 <p>Laboratoire Génie Civil</p>	<h2>FICHE AIDE MEMOIRE</h2>	<p>Réf. Fiche : ROUTE 02-02</p>
<p>Rédacteur : JPE Vérificateur : MC</p>	<h3>Essais PROCTOR</h3>	<p>Date : mars 2004</p>

TEXTE(S) DE REFERENCE :

- ✓ Norme NF P 94-093 - *A consulter nécessairement pour une information complète sur le sujet* -
- ✓ *Granulats, sols, ciments et bétons, Edition Educavivre*

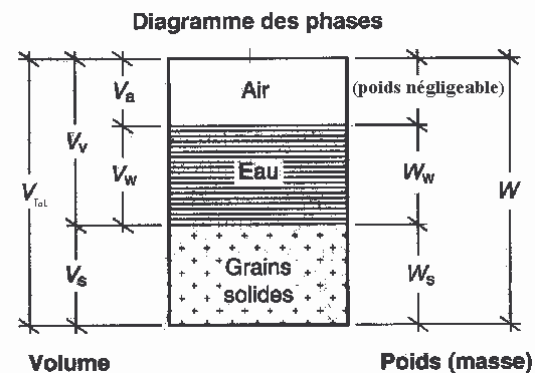
BUT DE L'ESSAI

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

DEFINITIONS

Rappel :

- V_{Tot} : Volume total de l'échantillon,
- V_a : Volume d'air contenu dans l'échantillon,
- V_w : Volume d'eau contenu dans l'échantillon,
- V_s : Volume des grains solides contenus dans l'échantillon,
- W_a : Poids de l'air contenu dans l'échantillon ($W_a \approx 0$),
- W_s : Poids des grains solide contenu dans l'échantillon,
- W_w : Poids de l'eau contenu dans l'échantillon,



Poids volumique d'un sol sec (notation γ_d) :
$$\gamma_d = \frac{W_s + W_a}{V_s + V_w + V_a} = \frac{W_s}{V}$$

Teneur en eau (notation ω) s'exprime en % :
$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Energie de compactage : $N \text{ (J/m}^3\text{)} = (\text{nombre de coups par couche}) \times (\text{Nombre de couches}) \times (\text{Masse de la dame}) \times (g) \times (\text{hauteur de chute de la dame}) / (\text{Volume utile du moule})$.

L'optimum Proctor : est la teneur en eau ω pour laquelle le sol atteint, pour une énergie de compactage donnée, un γ_d maximal.

Diagramme PROCTOR simple : C'est un diagramme qui comporte une courbe Proctor unique, donnant, pour une énergie de compactage donnée,

ω_{opt} et $\gamma_{d \text{ Max}}$.

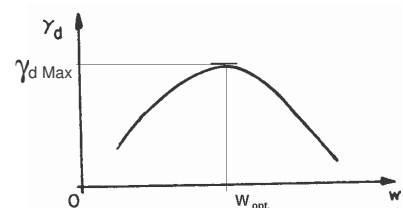
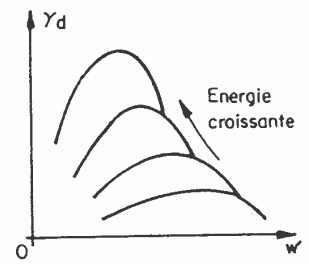


Diagramme PROCTOR complet : En faisant varier le nombre de coups par couche, on peut déterminer plusieurs courbes Proctor simple, correspondantes à diverses énergies de compactage.

Les courbes trouvées sont toutes tangentes asymptotiquement à une hyperbole équilatère, qui correspond à un sol ne contenant plus d'air du tout ($\Leftrightarrow S_r = 1$), dont l'équation est :

$$\gamma_d = (S \cdot \gamma_s) / (S + \omega \cdot \gamma_s / \gamma_w)$$



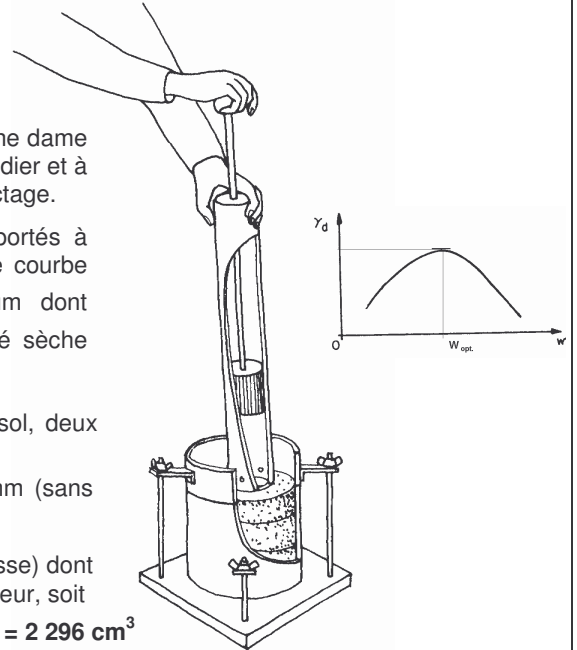
PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, un échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage.

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe ($\gamma_d; \omega$) ; on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche optimale.

Pour ces essais on peut utiliser, selon la finesse des grains du sol, deux types de moules :

- Le moule Proctor $\phi_{\text{moule intérieur}} = 101,6 \text{ mm} / H = 117 \text{ mm}$ (sans rehausse) $\Rightarrow V_{\text{moule proctor}} = 948 \text{ cm}^3$
- Le moule CBR $\phi_{\text{moule}} = 152 \text{ mm} / H = 152 \text{ mm}$ (sans rehausse) dont disque d'espacement de 25,4 mm d'épaisseur, soit une hauteur $H_{\text{utile}} = 126,6 \text{ mm} \Rightarrow V_{\text{moule CBR}} = 2\,296 \text{ cm}^3$



Avec chacun de ces moules, on peut effectuer deux types d'essai (choix par rapport à l'énergie de compactage) :

- L'essai PROCTOR NORMAL,
- L'essai PROCTOR MODIFIÉ.

Le choix de l'intensité de compactage est fait en fonction de la surcharge que va subir l'ouvrage au cours de sa durée de vie :

- Essai Proctor normal : Résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ou peu chargé,
- Essai Proctor modifié : Forte résistance souhaitée, du type chaussée autoroutière.

Le tableau ci-dessous résume les conditions de chaque essai selon le moule retenu (norme NF P 94-093) :

	Masse de la dame (Kg)	Hauteur de chute (cm)	Nombre de coups par couche	Nombre de couches	Energie de compactage Kj/m ³	
Essai Proctor	Normal	2,490	30,50	25 (moule Proctor)	3	587
				55 (moule CBR)	3	533
	Modifié	4,540	45,70	25 (moule Proctor)	5	2 680
				55 (moule CBR)	5	2 435

A noter : Les Canadien retiennent les conditions suivantes :

Essais	Masse du marteau (Kg)	Hauteur de chute du marteau (cm)	Nombre de couches	Volume du moule (cm ³)	Nombre de coups par couche	Energie de compactage (KJ/m ³)
Proctor Normal (Norme NQ 2501-250)	2,49	30,5	3	944 2 124	25 56	592 589
Proctor Modifié (Norme NQ 2501-255)	4,54	45,7	5	944 2 124	25 56	2 695 2 683

(en gras les différences avec la norme Française)

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

- Moule CBR (éventuellement Proctor),
- Dame Proctor normal ou modifié,
- Règle à araser,
- Disque d'espacement,
- Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau,
- Tamis 5 et 20 mm (contrôle et écrêtage le cas échéant de l'échantillon),
- Truelle, spatule, pinceau, etc...
- Eprouvette graduée 150 ml environ,
- Petits récipients (mesures des teneurs en eau),
- Balance portée 20 kg, précision ± 5 g,
- Balance de précision 200 g, précision $\pm 0,1$ g,
- Etuve 105°C ± 5 ° C ,
- Burette à huile.

MODE OPERATOIRE

a/ Préparation des échantillons pour essais :

Quantités à prélever :

La réalisation de la courbe nécessitera au moins 5 essais (1 point (ω ; γ_d) par essai).
6 essais sont préférables. Pour 6 points de mesure, on prélèvera :

- Moule PROCTOR : 15 kg,
- Moule C.B.R. : 33 kg.

Contrôle de l'échantillon pour la faisabilité de l'essai :

Si $D \geq 20$ mm, il faut tamiser à 20 mm le sol et peser le refus :

- Si le refus est $\leq 25\%$, l'essai doit être réalisé dans le moule CBR, mais sans intégrer le refus (échantillon écrêté à 20 mm),
- Si le refus est $> 25\%$, l'essai PROCTOR ne doit pas être réalisé (compactage hasardeux).

Préparation de l'échantillon :

Ecraser les mottes à la main ou au malaxeur, mais pas les éléments pierreux, et homogénéiser soigneusement le matériau (sa teneur en eau doit être homogène).

Sécher le matériau à l'air ou à l'étuve (3 à 5 heure à 60°C), pour faciliter le tamisage et pour débiter l'essai avec une teneur en eau inférieur à la teneur en eau optimale Proctor (l'essai est fait à teneur en eau croissante).

Ecrêter à 20 mm l'échantillon (le cas échéant).

Détermination de la teneur en eau de départ :

L'expérience montre qu'il est bien d'avoir 2% de différence de teneur en eau environ entre chaque point (courbe harmonieuse). 4% est un maximum.

Il est souhaitable de commencer les essais à une teneur en eau ω qui se situe environ à 4 ou 5% au-dessous de ω_{opt} . (ω_{opt} . en générale entre 10 et 14 %).

b/ Préparation du matériel

Choix du moule :

Il dépend de la grosseur D des gros grains du sol :

- Si $D \leq 5$ mm (et seulement dans ce cas), le moule Proctor est autorisé, mais le moule CBR est conseillé,
- Si $5 < D \leq 20$ mm, utiliser le moule CBR (sol conserver intact avec tous ses constituants),
- Si $D > 20$ mm, mais refus ≤ 25 %, l'essai se fait dans le moule C.B.R., (sol écrêté à 20 mm),

Rappel : D > 20 mm, mais refus > 25 %, l'essai Proctor ne peut être fait !

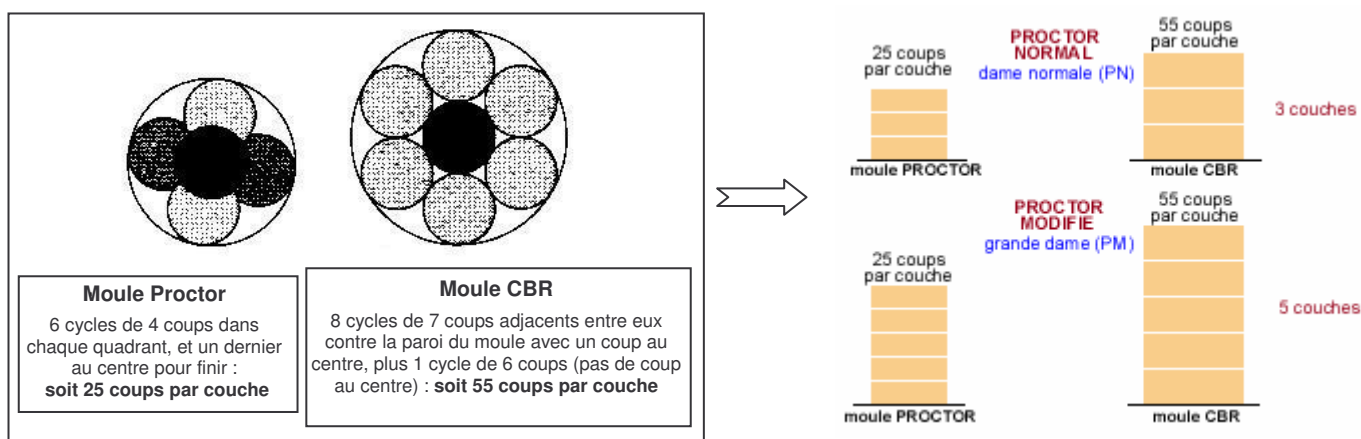
c/ Exécution de l'essai

Avant –propos :

Pour l'essai PROCTOR NORMAL, le remplissage est fait en 3 couches.

Pour l'essai PROCTOR MODIFIÉ, le remplissage est fait en 5 couches.

L'ensemble de la surface doit être compactée pour chaque couche comme suit :



Exécution de l'essai

1. Assembler moule + embase + disque d'espacement (si moule C.B.R.) + disque de papier au fond du moule (facilite le démoulage) ; puis :
 - Peser l'ensemble : soit P_1 ,
 - Adapter la rehausse.
2. Introduire la 1ère couche et la compacter. Placer le moule sur un socle en béton d'au moins 100 kg , ou sur un plancher en béton de 25 cm d'épaisseur, pour que l'ensemble de l'énergie appliquée le soit à l'échantillon. Astuces : faire des rayures sur la surface compactée (améliore la liaison avec la couche suivante),
3. Recommencer l'opération pour chaque couche (3 pour énergie de compactage Normal ; 5 pour Modifiée). La quantité de matériau à utiliser, pour chaque couche, est approximativement :

MOULE	ESSAI PROCTOR NORMAL	ESSAI PROCTOR MODIFIÉ
PROCTOR	400 g	650 g
C.B.R.	1 050 g	1 700 g

4. Après compactage de la dernière couche, enlever la rehausse. Le sol compacté doit dépasser du moule de 1 cm environ. Sinon, recommencer l'essai,
5. Araser soigneusement à partir du centre ; on veillera, au cours de l'arasement à ne pas créer de trous sur la surface arasé,
6. Peser l'ensemble juste arasé : soit P_2 ,

7. Oter l'embase (et disque d'espacement si nécessaire) et prélever 2 prises sur l'échantillon, l'une en haut et l'autre en bas ; en déterminer la teneur en eau ω ; on prendra la moyenne des deux valeurs obtenues,
8. Augmenter de 2% la teneur en eau ω de votre échantillon de départ et recommencer 5 à 6 fois l'essai, après avoir à chaque fois bien nettoyer votre moule.

* A noter que pour le moule :

- Moule PROCTOR : 2% \Leftrightarrow environ 50 g d'eau pour 2 500 g de sol,
- Moule C.B.R. : 2% \Leftrightarrow environ 110 g d'eau pour 5 500 g de sol.

EXPRESSION DES RESULTATS

Tracer la courbe $\gamma_d = f(\omega)$, avec pour points de la courbe les coordonnées suivantes pour chaque point :

- En abscisse : ω , teneur en eau (voir article 8 ci-avant),
- En ordonnée γ_d qui s'exprime :

$$\gamma_d = \frac{(P_2 - P_1)}{(1 + \omega) \cdot V_{\text{moule}}}$$

En cas d'écrêtage à 20 cm, faire les corrections suivantes :

- * déterminer $g = (\text{Poids des gros éléments (} D > 20 \text{ mm)}) / (\text{Poids total (éléments fins et gros)})$,
- * $\omega_{\text{corrigée}} = \omega_{\text{mesurée}} * (1 - g)$
- * $\gamma_d \text{ corrigée} = \gamma_d \text{ mesurée} * 1 / K$ avec $K = 1 - g * (\gamma_s - \gamma_d \text{ mesurée}) / \gamma_d \text{ mesurée}$.

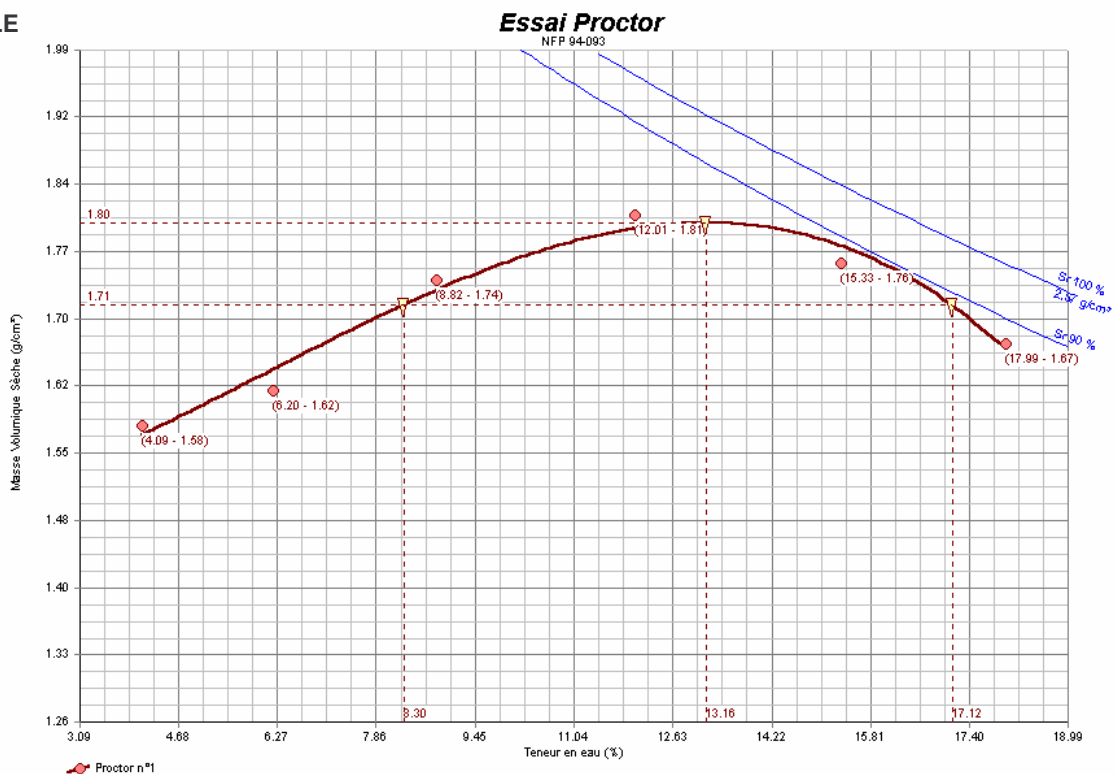
Les coordonnées de l'optimum Proctor se déduisent de la courbe. ; elles s'expriment :

- Pour $\gamma_{d \text{ opt}}$ en KN/m^3 avec 1 décimale,
- Pour ω_{opt} en % avec 1 décimale.

On portera le résultat sur le modèle :

Compactage Proctor (normal et modifié)	GC-Géot	F
----------------------------------------	---------	---

EXEMPLE



L'optimum Proctor est ici obtenu pour $\omega_{\text{opt}} = 13,2 \%$, et $\gamma_{d \text{ opt}} = 18,0 \text{ KN/m}^3$

Note n° : 1
Annexe : 2
Série : 02
Fiche n° : 02

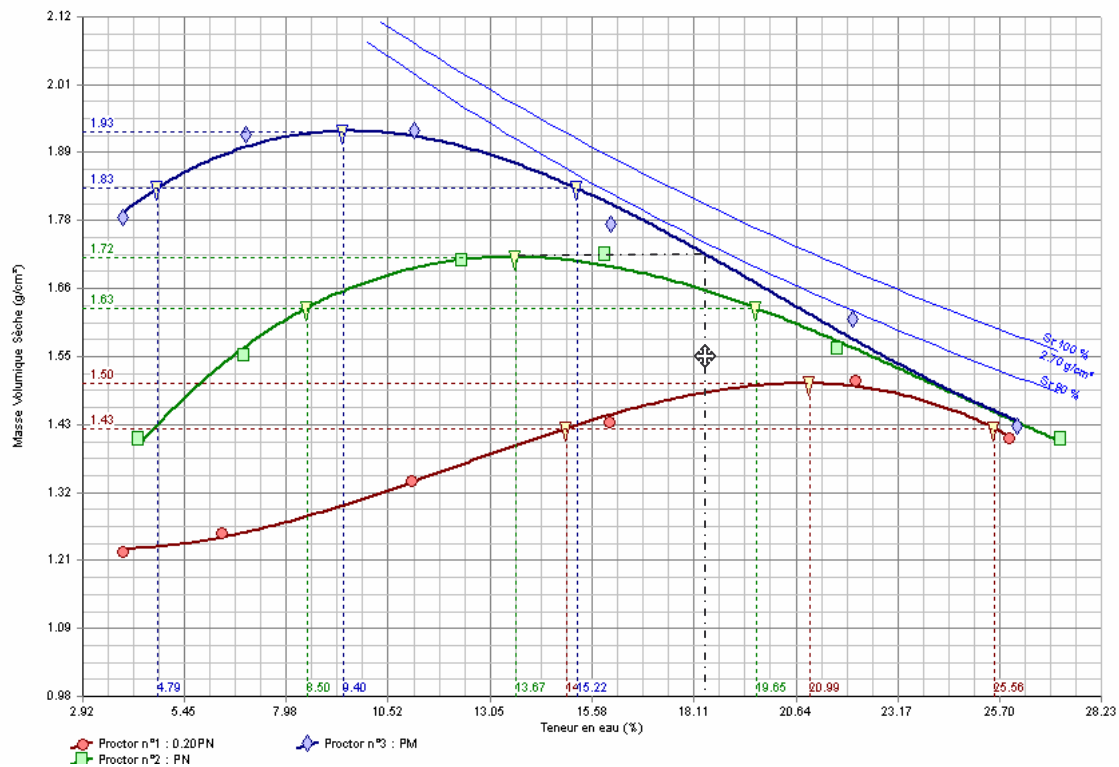
Statut : **Projet**
Révision de la fiche : **0**

Page : 5/7

EXPLOITATION DES RESULTATS

Il existe deux types de diagramme Proctor (rappel):

- Diagramme Proctor simple (cf. exemple ci-avant),
- Diagramme Proctor complet, comme ci-après :



A noter :

1. Ce diagramme Proctor complet, réalisé avec moule CBR, est ici donné pour 3 valeurs d'énergie N de compactage :

Diagramme Proctor du bas : (courbe rouge/point rond)	0,20.PN \Leftrightarrow 20% Energie Normal	\Leftrightarrow 11 coups/couche (3 couches) + dame normale	N = 107 KJ/m ³
Diagramme Proctor du milieu : (courbe verte/point carré)	PN \Leftrightarrow Energie Normal	\Leftrightarrow 55 coups/couche (3 couches) + dame normale	N = 533 KJ/m ³
Diagramme Proctor du haut : (courbe bleu/point losange)	PM \Leftrightarrow Energie Modifié	\Leftrightarrow 55 coups/couche (5 couches) + dame Modifiée	N = 2 435 KJ/m ³

2. Ces diverses courbes ne se coupent pas. Leur maximum est situé sur une courbe à pente négative. Les plus petites valeurs de ω_{opt} correspondant aux plus grandes de $\gamma_{d, opt}$ et aux plus fortes intensités de compactage,
3. La réalisation de ce diagramme complet est longue. Elle doit être faite que si le chantier est important, en raison de l'amélioration des conditions de travail qu'elle apporte sur chantier.

Exemple d'utilisation du diagramme complet – Notion de planche d'essai:

S'il est nécessaire d'obtenir après compactage une masse volumique apparente sèche γ_{d0} , correspondant, ici, à la courbe d'énergie de compactage N_{PN} , et si le sol arrive au chantier à une teneur en eau de ω_i ($\omega_i \approx 18,3 > \omega_{opt}$ pour énergie PN, mais $\gamma_i = 1,55 < \gamma_{d0}$). Il suffira alors de compacter avec une intensité correspondante à la courbe d'énergie de compactage N_{PM} . Car pour cette courbe d'énergie de compactage on arrivera en effet à $\gamma_d(\omega_i) = \gamma_{d0}$; puis arrivé à γ_{d0} , il suffira de laisser sécher le sol.

Cette utilisation possible du diagramme complet conduit à faire sur chantier des essais avec l'engin de compactage utilisé pour la mise en œuvre des terres. On détermine ainsi le nombre de passages de l'engin qui correspond à chacune des valeurs d'énergie de compactage N_1, N_2, N_3, \dots pour une même valeur de γ_d . Il n'y aura plus alors à l'arrivée du sol sur le chantier, qu'à mesurer ω et en déduire N par

le diagramme complet (γ_{d0} imposé pour un chantier donné !) c'est-à-dire, donc, le nombre de passes à effectuer avec l'engin de compactage pour cette teneur en eau.