

Chapitre III : Essai de pénétration au carottier (SPT) NF P94-116

III.1. Définition

L'essai de pénétration au carottier est un essai géotechnique qui teste le terrain en place et fournit une caractéristique conventionnelle et un échantillon remanié du sol. L'essai consiste à déterminer la résistance à la pénétration dynamique d'un carottier normalisé battu en fond d'un forage préalable.

L'essai de pénétration au carottier permet d'établir une relation entre la résistance à la pénétration d'une part et les caractéristiques et la variabilité des sols d'autre part.

III.2. Domaine d'application

L'essai de pénétration au carottier s'applique aux sols fins et aux sols grenus dont la dimension maximale des éléments ne dépasse pas 20 mm.

L'essai de pénétration au carottier est limité à une profondeur de 50 m.

III.3. Principe de l'essai

L'essai de pénétration au carottier consiste à :

- enfoncer dans le sol par battage un carottier à partir du fond d'un forage aux parois stabilisées après la pénétration du carottier sous l'effet de la pesanteur et de l'enfoncement d'amorçage de 15 cm,
- noter le nombre de coups de mouton, «N», nécessaire pour faire pénétrer le carottier dans le sol d'une hauteur de 30 cm.

III.4. Appareillage

III.4.1. Description

L'essai de pénétration au carottier nécessite l'appareillage suivant (Fig. 1) :

- un équipement de forage et de tenue de la paroi,
- un dispositif de battage,
- un train de tiges et son guidage,
- un carottier,
- un système de mesure.

III.4.2. Equipement de forage et de tenue de la paroi

L'équipement de forage doit permettre de réaliser un trou de forage nettoyé avant l'insertion du carottier et doit garantir que l'essai de pénétration sera réalisé dans un sol relativement peu remanié.

Dans le cas d'un forage au trépan avec injection de fluide, l'outil doit comporter des orifices de décharge latérale et non orientés vers la base. Le recours au lançage à l'eau claire à l'aide du carottier et l'exécution de l'essai dès que la profondeur envisagée est atteinte ne sont pas autorisés.

Lorsque le forage est exécuté à la tarière avec un tubage provisoire, le diamètre des outils de forage ne doit pas être supérieur à 90 % du diamètre intérieur du tubage. Le diamètre du trou de forage doit être aussi petit que possible et inférieur à 130 mm.

Lorsque les parois du forage sont instables, on doit utiliser un tubage et/ou de la boue.

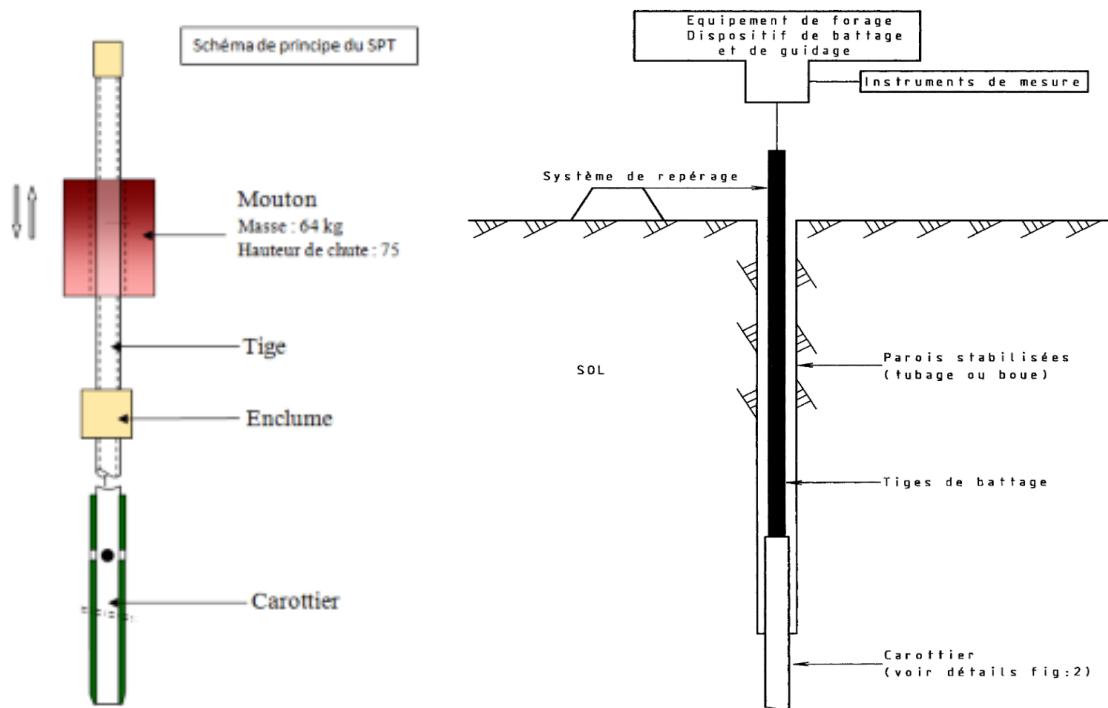


Figure 1 : Appareillage et principe de l'essai S.P.T

III.4.3. Dispositif de battage

Il comporte un mouton, une enclume, un dispositif de guidage, un système de relevage et de déclenchement de la chute du mouton. La masse totale ne doit pas dépasser 115 kg.

a) Mouton

Le mouton a une masse de 64 kg.

b) Enclume et système de guidage

L'enclume est en acier et solidaire du train de tiges. L'enclume, le système de guidage et le train de tiges sont coaxiaux.

c) Système de relevage et de déclenchement

La hauteur de chute est de 0,75 m.

Le mouton est libéré automatiquement avec une vitesse initiale nulle. Il tombe librement.

La cadence de battage est de 15 à 30 coups par minute.

d) Tiges de battage

Les tiges de battage sont en acier. Elles sont assemblées fermement pour constituer un train de tiges rigidement lié à l'enclume et au carottier selon un axe rectiligne et continu.

Les tiges ainsi que leur jonction présentent le même diamètre extérieur.

La flèche des tiges utilisées est inférieure à 0,1 % de leur longueur. Les tiges doivent avoir un module d'inertie approprié à leur longueur.

Pour les profondeurs supérieures à 20 m, des centreurs peuvent être placés sur les tiges à intervalle de 3 m.

e) Carottier

Le carottier doit avoir les dimensions indiquées sur la figure 2.

Le tube central du carottier est fendu pour faciliter l'extraction de l'échantillon de sol.

L'extrémité inférieure du carottier comporte une trousse coupante de mêmes diamètres que le tube fendu et qui se termine en forme tronconique.

L'extrémité supérieure du carottier comporte un raccord muni à sa partie supérieure d'un filetage de jonction aux tiges de battage et à sa partie inférieure une bille formant un clapet anti-retour communiquant avec quatre événets.

f) Instruments de mesure

Les appareils sont adaptés en fonction des informations à recueillir. Ils doivent permettre de fournir au minimum :

- Le nombre de coups de mouton,
- la profondeur du carottier dans le forage,
- l'enfoncement du carottier pendant le battage.

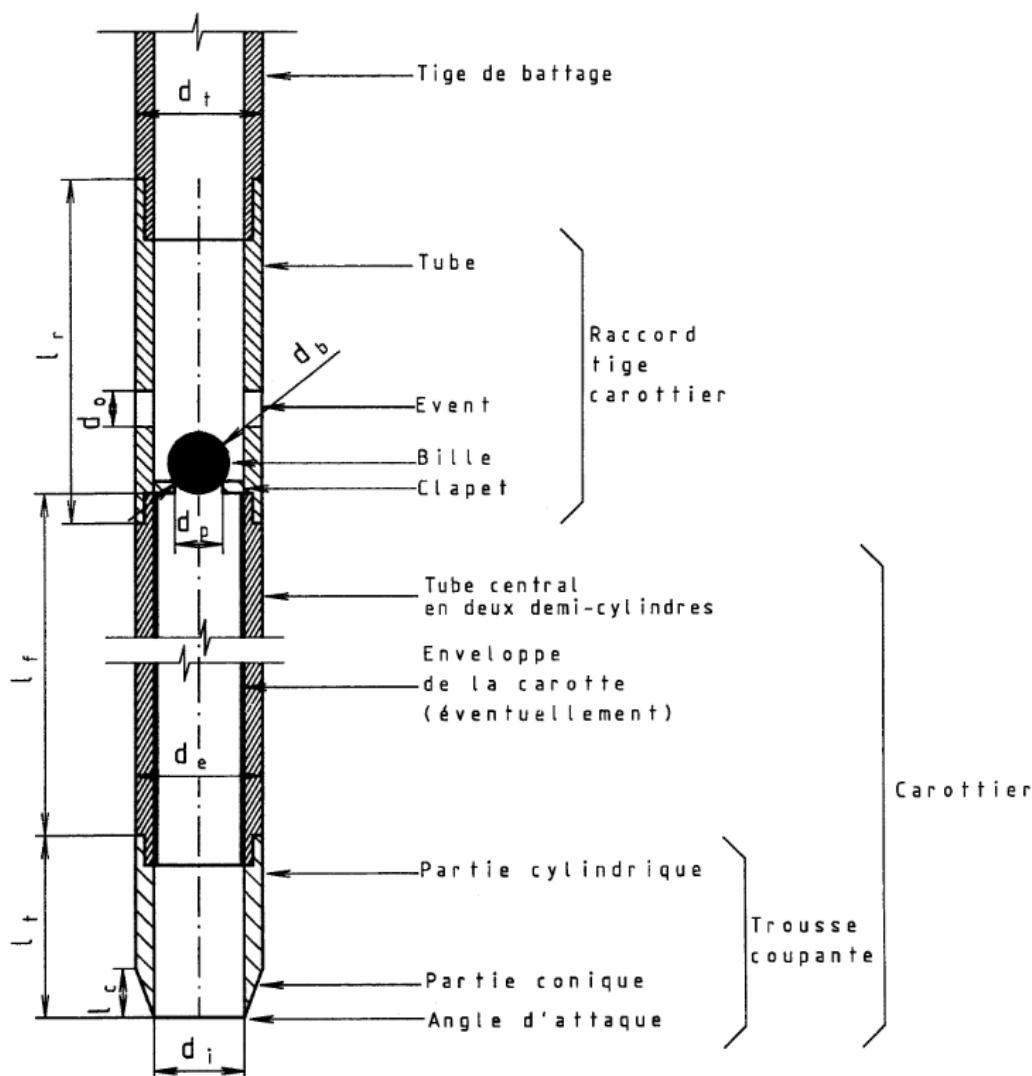


Figure 2 : Coupe du carottier

III.5. Mode opératoire

III.5.1. Contrôles à réaliser avant l'essai

On distingue ceux qui sont effectuer préalablement à l'essai de ceux à réaliser au cours de l'essai.

III.5.1.1. Caractéristiques du dispositif de battage

Avant sa mise en service et après toutes modifications mécaniques, le dispositif de battage doit faire l'objet de la mesure :

- des masses et des dimensions de ses différents éléments constitutifs,
- de la hauteur de chute du mouton,
- de la vitesse de percussion du mouton,
- de l'énergie de percussion incidente.

III.5.1.2. Repérage sur un plan de situation et identification de l'essai de pénétration sur un plan coté

REMARQUE : pour avoir des résultats représentatifs du sol vierge, il faut s'assurer que le terrain n'a pas été perturbé au préalable au droit de l'essai. Sur un site ou un grand nombre de sondages de différentes natures sont effectués, l'ordre chronologique doit être indiqué. On rappelle que l'influence d'un forage non tubé et non rebouché peut affecter le sol sur un rayon atteignant 25 fois le diamètre du forage.

III.5.1.3. Vérifications de l'appareillage

Mensuellement pour une utilisation régulière ou tous les 20 sondages, contrôler la flèche des tiges en les faisant rouler de 360° sur une surface plane.

Avant chaque sondage, contrôler :

- la rectitude des tiges avec une règle de référence,
- l'état du carottier et de sa trousse coupante,
- le système de comptage du nombre de coups en fonction de l'enfoncement.

III.5.2. Déroulement de l'essai

III.5.2.1. Préparation du trou de forage

Le trou de forage doit être soigneusement nettoyé jusqu'à la profondeur de l'essai avec un équipement qui ne remanie pas le sol devant être soumis à l'essai. Quand le forage concerne des sols dans lesquels les parois sont instables, un tubage et/ou une boue de forage doivent être utilisés. Les tubages du type tarière creuse ne doivent pas être utilisés pour les essais en dessous de la nappe.

Quand le forage est exécuté en dessous de la nappe, le niveau de l'eau ou du fluide de forage dans le trou de forage doit être maintenu à une distance suffisante au-dessus du niveau de la nappe pour limiter le remaniement. Le niveau de l'eau ou du fluide de forage dans le trou de forage doit être maintenu pendant le retrait des outils de forage et pendant toute la durée de l'essai.

Les outils de forage, par exemple les tubes, doivent être retirés lentement pour éviter que les effets de succion ne décompriment le sol devant être soumis à l'essai. Si un tubage est utilisé, il ne doit pas être enfoncé en dessous du niveau de début de l'essai.

III.5.2.2. Enfoncement du carottier

Mise en place :

Le carottier solidaire de l'ensemble du train de tiges et du dispositif de battage est posé au fond du trou de forage. La pénétration du carottier sous l'effet de la pesanteur est notée. Si cet enfoncement dépasse 45 cm, l'essai est interrompu et la valeur « N » attribuée est zéro.

La profondeur de l'essai correspond à la position de la base de la trousse coupante après l'enfoncement d'amorçage.

Enfoncement d'amorçage :

Le carottier est enfoncé dans le sol d'une profondeur de 15 cm et le nombre de coups de mouton nécessaire est noté N_0 . Si la pénétration de 15 cm ne peut être atteinte en 50 coups de mouton, la profondeur ainsi obtenue sera considérée comme enfoncement d'amorçage.

Enfoncement d'essai :

Après l'enfoncement d'amorçage, les nombres de coups de mouton N_1 et N_2 nécessaires pour obtenir deux enfoncements successifs du carottier de 15 cm chacun doivent être notés. La valeur $N = N_1 + N_2$ nécessaire pour obtenir l'enfoncement total de 30 cm est appelée résistance à la pénétration N.

L'essai peut être interrompu lorsque N_1 ou N_2 , est supérieur à 50. Dans ce cas l'enfoncement obtenu à l'arrêt de l'essai est noté.

III.5.3. Après l'essai

III.5.3.1. Récupération de l'échantillon de sol

Le carottier est remonté à la surface puis ouvert. Le ou les échantillons de sols sont placés dans des récipients hermétiques.

III.5.3.2. Etiquetage de l'échantillon de sol

Des étiquettes portant les renseignements suivants sont apposées sur les récipients :

- a) site,
- b) numéro du trou de forage,
- c) numéro de l'échantillon,
- d) profondeur de pénétration,
- e) longueur de l'échantillon,
- f) date de l'essai,
- g) nombre de coups $N_0 - N_1 - N_2$.

III.6. Procès-verbal d'essai

Le procès-verbal comporte les informations minimales suivantes (Fig. 3) :

- la référence à la présente norme NF P 94-116,
- l'identification du forage et ses coordonnées, la date et la référence du plan d'implantation,
- le niveau du début du forage par rapport à la surface du sol et la cote altimétrique du sol par rapport à un système de référence précis~,

- la méthodologie de forage, le diamètre de forage, l'utilisation d'un tubage, la présence ou non d'eau ou d'un fluide de forage dans le trou de forage,
- les caractéristiques du système de battage et des tiges,
- la profondeur de chaque essai : base de la trousse après l'enfoncement d'amorçage,
- l'enfoncement du carottier sous l'effet de la pesanteur, le nombre de coups de mouton nécessaire pour chaque intervalle d'enfoncement successif de 15 cm (N , pour l'enfoncement d'amorçage, et N , puis N pour l'enfoncement d'essai) ou l'enfoncement obtenu lors de l'interruption du battage,
- description des sols identifiés.

III.7. Terminologie

III.7.1. Enfoncement d'amorçage

Lors de l'essai de pénétration, le carottier est enfoncé par battage. N désigne le nombre de coups de mouton nécessaires pour un premier enfoncement du carottier de 15 cm appelé enfoncement d'amorçage.

III.7.2. Enfoncement d'essai

L'enfoncement d'essai succède à l'enfoncement d'amorçage. Le carottier est battu afin d'obtenir un enfoncement de 30 cm résultant de deux enfoncements successifs de 15 cm sous N_1 puis N_2 coups de mouton.

III.7.3. Paramètre « N »

Par convention la résistance à la pénétration est caractérisée par « N », le nombre de coups de mouton correspondant à l'enfoncement d'essai : $N = N_1 + N_2$.

Essai de pénétration au carottier effectué conformément à la norme NF P 94-116								
Firme :					Date du forage : début : fin :	N° de dossier :		
Lieu :					Implantation : x : y : z :	N° du sondage :		
Méthode de forage :					Diamètre du forage : mm	Diamètre du tubage : mm		
Niveau de l'eau :								
Profondeur		Nombre de coups			Description du sol			Cote m
Tubage	Essai	Amorçage	Essai					
m	m	N ₀	N ₁	N ₂	N			
0,85	1,0	2	3	4	7	Sable fin à moyen gris devenant moyennement dense		
1,85	2,0	3	4	5	9			
2,85	3,0	8	10	13	23			
3,85	4,0	9	11	14	25			
4,85	5	7	8	11	19			
5,65	5,8	10	14	17	31	Sable fin à moyen brun dense à très dense		
6,85	7,0 arrêt 7,27	20	23	> 50	> 73			
7,75	7,9	17	20	24	44			
Masse totale : enclume et guidage du mouton = kg					Masse d'une tige = kg/m			

Figure 3 : Procès-verbal d'essai



BAKHTI Software Ltd

Civil engineering software development

Website: <https://www.bakhtissoftware.com>

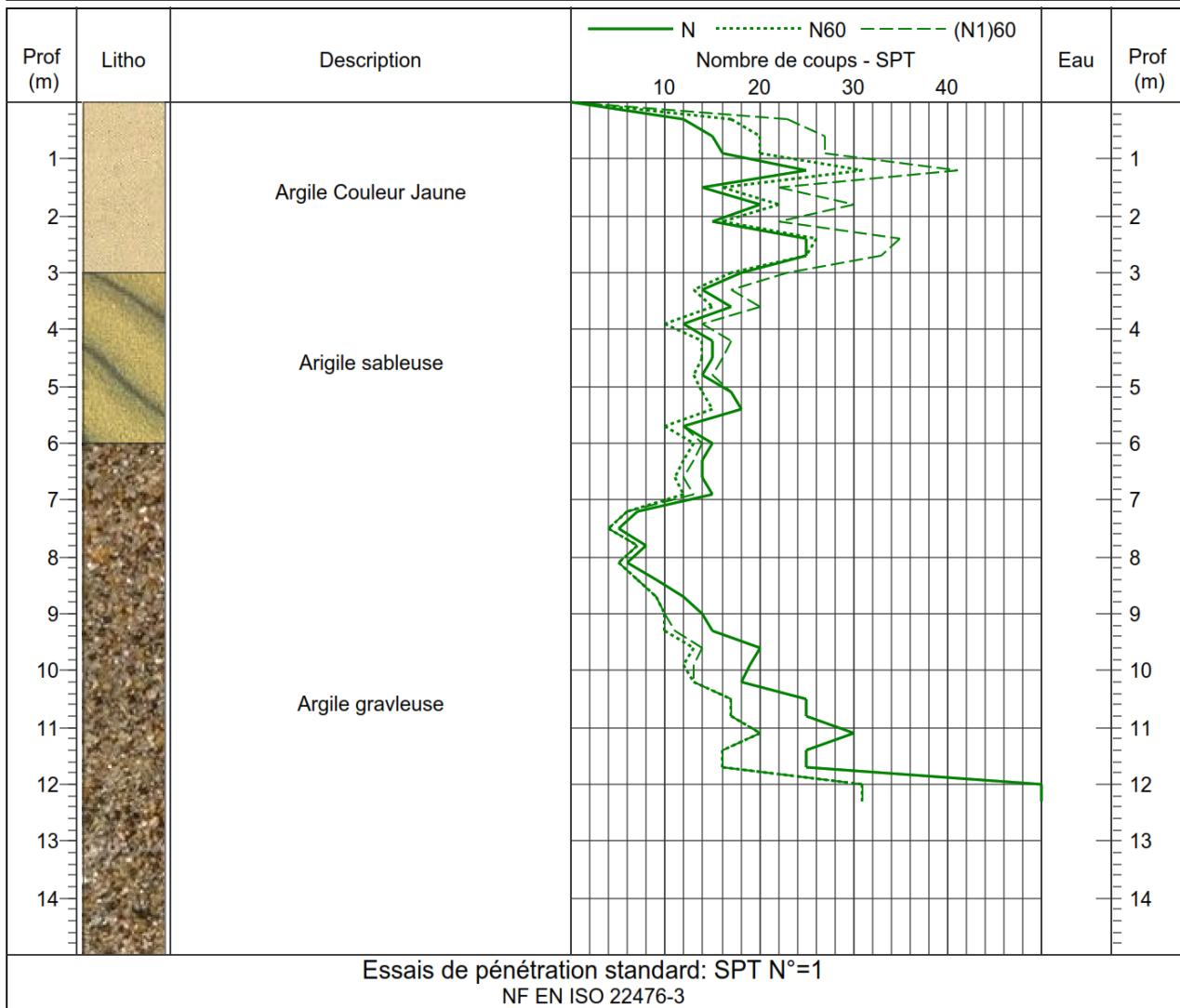
Email: bakhti@bakhtissoftware.com / support@bakhtissoftware.com

Projet: Suivi RN 18

N° Dossier: Ref 008/2020

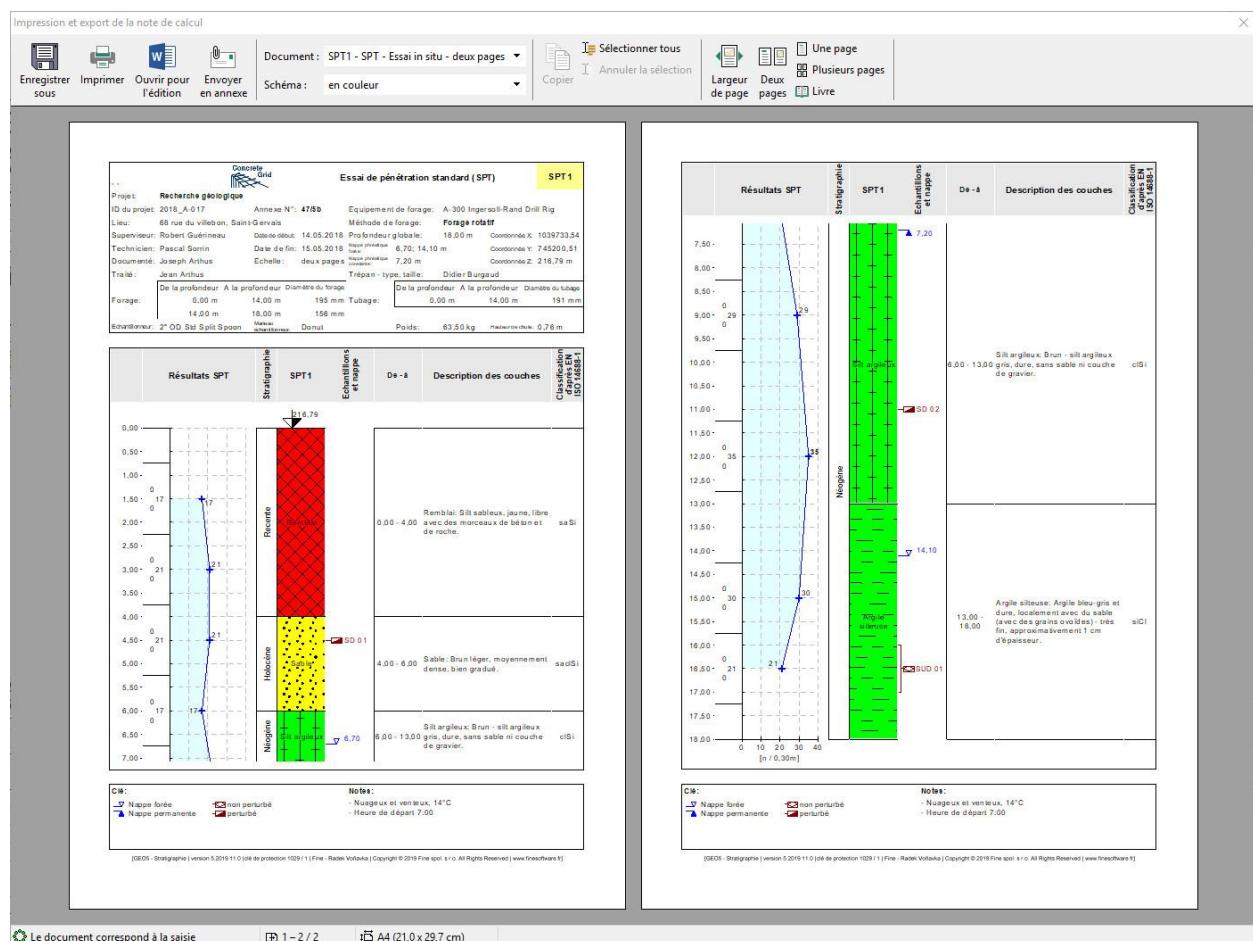
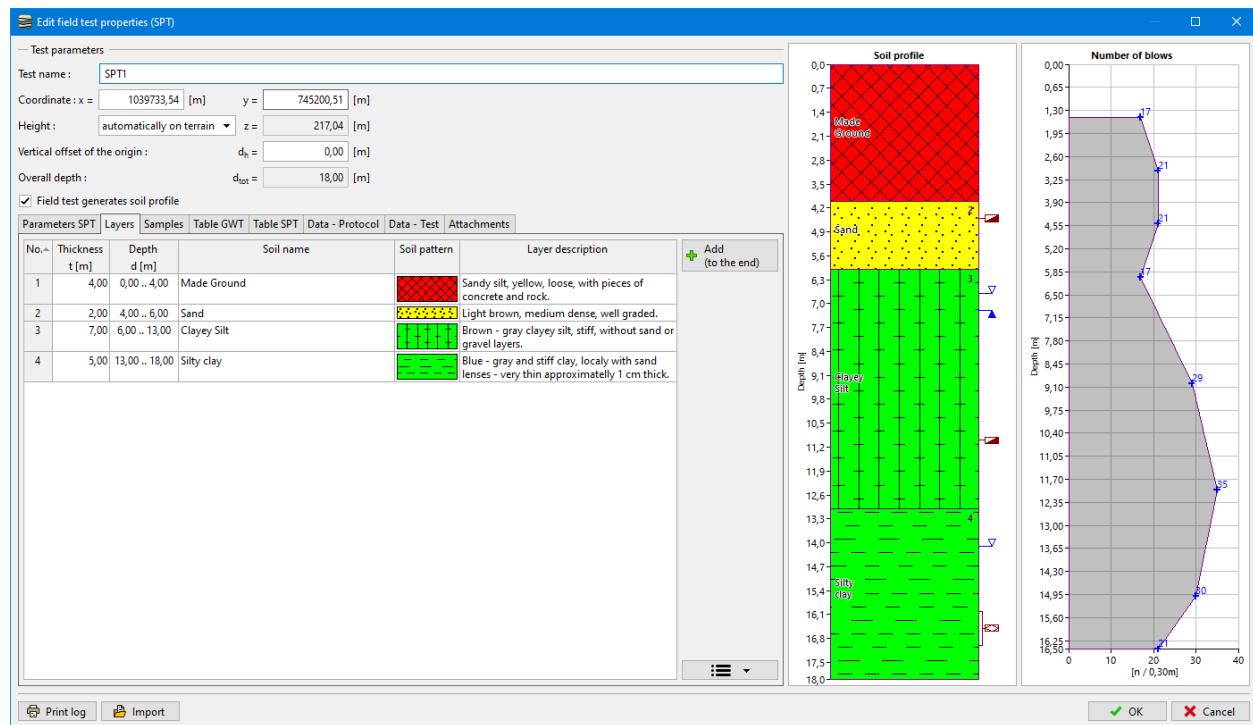
Client: DTP
Lieu: Medea
Date: 2022-10-15
Réalisé par: BAKHTI

Vérifié par: LAIB



Nom de l'appareil: 001 M Mouton= 76kg Hauteur de chute= 76cm

Coordonnées: X= 230, Y= 450, Z= 110, Formules: N60 = (Er x N x CN x λ)/60, (N1)60 = (Er x N x CN)/60



III.8. Interprétation des résultats

Terzaghi et Meyerhoff ont donné des valeurs approchées de l'angle de frottement pour différentes valeurs de N, comme indiqué dans le tableau 1 suivant :

Tableau 1 :

Valeur de N	Compacité	Angle de frottement interne	
		TERZAGHI	MEYERHOFF
4	Très faible	28.5°	30°
4 – 10	Faible	28.5 – 30°	30 – 35°
10 – 30	Moyenne	30 – 36°	35 – 40°
50	Très forte	41°	45°

Les relations de TERZAGHI et MEYERHOFF ont été établies pour des essais correspondant au niveau de la trousse coupante, à une pression verticale des terres d'environ $p_0' = 2.5 \text{ kg/cm}^2 = 25 \text{ t/m}^2$ à sec (la contrainte effective est égale à la contrainte totale).

Si ces conditions ne sont pas réalisées ; il est nécessaire de faire une correction au nombre de coups réellement mesuré Nm pour obtenir un nombre corrigé.

➤ Correction 1 : terme de profondeur

L'expérience montre que la valeur mesurée Nm croît avec la pression verticale effective, autrement dit, pour des faibles profondeurs telles que $P_0' < 3,5 \text{ kg/m}^2$, la valeur de Nm sera inférieure au nombre N que l'on obtiendrait pour une pression effective des terres égale à $3,5 \text{ kg/m}^2$. Pour utiliser correctement les relations de TERZAGHI et MEYERHHOF, il faut donc corriger Nm à la hausse :

$$N_{c1} = N_m \times \frac{25}{P_0' + 7}$$

Avec P_0' est la pression effective des terres au niveau de l'essai

Cette relation est valable pour $P_0' \leq 18 \text{ t/m}^2$

Remarque : Si la valeur N_{c1} ainsi est supérieure au double de la valeur Nm ; il est prudent, dans l'état actuel des expériences, de ne prendre que la moitié de cette valeur, c'est-à-dire $N_{c1}/2$.

➤ Correction 2 : présence de la nappe

Lorsque l'essai est réalisé sous la nappe, l'eau accroît la résistance du sol à la pénétration dynamique, on obtiendrait une compacité et des résistances mécaniques surestimées, donc il faut revoir ces valeurs à la baisse, en utilisant les formules suivantes :

Si : $N_{c1} < 15$; alors $N_{c2} = N_{c1}$

Si : $N_{c1} \geq 15$; alors $N_{c2} = 0,5 N_{c1} + 7.5$

Remarque : Il est logique d'effectuer les deux corrections dans l'ordre indiqué ci-dessus.

➤ Limitation de l'essai

L'essai est peu précis dans les cas suivants :

- Lorsque la couche à reconnaître est argileuse. En effet dans les argiles molles et saturées, il se produit, lors du battage, une augmentation instantanée de la pression de l'eau interstitielle qui fausse les résultats.

- Lorsque le matériau de la couche étudiée contient des éléments de grosseur supérieure à 2 cm ($N > 50$).
 - Lorsqu'il existe une pression artésienne dans la couche à traverser.
 - Lorsque la profondeur du forage dépasse environ 50 m. En effet à partir d'une telle profondeur, le poids des tiges et leur flambage faussent considérablement les résultats.

 Calcul fondation

Lorsque l'essai est réalisé comme il se doit, et que les sols ainsi prospectés ont été convenablement identifiés, les résultats obtenus peuvent être utilisés dans le calcul des taux de travail admissible et des tassements de fondations superficielles et profondes, ceci est particulièrement dans les sols pulvérulents où la difficulté de prélever des échantillons intacts rend souvent difficile ou impossible la mesure en laboratoire de leurs caractéristiques de compressibilité ou de cisaillement.

Remarque : Le nombre de coup N utilisé dans le calcul de fondation (superficielle ou profonde) a subi les deux corrections suscitées (de profondeur et de la nappe).

■ Fondation superficielle

On peut à partir du tableau 1 et l'abaque de Peck qui exprime la relation entre N et l'angle de frottement interne, calculer la charge portante à la rupture d'une fondation à partir de la formule classique de TERZAGHI

$$Q_r = A \cdot \gamma \cdot B \cdot N_g + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + C \cdot N_c$$

Avec :

B : Largeur de la semelle (ou diamètre)

N_y , N_c , N_q : Coefficient de capacité portante dépendant de \varnothing et donné sur l'abaque de Peck

γ : Densité du sol (humide ou saturée selon les cas)

▪ Fondation profonde

La charge portante d'un pieu est la somme de sa résistance à la pointe et de son frottement latéral :

$$\mathbf{Or} = \mathbf{qp} \cdot \mathbf{Ap} + \mathbf{fs} \cdot \mathbf{As}$$

Avec :

A_p : section de la pointe cm^2

q_p : résistance à la pointe en kg/cm^2

A_s : surface latérale du pieu en cm^2

f_s : Frottement latéral en kg/cm^2

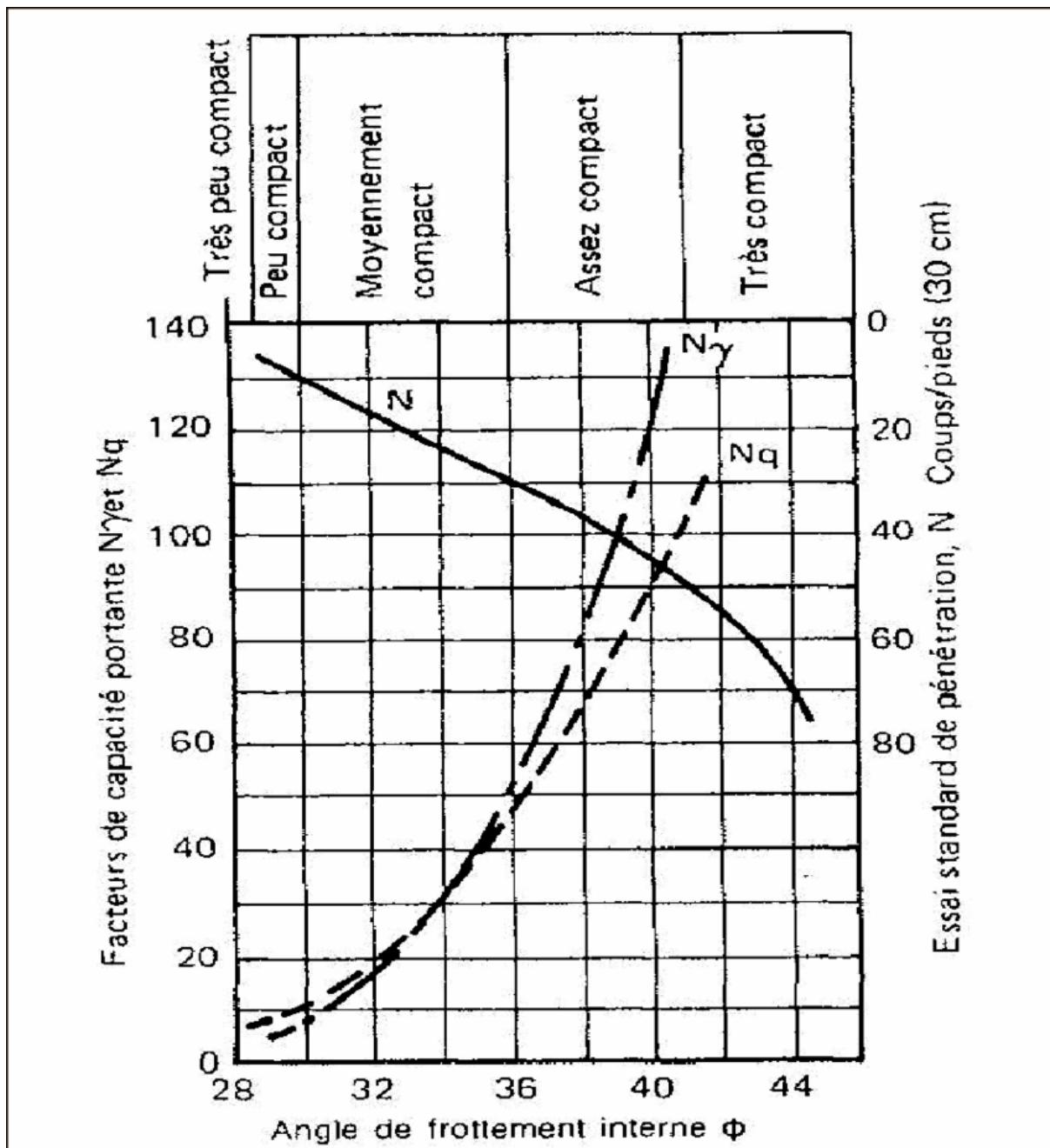
En se basant sur les résultats trouvés par l'essai statique et confirmés un peu partout en Europe, on aboutit aux résultats suivants :

$$q_p = 4 N$$

$$f_s = N / 50$$

D'où la charge de rupture :

$$Q_r = 4 N A_p + (N/50) \cdot A_S$$



L'abaque de PECK