vibration** Série de chocs à haute fréquence (1400-4000 chocs par minute) qui produit une succession rapide d'ondes de pression. Les vibrations produites par un compacteur peuvent casser les liaisons entre les particules d'un matériau en cours de compactage.

**Vide** Espace à l'intérieur d'un volume de matériau non occupé par un matériau minéral solide.











Warning labels on the blade:

- Warning symbol: A triangle with a black exclamation mark and a red border.
- Warning symbol: A triangle with a black exclamation mark and a red border.
- Warning symbol: A triangle with a black exclamation mark and a red border.
- Warning symbol: A triangle with a black exclamation mark and a red border.

STUBBLESS





**CAT** CS78B





**CATERPILLAR®**