

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 90 (1964)
Heft: 2: Autoroute Genève-Lausanne, fascicule no 3

Artikel: Utilisation du nucléodensimètre pour le contrôle de la compacité des remblais
Autor: Recordon, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-66962>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 04.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

UTILISATION DU NUCLÉODENSIMÈTRE POUR LE CONTRÔLE DE LA COMPACTITÉ DES REMBLAIS

par E. RECORDON, ingénieur, chef de travaux au Laboratoire de géotechnique de l'EPUL

I. La teneur en eau optimum de compactage des terres

Le compactage des terres ayant pris une importance très grande depuis que se sont ouverts les chantiers de construction des autoroutes, il nous paraît nécessaire de rappeler, en guise d'introduction, les principes qui sont à la base de l'étude du compactage des matériaux de remblai. Ces notions de base seront d'ailleurs utilisées plus loin pour la présentation des résultats des essais de contrôle exécutés à l'aide du nucléodensimètre dans le cadre des chantiers de l'autoroute Genève-Lausanne ; il est donc indispensable de bien les définir.

La compacité des terres dépend d'une part de l'énergie de compactage utilisée (nombre de passages et poids des engins) et d'autre part de la teneur en eau. Si l'on utilise la même énergie E kgcm/cm³ pour compacter plusieurs fois successivement le même matériau dont on augmente chaque fois la teneur en eau W %, on constate que le poids spécifique apparent γ kg/dm³ commence par augmenter avec la teneur en eau ; puis qu'à partir d'une teneur en eau critique, que l'on appelle la teneur en eau optimum de compactage, le poids spécifique apparent diminue. Si l'on trace graphiquement les résultats de cet essai de compactage, ou essai de Proctor exécuté couramment en laboratoire, en reportant en abscisse la teneur en eau et en ordonnée le poids spécifique apparent sec des terres, on obtient une courbe comportant un maximum du poids spécifique qui correspond à la teneur en eau optimum. La figure 1 montre l'aspect de trois de ces courbes obtenues par trois essais de compactage du même matériau à l'aide de trois énergies de compactage différentes.

Si la teneur en eau est inférieure à l'optimum, le poids spécifique augmente lorsque la teneur en eau augmente, car l'eau agit comme un lubrifiant qui permet aux grains composant le sol de glisser les uns sur les autres et de mieux remplir les vides. Au contraire, si la teneur en eau est supérieure à l'optimum, l'eau remplit presque complètement les vides, les grains sont alors noyés dans l'eau et s'écartent les uns des autres à mesure que la quantité d'eau augmente et le poids spécifique apparent du matériau diminue. Si la teneur en eau devient très grande, le poids spécifique apparent sec γ_d tend vers le zéro, alors que le poids spécifique apparent humide tend vers 1¹.

Chaque point du graphique de la figure 1 est défini par les valeurs correspondantes du poids spécifique apparent sec et de la teneur en eau du sol compacté. A ces deux valeurs correspond, en chaque point du graphique, la valeur du pourcentage d'air (en volume) qui subsiste dans les pores du sol. Ce pourcentage volumé-

trique d'air V_a est lié au poids spécifique apparent sec et à la teneur en eau par la relation :

$$\gamma_d = \left(1 - \frac{V_a}{100}\right) \frac{\gamma_s \gamma_w}{\frac{W}{100} \gamma_s + \gamma_w}$$

pour $\gamma_s = 2,70$ et $\gamma_w = 1,00$

$$\gamma_d = \frac{1 - V_a/100}{\frac{W}{100} + 0,37}$$

Dans cette formule :

γ_s : poids spécifique des grains

γ_w : poids spécifique de l'eau

γ_d : poids spécifique apparent sec du sol

Les courbes d'égal pourcentage d'air peuvent être calculées à l'aide de cette formule. Celle qui correspond à $V_a = 0$ est la courbe de saturation. Elle est asymptotique aux courbes de Proctor pour les grandes valeurs de la teneur en eau.

Les essais de Proctor exécutés en laboratoire permettent de déterminer le poids spécifique apparent sec maximum que l'on pourra atteindre sur le chantier ; celui-ci est généralement voisin, pour les remblais, du poids spécifique apparent sec que l'on atteint par l'essai de compactage exécuté avec une énergie de 6 kgcm/cm³ (essai AASHO standard prescrit par la norme SNV 70 330 de l'Union suisse des professionnels de la route). Ces essais permettent également de déterminer la teneur en eau que devront avoir les terres au moment de leur mise en place pour que l'on puisse atteindre la compacité voulue.

Il résulte de ce qui précède que :

— Si la teneur en eau des terres sur le chantier est supérieure à l'optimum, le poids spécifique apparent sera inférieur au maximum de l'essai de Proctor, bien que les terres soient presque saturées (2 à 3 % de volume d'air).

— Si la teneur en eau est inférieure à l'optimum, le poids spécifique apparent peut avoir la même valeur que dans le cas précédent, bien que le volume d'air soit beaucoup plus important. Par exemple, la figure 1 montre que pour l'essai exécuté avec l'énergie de 6 kgcm/cm³, si la teneur en eau est de 20 %, le poids spécifique apparent sec est de 1,70 kg/dm³ environ et le volume d'air de 3 % environ alors que si la teneur en eau est de 11,5 %, le poids spécifique apparent sec est aussi de 1,70 kg/dm³, mais le volume d'air est alors de 17 % environ.

En pratique, il convient donc de mettre tout en œuvre pour qu'au moment du compactage d'un remblai la teneur en eau soit voisine de la teneur en eau optimum donnée par l'essai de laboratoire exécuté avec l'énergie de 6 kgcm/cm³.

¹ Le poids spécifique apparent sec γ_d caractérise la compacité ; il se calcule à partir du poids spécifique apparent humide γ et de la teneur en eau W de la manière suivante :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{W}{100}}$$

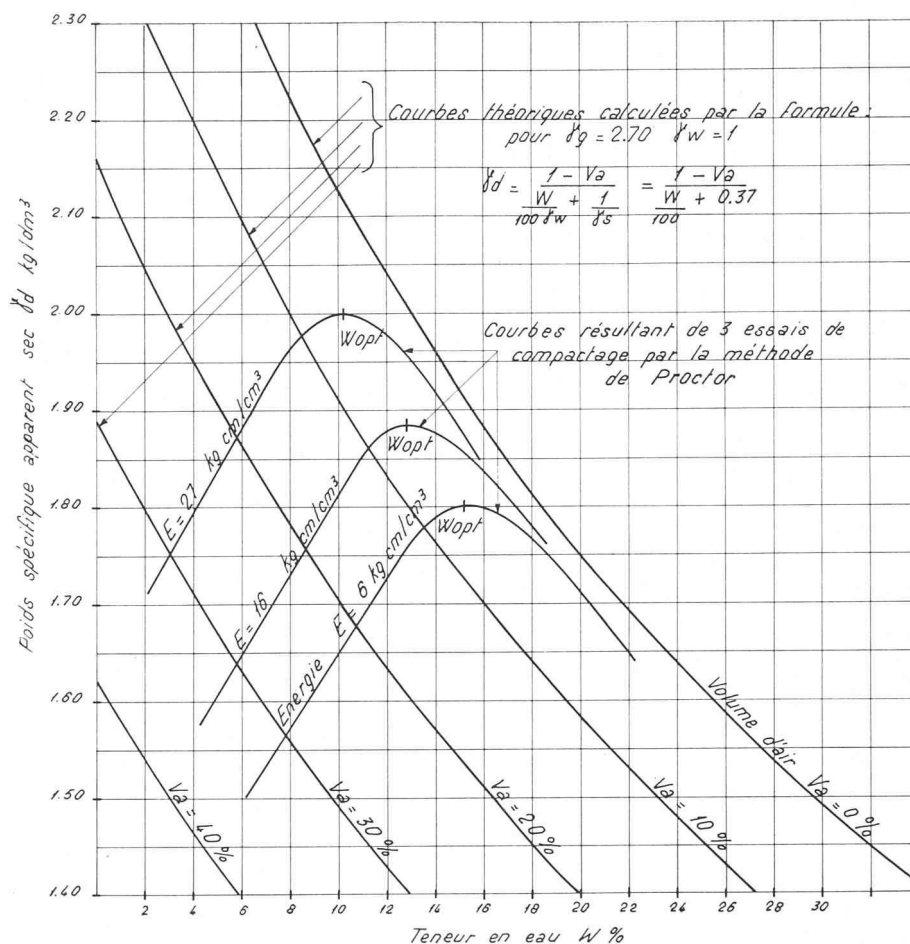


Fig. 1. — Résultats de trois essais de compactage par la méthode de Proctor.

II. Exigences concernant le compactage des terres

a) Prescriptions des normes suisses

L'Union suisse des professionnels de la route a fixé de la manière suivante, dans la norme SNV 40 372, les valeurs minimums que doit atteindre le poids spécifique apparent des terres compactées :

— Partie inférieure du remblai comprise entre le terrain naturel, assise du remblai et le niveau situé à 1 m au-dessous de la « forme » : 95 % du poids spécifique apparent sec maximum donné par l'essai AASHO standard ($E = 6 \text{ kgcm/cm}^3$).

— Partie supérieure du remblai comprise entre la « forme » du remblai et le niveau situé à 1 m plus bas : 98 % de la même valeur.

Cette même norme donne, à titre indicatif, les valeurs minimums admissibles suivantes :

Type de sol	Graviers et sables propres. Graviers sableux et sables graveleux	Graviers et sables, limoneux et argileux	Limon et limons argileux, éventuellement sableux ou graveleux
Classe P R A	A1 A3	A2	A4 A5 A6
Poids spécifique apparent sec minimum kg/dm ³	2,0	1,8	1,6
Poids spécifique apparent humide minimum kg/dm ³	2,2	2,1	2,0

Les argiles à limite de liquidité élevée (classe A7) ainsi que les argiles et limons contenant des matières organiques et les tourbes ne doivent pas être utilisées pour la construction de remblais.

La norme ne fixe aucune exigence en ce qui concerne la teneur en eau. C'est donc au constructeur à faire le nécessaire pour que la teneur en eau soit telle que l'on puisse atteindre la valeur minimum exigée du poids spécifique apparent sec.

Ce qui précède montre que le seul moyen de contrôler le travail de mise en place d'un remblai consiste à mesurer la valeur du poids spécifique apparent humide des terres et leur teneur en eau pour pouvoir calculer le poids spécifique apparent sec et le comparer à la valeur minimum exigée par la norme SNV 40 372.

b) Prescriptions anglaises

Il est intéressant de savoir que les Anglais ont adopté un autre critère pour fixer la qualité d'un travail de compactage. Ils exigent simplement que, quel que soit le sol utilisé, le pourcentage d'air soit inférieur à 10 %. Pour que le travail de compactage soit possible, il faut toutefois que la teneur en eau soit en outre inférieure à une valeur limite qui pourrait être fixée à 16 % environ pour les conditions de la Suisse.

Le fait de définir les exigences de cette manière a comme avantage de supprimer la nécessité d'exécuter des essais de compactage en laboratoire.

Les valeurs du poids spécifique apparent sec et de la teneur en eau définissent, sur le graphique de la figure 1,

un point qui doit se situer entre les deux courbes $V_a = 0$ et $V_a = 10\%$. Le fait de limiter la teneur en eau à 16% par exemple a pour conséquence d'éviter que la valeur du poids spécifique apparent sec puisse être inférieure à $1,70 \text{ kg/dm}^3$ et par conséquent que celle du poids spécifique apparent humide soit inférieure à $1,97 \text{ kg/dm}^3$.

III. Méthodes et appareillages de contrôle

La détermination de la teneur en eau des matériaux compactés sur le chantier peut être faite par l'une des méthodes suivantes :

— Prélèvement d'un échantillon de sol dont on mesure le poids avant séchage et après séchage à 110°C jusqu'à poids constant. C'est la méthode traditionnelle décrite à la norme SNV 70 340.

— Prélèvement d'un échantillon de sol dont la teneur en eau est mesurée sur le chantier de la façon suivante : l'échan-

tillon, dont le poids ne dépasse pas une dizaine de grammes, est introduit avec une capsule en verre contenant du carbure de calcium dans une bouteille en acier munie d'un manomètre. La bouteille étant fermée, elle est agitée jusqu'à rupture de la capsule de carbure de calcium. La réaction entre le carbure de calcium et l'eau s'accompagne d'un dégagement de gaz qui fait monter la pression dans la bouteille. Cette pression est d'autant plus grande que la teneur en eau est élevée. Une table de chiffres permet de convertir les pressions mesurées en teneur en eau. Cette méthode n'est applicable qu'à des sols fins, puisque les échantillons doivent être de petites dimensions.

— Mesure de la teneur en eau à l'aide du « nucléohumidimètre » (voir plus loin).

La détermination sur place du poids spécifique apparent humide des matériaux compactés peut être faite par l'une des méthodes suivantes :

— Prélèvement d'échantillons *intacts* à l'aide d'un tube carottier. Mesure du poids de la carotte et mesure géométrique de son volume, ou mesure de ce volume par pesage de la carotte immergée dans l'eau mais préalablement enduite de paraffine.

— Prélèvement d'un échantillon remanié dans un trou creusé avec soin, de manière à lui donner une forme aussi géométrique que possible. Détermination du poids de toute la matière extraite du trou et mesure du volume par remplissage du trou à l'aide d'un sable calibré dont le poids spécifique apparent est connu ou à l'aide d'eau, les parois du trou étant dans ce dernier cas recouvertes d'une membrane mince de caoutchouc. Ces deux méthodes sont décrites dans les normes SNV 70 335 et 70 337 (méthode du sable et méthode du ballon).

— Mesure du poids spécifique apparent humide à l'aide du nucléodensimètre (voir plus loin).

IV. La méthode du nucléodensimètre

Cette méthode consiste à placer à la surface du sol un appareil muni d'une source radio-active de rayons γ et d'un détecteur de particules protégés l'un et l'autre par des blindages tels que toutes les radiations provenant de la source pénètrent dans le sol et que seules les radiations provenant du sol atteignent le détecteur. La figure 2 donne schématiquement la coupe du nucléodensimètre et du nucléohumidimètre

appartenant au Laboratoire de géotechnique de l'EPUL et utilisés sur les chantiers de l'autoroute Genève-Lausanne. Cet appareillage a été construit par la fabrique Nuclear de Chicago. La figure 3 en montre l'aspect.

1. Propagation des rayons γ

Pour comprendre le fonctionnement de ce dispositif, il faut savoir que les photons qui constituent le rayonnement γ se propageraient de façon rectiligne, et avec la vitesse de la lumière, s'ils étaient émis dans le vide. Mais en traversant la matière, ils subissent deux sortes d'interactions, la diffusion et l'absorption. Ces deux effets sont l'un et l'autre d'autant plus intenses que

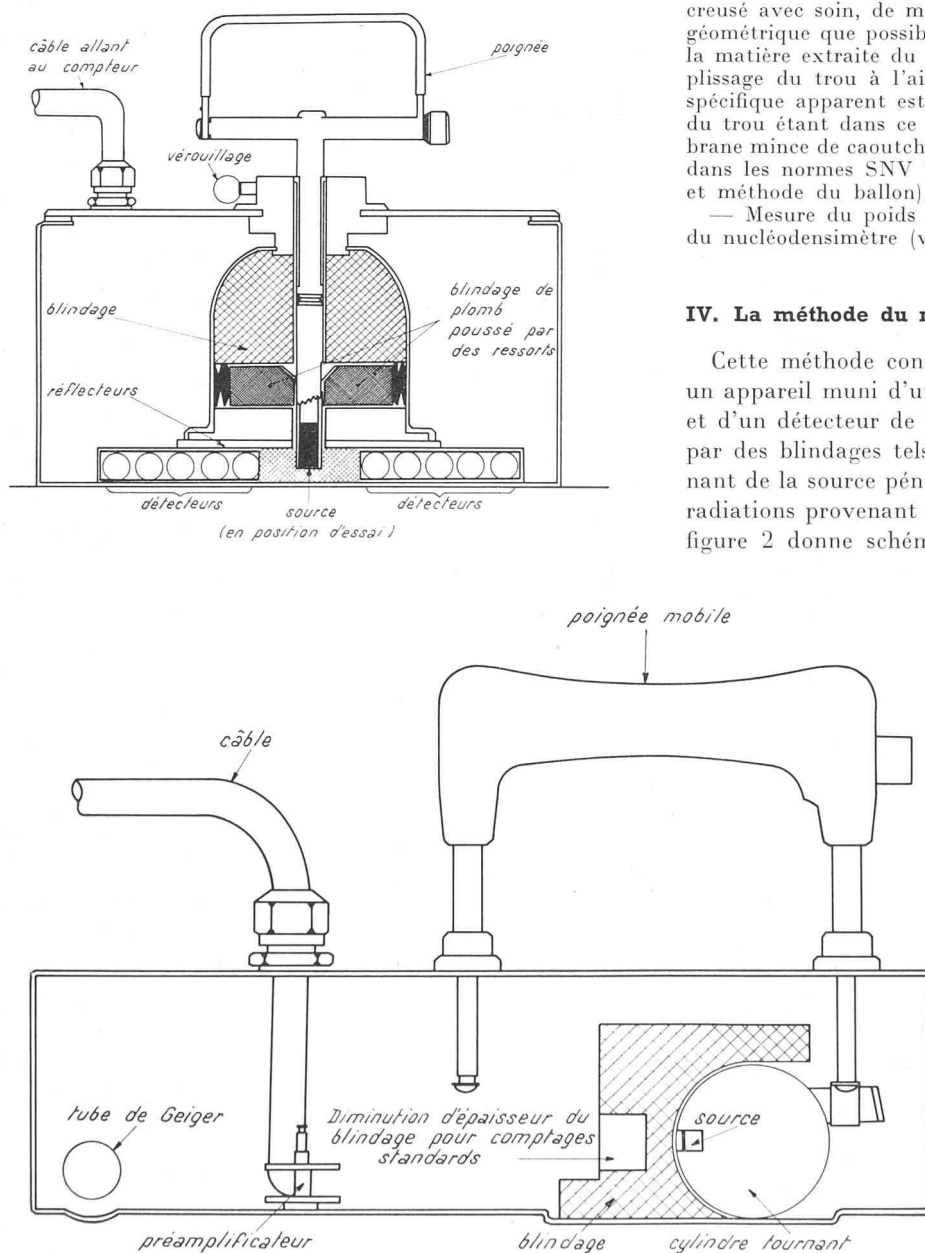


Fig. 2. — Coupes schématiques du nucléohumidimètre (source en position de fonctionnement), en haut, et du nucléodensimètre (source en position de transport), en bas.

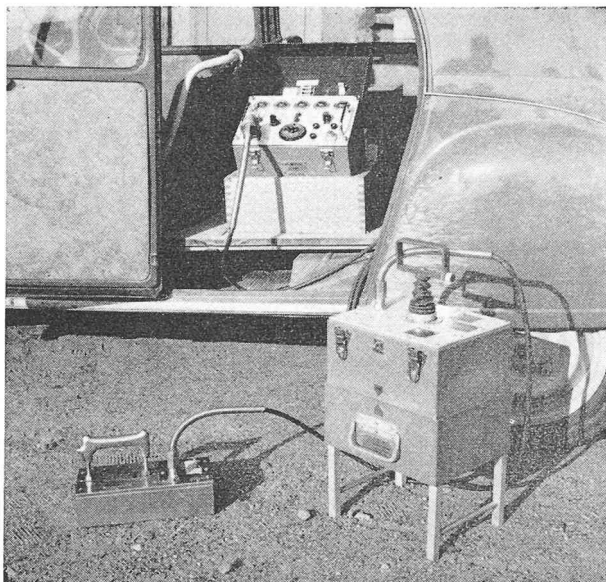


Fig. 3. — Le nucléodensimètre (à gauche, en bas), le nucléohumidimètre (à droite, en bas) et le compteur d'impulsions (en haut).

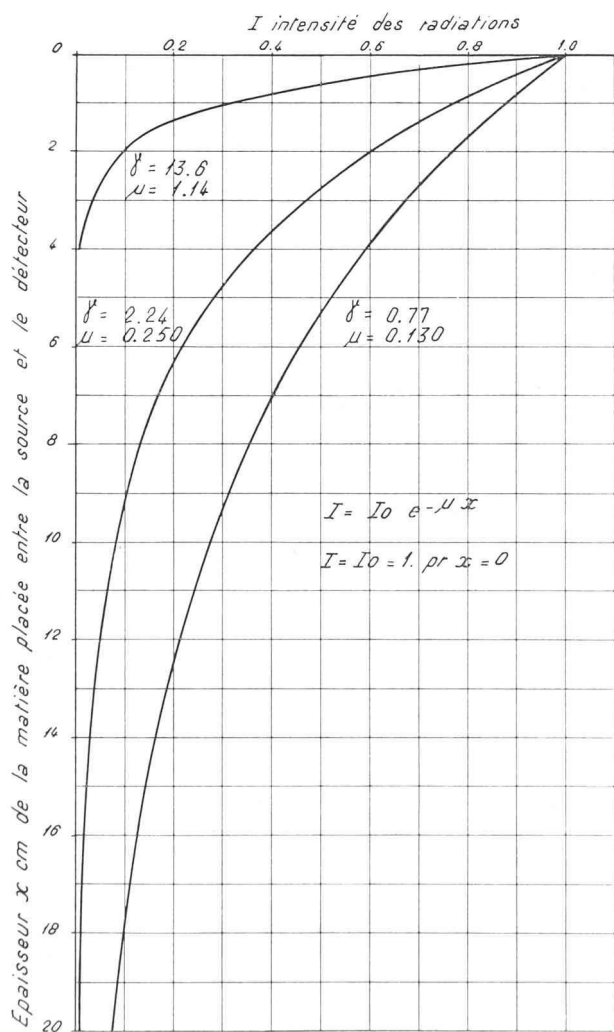


Fig. 4. — Intensité des radiations en fonction de l'épaisseur d'un corps placé entre la source et le détecteur.

la densité de la matière traversée est plus grande. La diffusion, ou effet Compton, est le choc d'un photon et d'un électron, d'où résulte une accélération de l'électron et la réémission du photon dans une *autre direction* que la direction primitive ; c'est cette *dévi*ation du photon qui nous intéresse ici. L'absorption est une *annihilation* du photon, compensée soit par l'accélération d'un électron, soit par la création d'une *paire d'électrons*, l'un positif, l'autre négatif.

D'une façon plus précise, si l'on réalise un montage expérimental dans lequel un faisceau de photons est émis par une source, en direction d'un compteur, et qu'on interpose entre la source et le compteur une certaine épaisseur de matière, on comptera moins de particules par minute que si le compteur est directement exposé au rayonnement de la source. Cette atténuation est l'effet combiné de l'absorption et de la diffusion ; la proportion des photons absorbés ou déviés par rapport à ceux qui sont émis croît avec la « quantité de matière traversée », c'est-à-dire le produit de l'épaisseur x par la densité γ . Il en résulte (par une intégration facile) que l'intensité détectée I s'exprime en fonction de l'intensité émise I_0 par la loi exponentielle :

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \gamma x}$$

où μ est le *coefficient d'absorption*.

La figure 4 montre de quelle manière varie l'intensité des radiations détectées en fonction de la densité et de l'épaisseur de la matière interposée entre la source et le compteur.

Revenons au nucléodensimètre, où la disposition géométrique de la source, du compteur et de la matière absorbante et diffusante est beaucoup plus complexe que dans l'exemple précédent. Un raisonnement qualitatif nous permettra cependant de comprendre comment le rapport entre le nombre des particules détectées et le nombre des particules émises doit dépendre de la densité de la matière sur laquelle est posé l'appareil. Si celui-ci était placé dans le vide, ou à la surface d'une matière de très faible densité, aucun photon n'atteindrait le détecteur. Si la densité est un peu plus forte, la diffusion dévie quelques photons dans le détecteur, et l'on compte un certain nombre d'impulsions par minute. L'intensité de ce rayonnement diffusé augmentera tout d'abord avec la densité de la matière, mais lorsque celle-ci atteindra une certaine valeur, l'absorption se fera sentir à son tour, et l'on observera une *diminution* du rayonnement détecté ; pour une densité très grande, on ne compterait donc plus qu'un très petit nombre de particules par minute.

On s'explique ainsi l'allure de la figure 5, qui montre l'intensité du rayonnement détecté en fonction de la densité de la matière. La position du maximum de la courbe dépend de la disposition géométrique de l'ensemble de l'appareil, surtout de la distance entre la source et le compteur ; on a fait en sorte que le maximum corresponde à peu près à une densité égale à 1, ce qui fait correspondre aux matériaux usuels la partie la plus utilisable de la courbe.

D'après ce qui a été expliqué, on se rend compte que plus la densité est faible et plus le volume de matière impliqué dans le phénomène autour de l'appareil est étendu ; cette remarque est importante pour apprécier

les causes d'erreur dues au fait qu'on n'a jamais affaire pratiquement à un massif de matière semi-infini.

2. Caractéristiques du nucléodensimètre

La source est constituée de césium 137 émettant 3 millicuries de rayon gamma. Sa période est de 33 ans, ce qui équivaut à une perte d'activité de 2 % par année.

Le détecteur est un tube de Geiger-Muller à cathode de bismuth.

La source est placée dans un blindage mobile actionné par la poignée servant au transport de l'appareil. Lorsque l'on met en place l'appareil, on doit abaisser la poignée, ce qui déplace le blindage et la source.

Les radiations peuvent alors pénétrer directement dans le sol. Dès que l'on soulève la poignée pour prendre l'appareil, le blindage tourne, entraînant la source qui vient se placer à l'intérieur d'un blindage fixe.

Dimensions de l'appareil : longueur : 30 cm
 largeur : 20 cm
 hauteur : 10 cm
 poids : 15 kg

3. Caractéristiques du nucléohumidimètre

Dans cet appareil, la source radio-active est constituée de radium-béryllium (4,5 millicuries) émettant des neutrons accélérés. La période de cette source est de 1620 ans. En passant dans le sol, les neutrons sont ralentis par toute présence d'hydrogène.

Le détecteur est constitué de dix tubes montés en parallèle et disposés autour de la source. Ces tubes sont particulièrement sensibles aux neutrons ralentis.

La source et les détecteurs sont protégés par un blindage en plomb et un dispositif analogue à celui du nucléodensimètre place la source derrière un blindage lorsque l'on soulève l'appareil par sa poignée.

Dimensions de l'appareil : longueur : 32 cm
 largeur : 26 cm
 hauteur : 32 cm
 poids : 19,4 kg

4. Caractéristiques du compteur d'impulsions

L'un ou l'autre des deux appareils détecteurs décrits ci-dessus peut être relié au compteur d'impulsions par

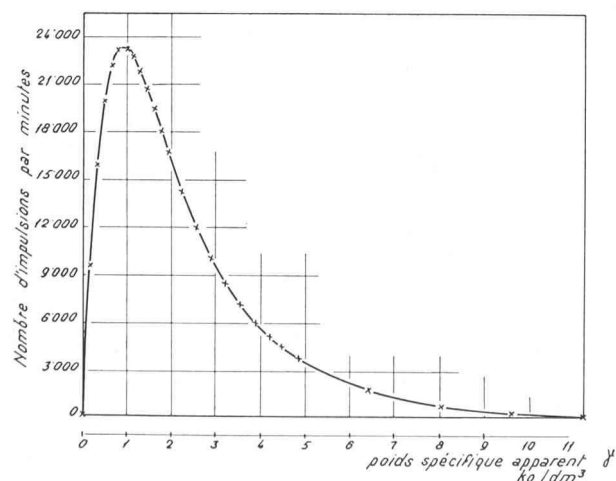


Fig. 5. — Intensité des radiations parvenant au détecteur du nucléodensimètre en fonction du poids spécifique apparent du matériau ausculté.

un câble de 4,5 m de longueur environ, partant du détecteur. Cet appareil enregistre le nombre d'impulsions qui parviennent au détecteur. Il comprend les éléments principaux suivants :

- Un groupe de cinq tubes à décades dénombrant le nombre d'impulsions jusqu'à 99 999 au maximum.
- Un chronoscope mesurant la durée du comptage et le stoppant automatiquement à la fin de la période. Cette durée peut être réglée entre 1 et 5 minutes.
- Les circuits électroniques, alimentés par un accumulateur fournissant un courant continu à haute tension de 700 à 1500 V, pour faire fonctionner le détecteur raccordé.

Dimensions de l'appareil : longueur : 33 cm
 largeur : 24 cm
 hauteur : 30 cm
 poids : 14,6 kg

V. Exécution des essais et précision des mesures

Les essais, tels qu'ils ont été exécutés au début par le Laboratoire de géotechnique de l'EPUL, consistaient à compter deux fois pendant une minute les impulsions parvenant au détecteur. Après le premier comptage, l'appareil était retourné de 90° dans le plan horizontal. Si la différence entre les deux nombres d'impulsions était supérieure à 200, c'est-à-dire à environ 2 %, un troisième comptage était exécuté. La valeur adoptée était la valeur moyenne entre les deux comptages.

Actuellement, un seul comptage d'une minute est exécuté en chaque point.

1. Sources d'erreurs

a) Durée trop courte du comptage

Les comptages d'impulsions étant des dénombrements statistiques des radiations diffusées par le matériau ausculté, la mesure sera d'autant moins exacte que la durée du comptage sera courte.

b) Voltage du courant utilisé

Les détecteurs ont un taux de comptage variable, en fonction de la tension du courant. On constate toutefois que le taux de comptage ne varie pratiquement pas si la tension est maintenue entre 1300 et 1400 V. En dehors de ce domaine, le taux de comptage varie fortement avec la tension. La tension de l'appareil doit donc être réglée à une valeur comprise dans ce domaine.

c) Erreur due à la mesure du temps

Le chronoscope ayant un mouvement d'horlogerie à ressort, son exactitude n'est pas parfaite.

Pratiquement, on constate que l'erreur due au chronoscope est inférieure à ± 1 %.

d) Mauvais contact entre le sol et l'appareil

Toute couche ou poche d'air subsistant entre la plaque d'appui et le sol sera cause d'une erreur due au fait que dans ces zones, les radiations ne seront pas diffusées.

e) Mauvais choix des étalons

Le nucléodensimètre et le nucléohumidimètre doivent être étalonnés à l'aide d'échantillons standard dont le poids spécifique apparent ou la teneur en eau sont connus avec exactitude. Ces échantillons doivent être de préférence constitués de la même matière que celle que l'on aura à ausculter sur le chantier.

Les échantillons étalons doivent avoir des dimensions suffisamment grandes pour que leurs limites n'aient pas d'influence sur les comptages. Plus le poids spécifique de la matière est faible et plus les radiations pénètrent profondément. On a constaté que si le poids spécifique apparent est supérieur à 1,5 kg/cm², l'épaisseur des étalons doit être au minimum de 20 cm. En plan, leurs dimensions doivent être au moins de 40 x 40 cm.

- f) *Radiations provenant d'objets radio-actifs placés au voisinage du détecteur*
 g) *Mauvais fonctionnement du dispositif électronique de l'appareil de mesure*

2. Contrôle de l'appareil

L'appareillage comporte les systèmes de contrôle suivants :

— Contrôle du compteur de temps par raccordement au réseau à courant alternatif du compteur d'impulsions. Si, par exemple, le courant alternatif est à 50 périodes par seconde, et la durée du comptage de contrôle de 2 minutes, le nombre d'impulsions enregistré par l'appareil devra être de $50 \times 60 \times 2 = 6000$.

— Contrôle de l'intensité de radiation émise par la source. Le nucléodensimètre ou le nucléohumidimètre étant raccordé au compteur d'impulsions, et placé sur un support, dans une position bien déterminée, on effectue un comptage que l'on appellera standard et qui devra être répété chaque jour un certain nombre de fois exactement dans les mêmes conditions. Toute variation importante du comptage standard indique une anomalie dans le fonctionnement de l'appareil.

Au cours des années, le nombre d'impulsions mesuré par les comptages standard diminue, du fait de la diminution d'activité de la source. C'est pourquoi les courbes d'étalonnage de l'appareil doivent être corrigées si elles donnent le poids spécifique apparent ou la teneur en eau en fonction du nombre d'impulsions. Pour éliminer cet inconvénient, la courbe d'étalonnage peut être reportée en fonction du rapport :

$$\frac{\text{nombre d'impulsions par minute}}{\text{nombre d'impulsions standard par minute}}$$

Dans ce cas, elle est indépendante des variations des comptages standard.

3. Etalonnage de l'appareil

L'appareillage doit être étalonné en mesurant le nombre d'impulsions sur différents corps étalons dont on a mesuré par ailleurs le poids spécifique apparent ou la teneur en eau. Les étalons doivent être en principe constitués du même matériau que celui dont on désire mesurer les caractéristiques. Leurs dimensions doivent être telles qu'elles puissent être considérées comme infinies vis-à-vis des dimensions de l'appareil.

Dans le cas du nucléodensimètre, le poids spécifique des étalons doit être déterminé par mesure directe du poids et du volume et non pas par une méthode indirecte telle que celle du sable ou celle du ballon¹ qui comportent elles-mêmes une certaine erreur systématique.

Il faut si possible déterminer le poids spécifique apparent ou la teneur en eau de l'étalon par couches suffisamment minces pour qu'il puisse être tenu compte d'une éventuelle hétérogénéité du matériau et de l'influence prépondérante de la couche la plus voisine de l'appareil.

Dans le cadre du Laboratoire de géotechnique de l'EPUL, les étalonnages suivants ont été faits :

- a) Compactage dans des cuves cylindriques de 60 cm de diamètre et de 50 cm de profondeur de trois types de sols. Chaque compactage a été effectué en quatre couches d'environ 12,5 cm d'épaisseur ; le poids spécifique apparent et la teneur en eau de chaque couche ont été mesurés et deux séries de dix comptages de 2 minutes ont été effectuées. Entre les deux séries, l'appareil a subi une rotation de 90°. Le tableau suivant donne les valeurs les plus caractéristiques mesurées :

Essai n°	Caractéristiques du sol	Position de l'appareil	Valeurs considérées	Nombre d'impulsions en 2 minutes
1	Argile limoneuse $\gamma = 1,67$ $W = 16,0 \%$	initiale	max. moy. min.	22 630 22 215 21 892
		à 90°	max. moy. min.	22 665 22 288 21 910
		standard	max. moy. min.	29 666 29 506 29 185
2	Sable $\gamma = 1,81$ $W = 14,9 \%$	initiale	max. moy. min.	20 571 20 817 20 126
		à 90°	max. moy. min.	20 587 20 414 20 224
		standard	max. moy. min.	30 109 29 805 29 539
3	Sable et gravier tout-venant $\gamma = 2,07$ $W = 5,8 \%$	initiale	max. moy. min.	17 997 17 879 17 748
		à 90°	max. moy. min.	17 557 17 460 17 398
		standard	max. moy. min.	29 871 29 752 29 604

Les trois points représentatifs de ces trois essais sont reportés sur la figure 6.

- b) Des mesures au nucléodensimètre ont été effectuées sur divers chantiers et des échantillons intacts ont été prélevés à l'emplacement exact où avait été posé l'appareil. Les échantillons avaient un diamètre de 95 mm et une hauteur de 20 cm environ. Leur volume, leur poids et leur teneur en eau ont été déterminés en laboratoire. Ces essais ont été faits en 70 emplacements. Tous les échantillons avaient un poids spécifique apparent compris entre 2,05 et 2,34 kg/dm³. Ils ont été répartis en treize groupes, dont le poids spécifique moyen ne différait pas de plus de 0,02 kg/dm³. Les points correspondants aux valeurs moyennes des poids spécifiques apparents et des nombres d'impulsions de chacun de ces treize groupes ont été reportés sur la figure 6. On constate qu'ils se groupent autour d'une même droite que les points obtenus lors des essais exécutés dans les cuves. Cette droite a été adoptée comme courbe d'étalonnage du nucléo-densimètre.
- c) Pour étudier l'influence de l'épaisseur des blocs étalons sur le nombre d'impulsions, des plaques de béton de 40 cm sur 60 cm et de 5 ou 10 cm d'épaisseur ont été préparées. Leur poids spécifique apparent a été mesuré très exactement. Des essais ont été effectués au nucléodensimètre sur ces plaques empilées les unes sur les autres, l'épaisseur totale variant de 5 en 5 cm entre 5 cm et 55 cm. Les résultats de ces mesures sont donnés à la figure 7, qui montre que pour un poids spécifique apparent de 2,25 kg/dm³ environ, l'épaisseur de l'étalon doit être au moins de 15 cm. C'est aussi la distance d'influence des radiations de l'appareil pour ce poids spécifique. Pour des poids spécifiques plus faibles, cette épaisseur serait plus grande.

¹ Voir normes SNV 70 335 et SNV 70 337.

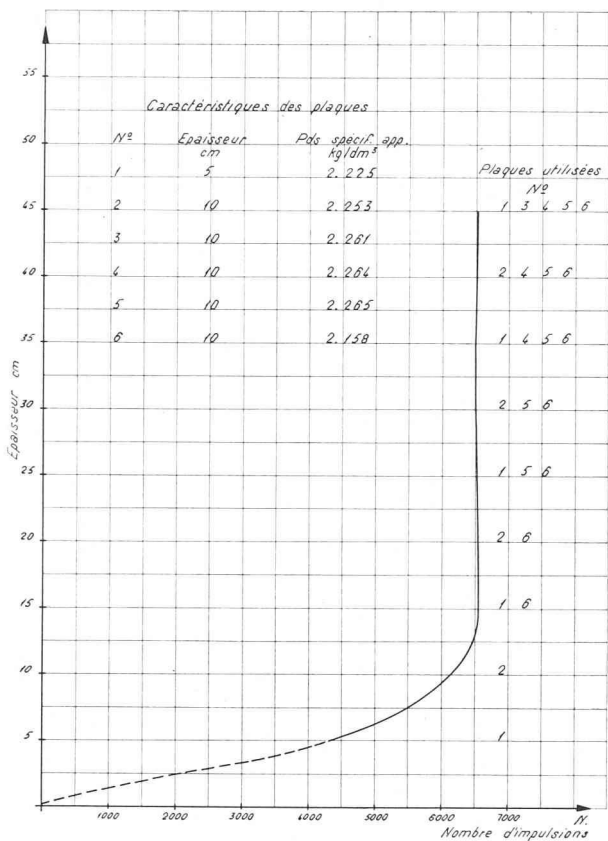


Fig. 7. — Intensité des radiations en fonction de l'épaisseur d'une plaque de béton sur laquelle est posé le nucléodensimètre.

4. Précision des mesures et fidélité de l'appareil

Tous les comptages qui ont été effectués sur les chantiers au début de l'utilisation de l'appareil étaient répétés soit dans la même position soit à 90°. Nous avons constaté que pour une durée de 1 minute, la différence entre deux comptages effectués dans la même position de l'appareil ne dépassait jamais 3,5 % et que cette même différence pour deux positions, à 90°, de l'appareil ne dépassait pas 10 % :

Chantier	Ecart moyen %	Ecart maximum %	Durée totale des comptages
<i>Même position de l'appareil</i>			
Maladière	0,80	2,45	125 minutes
Ecublens	0,62	2,27	40 "
Pont Cobal	0,96	2,98	270 "
La Prairie	0,86	2,82	70 "
Vich-Nyon	0,75	2,54	30 "
Promenthouse	1,30	2,70	120 "
Pont de l'Asse	0,87	3,39	150 "
Duillier	1,10	2,41	120 "
<i>Positions à 90°</i>			
Maladière	1,90	7,80	120 "
Morges	2,30	8,24	60 "
Sect. 6, lot 23	3,30	10,55	70 "
Route cant. 82	1,77	4,05	60 "
Vallerette	1,30	4,60	75 "
Durée totale :			1310 minutes

VI. Résultats et interprétation des mesures faites sur les chantiers

A titre d'exemple, nous donnons ci-après les valeurs obtenues lors de deux séries de mesures effectuées sur les chantiers de l'autoroute Genève-Lausanne ainsi que les rapports adressés par le Laboratoire de l'autoroute à la Direction centrale, à la Direction locale des travaux et à l'entreprise au sujet de ces mesures et donnant les conclusions pratiques qui en ont été déduites.

Dans le premier cas, le compte rendu des mesures, établi par l'opérateur du nucléodensimètre est le suivant :

Date : le 5.10.63
Lot n°

1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)
Profils	Comptage 1 min.	Poids spécifique apparent humide	Comptage 1 min.	Teneur en eau	Poids spécifique apparent sec	Degré de compactage %
20 Jura	9000	2,04	2500	3,9	1,96	89,0
21 Lac	9200	2,03	2600	4,1	1,95	88,0
22 Jura	8500	2,08	3200	5,2	1,98	90,0
23 Lac	8900	2,05	2800	4,4	1,96	89,0
24 Jura	7900	2,14	2600	4,0	2,06	93,5
25 Lac	9200	2,03	2400	3,8	1,96	89,0
26 Jura	9400	2,01	2000	2,8	1,96	89,0
27 Lac	9800	1,98	2600	4,0	1,91	87,0
28 Jura	8900	2,05	2200	3,1	1,99	90,5
29 Lac	8300	2,10	2100	3,0	2,04	93,0
30 Jura	7800	2,15	2900	4,6	2,06	93,5
31 Lac	7900	2,14	3000	4,8	2,04	93,0

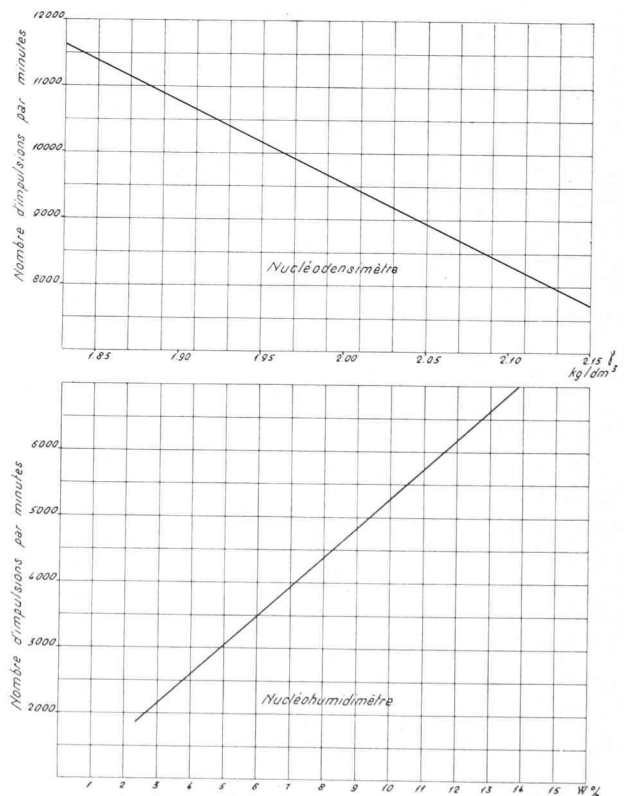


Fig. 8. — Courbes d'étalonnage du nucléodensimètre et du nucléohumidimètre.

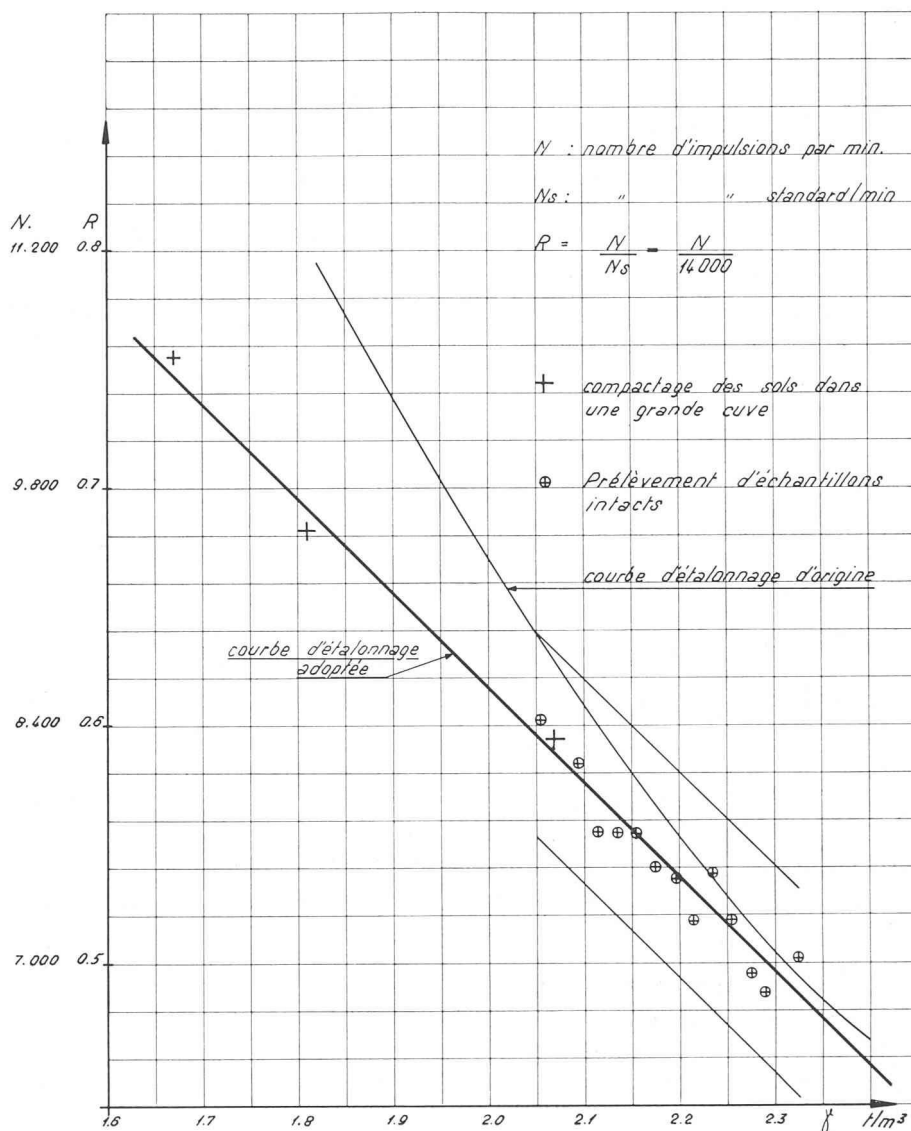


Fig. 6. — Courbe d'étalonnage du nucléodensimètre.

La dernière colonne de ce tableau ne figure pas, en fait, dans la minute de chantier.

Les profils étant distants de 30 m, le tronçon contrôlé a une longueur de 360 m. L'exécution de ces douze paires de mesures a nécessité environ 1 1/2 heure de travail sur place, soit environ 7 1/2 minutes par paire de mesures.

Les valeurs du poids spécifique apparent humide et de la teneur en eau ont été obtenues à partir des courbes données à la figure 8.

A la fin de ces mesures, l'opérateur a prélevé un échantillon représentatif de l'ensemble des matériaux remblayés sur ce tronçon et l'a remis à midi au Laboratoire qui a exécuté l'après-midi un essai de Proctor dont le résultat est donné à la figure 9. Etant donné que les sols étaient très graveleux, cet essai a été fait à l'aide d'un grand moule de 15,2 cm de diamètre et de 11,7 cm de hauteur. Le nombre de coups de dame a été augmenté pour que l'énergie de compactage reste égale à 6 kgcm/cm³.

Les essais ayant été faits un vendredi, le rapport écrit du Laboratoire n'a pu être transmis que le lundi 8 octobre. Il comportait un tableau donnant les chiffres des colonnes 1), 3), 5), 6) et 7) du tableau de la page précédente. Il était accompagné en outre d'un dessin

donnant les résultats de l'essai Proctor (voir figure 8) et des commentaires suivants :

« Les valeurs du degré de compactage mentionnées au tableau ont été calculées sur la base des caractéristiques Proctor standard des sols d'apport figurant au diagramme n° 1418 ci-annexé.

Les caractéristiques sont les suivantes :

Poids spécifique apparent sec maximum : 2,21 pour teneur en eau optimum de 5,8 %.

Conclusions : le compactage est insuffisant. »

Cette conclusion est tirée du fait que les normes VSS prescrivent que le degré de compactage doit être de 95 %. On constate en outre que la teneur en eau est partout inférieure à l'optimum.

En appliquant les normes anglaises, on aurait pu tirer la même conclusion sans l'exécution de l'essai Proctor, en constatant simplement que le pourcentage d'air en volume est supérieur à 10 %.

Dans ce premier cas, tous les degrés de compactage sont insuffisants, la conclusion à en tirer est donc claire : le compactage doit être poursuivi.

Le deuxième exemple que nous donnons ci-dessous comporte un certain nombre de valeurs acceptables et quelques valeurs insuffisantes :

Date : le 6 août 1962
 Lot n°

Profils	Comptage 1 min.	Poids spécifique apparent humide	Comptage 1 min.	Teneur en eau	Poids spécifique apparent sec	Degré de compactage %
15 Jura	11 900	1,80	3800	6,7	1,69	94,0
15 Lac	12 100	1,80	3500	6,0	1,70	94,5
16 Jura	12 000	1,80	4040	7,0	1,68	93,4
16 Lac	12 000	1,80	3400	5,6	1,71	95,0
17 Jura	9 400	2,01	4200	7,5	1,87	95,0
17 Lac	9 300	2,01	4700	8,9	1,85	94,0
18 Jura	9 000	2,03	4500	8,5	1,87	95,0
18 Lac	8 800	2,05	4600	8,6	1,89	96,0
19 Jura	9 200	2,02	4500	8,5	1,86	94,5
19 Lac	8 900	2,04	4500	8,5	1,88	95,5
20 Jura	8 900	2,04	4500	8,5	1,88	95,5
20 Lac	9 000	2,03	4200	7,5	1,89	96,0

Les sols contrôlés lors de l'exécution de ces essais étaient de deux natures différentes ; deux échantillons représentatifs de chacun de ces types de matériaux ont été prélevés et soumis à l'essai de compactage de Proctor. Les résultats en sont donnés à la figure 9.

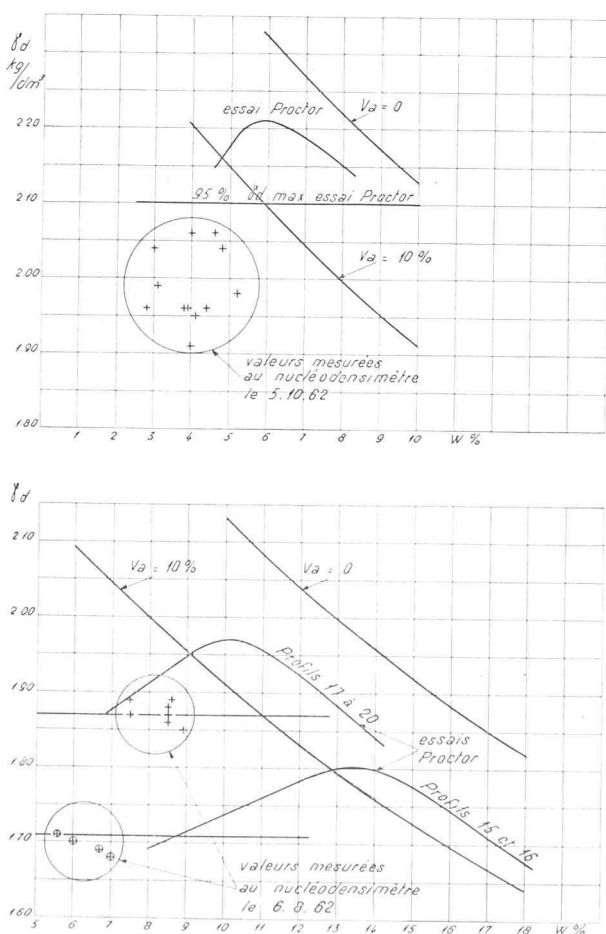


Fig. 9. — Résultats de deux séries de mesures effectuées au nucléodensimètre sur les chantiers de l'autoroute Genève-Lausanne comparés à ceux des essais de compactage Proctor correspondants.

Au droit des profils 15 et 16, le sol a un poids spécifique apparent sec maximum de 1,80 kg/dm³ pour une teneur en eau optimum de 13,6 %. On constate que la compacité est dans l'ensemble insuffisante par manque d'eau. L'été 1962 ayant été très sec, on a constaté d'une façon générale que la teneur en eau des matériaux était sensiblement inférieure à l'optimum de compactage.

Au droit des profils 17 à 20, le sol a un poids spécifique apparent sec maximum de 1,97 kg/dm³ pour une teneur en eau optimum de 10,2 %. Dans cette zone, deux valeurs de la compacité sont inférieures aux exigences sur les huit points auscultés. Dans ce dernier cas, on peut admettre que le travail est suffisant, mais en notant que, pour la suite des travaux, l'énergie de compactage doit être légèrement augmentée.

Selon les exigences anglaises, la compacité serait insuffisante pour tout ce remblai. Celui-ci devrait être humidifié et compacté à nouveau.

VII. Conclusions

La construction de l'autoroute Genève-Lausanne a nécessité la mise en place et le contrôle de 1 300 000 m³ de remblais. Le bureau de construction des autoroutes a admis que la fréquence des essais serait de deux essais à chaque profil sur chaque couche compactée. Les profils étant distants de 30 m environ, cela correspond à une fréquence d'un essai pour 200 m³ de remblai mis en place ou à 6500 essais au total.

Si l'on admet qu'exceptionnellement, plusieurs chantiers travaillant ensemble, 10 000 m³ de remblai soient mis en place en un jour, cela signifie que 50 essais de contrôle doivent être exécutés ce jour-là. Or, les méthodes d'essais traditionnelles sont loin de permettre, avec une seule équipe, d'exécuter chaque jour ce nombre d'essais. Le tableau ci-dessous permet de comparer les quatre méthodes de contrôle les plus usuelles chez nous :

Méthode de contrôle	Densité- mètre à membrane SNV 70337	Méthode du sable SNV 70335	Prélève- ment d'échan- tillons intacts	Nucléo- densimètre
Nombre maximum d'essais exécutés en 1 jour par l'opérateur	13	10	20	60
Durée moyenne d'un essai (y compris déplacement d'un point à l'autre)	45 min.	60 min.	30 min.	10 min.
Nombre d'opérateurs et d'appareils nécessaires pour exécuter 50 essais/jour	4	5	2 1/2	1
Coût des appareils en milliers de francs	1,5	1	1	30
Amortissement journalier des appareils en francs	1,5	1	1	30
Salaires journaliers pour exécution de 50 essais	160	200	100	50
Coût de 50 essais	161,5	201	101	80

Remarques :

Pour établir le tableau ci-dessus, nous avons supposé que la durée du travail est de dix heures par jour, que le salaire d'un opérateur est de 1000 fr. pour 25 jours de travail,

mais que pour le nucléodensimètre, le salaire est de 1250 fr., pour le même nombre de jours (opérateur plus qualifié).

Le coût des essais comporte, pour les trois premières méthodes, uniquement la détermination du poids spécifique apparent, qui se fait sur place. Il aurait encore fallu compter le coût de la détermination de la teneur en eau, qui se fait en laboratoire. Par contre, pour le nucléodensimètre, la teneur en eau se déterminant sur place, son coût est compté dans celui d'un essai.

On constate donc que, malgré la somme importante à investir lors de l'achat de l'appareil, le nucléodensimètre permet de faire des essais de contrôle dont le coût n'est pas plus élevé que celui des essais que l'on fait par les autres méthodes. Néanmoins, il faut remarquer que l'estimation faite dans le tableau de la page précédente ne tient pas compte de tous les facteurs. Les frais de déplacement par exemple viendraient encore augmenter le coût des essais traditionnels par rapport à celui des essais au nucléodensimètre. Par contre, les frais d'entretien et d'étalonnage des appareils sont relativement élevés dans le cas du nucléodensimètre et sont bas pour les autres méthodes.

Le nucléodensimètre est un appareil à grand rende-

ment dont l'achat ne se justifie que pour autant que l'on ait fréquemment une cinquantaine d'essais de contrôle à faire chaque jour. Il ne faut en outre pas perdre de vue que ce type d'appareil nécessite de la part de l'opérateur un soin particulier dans l'exécution des essais et un esprit critique constamment en éveil. Il nécessite aussi un dispositif d'étalonnage bien étudié et la possibilité, à un moment quelconque, de faire appel à des spécialistes connaissant l'électronique et les radio-isotopes pour réparer toute panne éventuelle.

* * *

Nous tenons à remercier M. E. Dubochet, ingénieur en chef du Bureau de construction des autoroutes, et M. le professeur D. Bonnard, directeur du Laboratoire de géotechnique de l'EPUL, qui ont accepté le risque du financement d'un appareillage entièrement nouveau, ainsi que M. D. Bovet, ingénieur-physicien au Laboratoire de géotechnique, qui a rédigé le chapitre IV.1 du présent article.

Lausanne, octobre 1963.

FILTRES POUR DRAINAGES

par E. RECORDON, ingénieur, chef de travaux au Laboratoire de géotechnique de l'EPUL

I. Préambule

Lorsqu'une canalisation de drainage est établie dans un sol sableux ou limoneux, susceptible de donner lieu au phénomène d'érosion interne c'est-à-dire à l'entraînement des particules les plus fines par l'écoulement de l'eau, il est nécessaire de placer entre les tuyaux perforés de la canalisation et le sol qui doit être drainé une couche filtrante. Le matériau qui constitue cette couche filtrante doit avoir une granulométrie plus grossière que le sol que l'on veut protéger, mais suffisamment fine pour que les particules les plus fines du sol ne puissent pas pénétrer dans les pores de la couche filtrante et finalement la traverser. Des règles empiriques ont été établies pour fixer la granulométrie de la couche filtrante à partir de celle du sol à protéger.

La norme de l'Union suisse des professionnels de la route SNV 70 125, prescriptions de qualité des matériaux pour filtres, donne par exemple les quatre conditions suivantes :

- | | | |
|----|---|-----------|
| a) | $\frac{D_{15} \text{ couche filtrante}}{D_{15} \text{ sol à protéger}}$ | ≥ 5 |
| b) | $\frac{D_{15} \text{ couche filtrante}}{D_{85} \text{ sol à protéger}}$ | ≤ 5 |
| c) | $\frac{D_{50} \text{ couche filtrante}}{D_{50} \text{ sol à protéger}}$ | ≤ 25 |
| d) | $\frac{D_{85} \text{ couche filtrante}}{\phi \text{ trous du tuyau perforé}}$ | ≥ 1 |

Dans ces inégalités, D_x est le diamètre des éléments correspondant à x % sur la courbe granulométrique.

Ces règles empiriques ne sont toutefois pas très précises et laissent une certaine marge pour le choix de la composition granulométrique de la couche filtrante.

Le Bureau de construction des autoroutes vaudoises a jugé utile d'étudier de façon plus détaillée, par des essais de laboratoire, le comportement de certains matériaux utilisés comme couche filtrante. Il s'agissait surtout d'étudier la possibilité d'utiliser une grave, sable et gravier tout-venant, répondant aux prescriptions de qualité des graves pour fondation (contenant moins de 3 % d'éléments plus petits que 0,02 mm) à la place des graviers, gravillons ou sables propres à granulométrie uniforme utilisés couramment dans ce but mais dont le coût est relativement élevé.

Notre but est de donner les résultats des essais exécutés pour cette étude par le Laboratoire de géotechnique de l'EPUL.

II. Première étude

Avant la demande du Bureau de construction des autoroutes, une première étude avait été exécutée par le Laboratoire de géotechnique de l'EPUL, à la demande de M. Bonjour, ingénieur, président de la Commission 3 « superstructure et infrastructure » de l'Union suisse des professionnels de la route.

Une cuve en maçonnerie de sections rectangulaires, de 2 m de longueur, de 60 cm de largeur et de 2 m de hauteur environ, constituait un modèle de tranchée drainante à l'échelle 1 : 1. A 60 cm du fond de la cuve, se trouvait une grille, dont l'ouverture des mailles pouvait être modifiée suivant la granulométrie du matériau