

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Stabilité d'une tour de 80 mètres reposant sur 4 appuis

Stability of a Tower 80 Metres High Resting on Four Piers

par P. BOUYON, ingénieur A. et M., ingénieur en chef du Service des Travaux Neufs aux Raffineries Françaises de Pétrole de l'Atlantique à Donges, France, M. BACHELIER, ingénieur E.T.P., chef de la Section Etudes au Service Sol et Fondations des Laboratoires du Bâtiment et des Travaux publics, 12, rue Brancion, Paris XV^e, et A. PUYO, ingénieur civil E.N.P.C., chef de la Section Essais au Service Sol et Fondations des Laboratoires du Bâtiment et des Travaux publics, 12, rue Brancion, Paris XV^e, France

Sommaire

L'ouvrage projeté est une tour de quatre-vingts mètres de haut reposant sur quatre puits. Le déplacement en tête de l'ouvrage est donc fonction du module de réaction du sol sur le plan horizontal de la fondation. Le problème posé au Laboratoire était de déterminer la rotation de l'axe de l'ouvrage sous l'action des forces horizontales.

Le dispositif de mesure du module d'élasticité de la roche en place comportait l'utilisation de deux vérins. Le premier de ces vérins servait à réaliser la force, le deuxième était un vérin plat, type *Freyssinet*, dont le seul rôle était de mesurer de façon exacte la pression, et de réaliser en même temps une surface de charge souple.

Les mesures ont été faites à deux profondeurs différentes sur le flanc de fouille, en prenant appui sur la paroi opposée.

Il a été impossible de faire des mesures avec surface de charge rigide en raison de la formation presque immédiate de fissures.

En annexe, est indiquée la méthode de calcul permettant de déterminer la flèche en tête de l'ouvrage, uniquement créée par l'élasticité du sol de fondation.

Exposé du problème

L'objet de l'étude demandée au Laboratoire était la mise au point d'un système de fondation pour la tour principale d'un cracking catalytique. Cette unité, du type «Thermofor», a une capacité de traitement de 10.000 barils par jour.

La tour est constituée par un ensemble en charpente métallique reposant sur quatre appuis disposés aux angles d'un carré de 9,5 m de côté. La hauteur totale de l'ouvrage est de 80 m.

Le choix du terrain a été dicté par les facilités de liaison de la nouvelle unité avec les installations existantes, et par la présence du rocher à faible profondeur.

L'ouvrage est soumis à un moment de renversement très important (zone cotière en site exposé) nécessitant un encastrement dans le sol particulièrement efficace; par suite, la fonda-

Summary

The projected structure is a tower 80 metres high resting on four piers. The displacement at the top of the structure is then a function of the modulus of subgrade reaction on the horizontal plane of the foundation. The problem to be resolved at the Laboratory was to determine the rotation of the axis of the structure under the action of horizontal forces.

The device for measuring the bed-rock's modulus of elasticity included two jacks. The first of these jacks was used to apply the force; the second was a flat jack of the *Freyssinet* type whose only function was to measure the pressure very accurately, and at the same time creating a flexible load surface.

The measurements were made at two different depths on the side of the excavation in such a way as to be supported on the opposite wall.

It was impossible to make measurements with a rigid loading surface because of almost immediate crack formation.

The method of calculating the deflection at the head of the structure, caused entirely by the elasticity of the soil at the foundation is described in the paper.

tion doit être ancrée dans le rocher. Or, celui-ci possède une certaine élasticité, que nous nous sommes efforcés de caractériser au moyen des essais en place décrits ci-après. Cette élasticité a pour effet d'entraîner une rotation de l'axe vertical de l'ouvrage soumis aux efforts du vent. Cette rotation doit être aussi réduite que possible, en raison de la nature particulière de l'ouvrage considéré. Il s'agit donc de vérifier que la rotation sous le vent maximum ne dépassera pas une valeur fixée à l'avance et aussi petite que l'on voudra, et que les pressions transmises au rocher, dans le cas de la rotation maximum, ne dépassent pas la limite élastique.

La zone dans laquelle se trouve implantée la fondation a fait l'objet de nombreux sondages à la lance et de 4 sondages de reconnaissance du terrain avec prise d'échantillons intacts. On

trouve en moyenne: une vase argileuse de 2 m d'épaisseur surmontant une couche de roche friable de 4 m d'épaisseur passant à la roche saine vers 6 m de profondeur. L'étude du sol a été complétée par l'exécution de 2 puits dans lesquels il a été procédé à des essais d'élasticité.

La fondation d'un tel ouvrage pouvait être réalisée, soit à l'aide d'un radier général en béton armé, soit à l'aide de puits disposés aux angles de l'emprise.

Un projet initial comportant un radier général en béton armé de 12,5 m de côté et de 3,0 m d'épaisseur a été abandonné car il conduisait à une valeur trop élevée de la flèche au sommet de l'ouvrage et à des pressions excessives sur le rocher. On a finalement adopté le principe suivant: fondation par massifs séparés recevant les membrures de la tour et reliés par des longrines en béton armé absorbant les moments de flexion créés par le vent.

Essais en place

Etant donné la présence de nombreuses fissures dans le rocher friable situé sous l'argile vaseuse, le module d'élasticité ne pouvait s'obtenir que par des essais en place. Pour avoir des déformations mesurables, il était nécessaire de mettre en jeu des forces assez importantes: ainsi nous avons été conduits à effectuer la mesure du module sur des plans verticaux, en prenant appui sur les parois opposées de deux puits creusés l'un au centre de l'ouvrage et l'autre à une dizaine de mètres du précédent. Le matériel utilisé comprenait: deux blocs en béton armé de 0,53 m de diamètre et de 0,65 m de hauteur – un vérin hydraulique de 200 t de force maximum – un bâti de mesure de déformation réalisée en tubes Mills et prenant appui à l'extérieur du puits sur le sol naturel – un vérin plat sur lequel étaient branchés deux manomètres couplés, étalonnés au préalable au Laboratoire.

Le schéma du dispositif est indiqué sur la Fig. 1. Les faces rocheuses ont été soigneusement dressées et leur parallélisme a été obtenu à l'aide d'enduit au ciment prompt. La mesure des déformations était réalisée à l'aide de comparateurs au 0,01 mm palpant directement le rocher sur la périphérie du vérin plat et autour du bloc rigide opposé. Ces comparateurs étaient supportés par le bâti.

Nous avons utilisé le vérin plat pour les deux raisons suivantes:

1° Il permet la mesure précise et réelle des pressions trans-

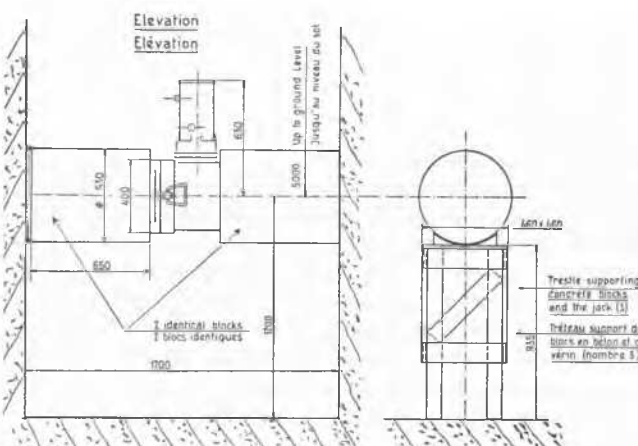


Fig. 1 Mesures du module d'élasticité sur la roche fissurée en place
Measurements of the Modulus of Elasticity on Rock Fissured in Place

missions. En effet, le vérin plat a été rempli d'huile et purgé d'air. Le volume reste donc constant au cours de l'essai de chargement, de sorte que la mesure des pressions à l'intérieur du vérin plat n'est pas faussée par les déformations et la rigidité des parois. Lors des essais d'étalonnage du vérin plat on a constaté la parfaite fidélité du système pour les cycles de charge et de décharge.

La courbe obtenue, en portant en abscisses les pressions lues et en ordonnées les charges réelles, est rigoureusement linéaire

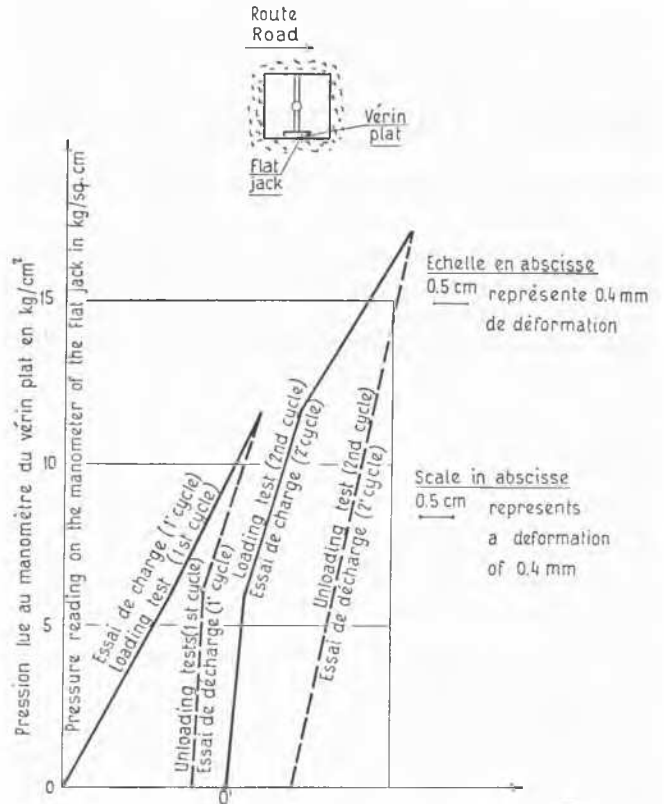


Fig. 2 Puits No 2 Essai No 3 à 2,50 m de profondeur
Shaft No. 2 Test No. 3 at 2.50 m Depth

et ne passe pas par l'origine. La surface de charge sur le vérin était celle d'une plaque de bois ayant pour diamètre le diamètre intérieur du tore. On a constaté, en divisant la charge réelle par la pression lue au manomètre du vérin plat, que l'on obtenait une surface fictive correspondant au diamètre moyen du tore; le fait que la courbe ne passe pas par l'origine provient seulement du manomètre.

2° Il n'y a pas ambiguïté sur la nature des réactions du sol; l'appui étant parfaitement souple, la répartition des pressions est rigoureusement uniforme. Ce n'est pas le cas du côté du bloc rigide opposé où la répartition des pressions, variable en tous points, théoriquement infinie sur les bords, suit dans un plan diamétral la répartition de *Boussinesq*. Il aurait été possible de mesurer également le module de réaction du côté de l'appui rigide, mais le contact n'était pas parfait et, en outre, les pressions très élevées sur les bords de la surface de charge entraînaient presque immédiatement la fissuration de l'enduit de ciment. Aussi, nous nous sommes servis des mesures du côté rigide, uniquement à titre de vérification, pour permettre une éventuelle correction de translation du bâti, perpendiculairement aux faces sur lesquelles furent effectuées les mesures. L'appareillage a été assez difficile à mettre en place à 5 m de

profondeur et le réglage des blocs, des vérins et du bâti de mesure a nécessité beaucoup de soins.

On a limité les déformations du premier cycle pour essayer de mettre en évidence une phase élastique. Dans le second cycle, au contraire, les efforts ont été poussés jusqu'à rupture.

Les essais ont duré une semaine et on a finalement obtenu les résultats reportés sur les Fig. 2, 3, 4 et 5. Nous avons retenu, pour l'interprétation des mesures, les résultats des premiers cycles, qui sont naturellement les plus défavorables. Nous

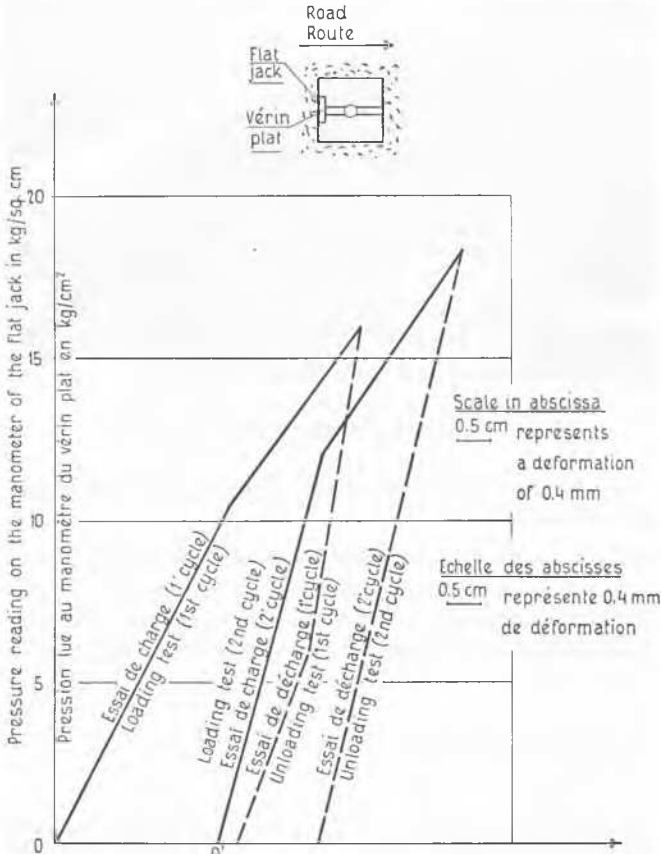


Fig. 3 Puits No 2 Essai No 4 à 2,50 m de profondeur
Shaft No. 2 Test No. 4 at 2.50 m Depth

avons admis pour le module de réaction apparent K , les valeurs moyennes suivantes:

- à 5 m de profondeur $K = 278 \text{ kg/cm}^3$,
- au niveau supérieur du rocher $K = 45 \text{ kg/cm}^3$.

K est ici le rapport de la pression au déplacement mesuré sur les bords.

Des valeurs précédentes, on déduit le module d'élasticité par la formule

$$E_s = \frac{2}{\pi} \cdot (1 - \sigma^2) \cdot KD \text{ (surface de charge souple)}$$

où σ est le coefficient de Poisson (0,2 pour les roches) et D le diamètre de la plaque chargée.

D'où à 5 m de profondeur $E_s = 9000 \text{ kg/cm}^2$ et à 0,5 m au-dessous de la surface de contact argile/rocher $E_s = 1500 \text{ kg/cm}^2$.

Les essais de charge ont été poursuivis jusqu'à la limite élastique, caractérisée par un commencement de désagrégation du rocher autour des surfaces de charge. Les pressions maxima mesurées ont été

- 30 kg/cm^2 à la partie inférieure,
- 17 kg/cm^2 à la partie supérieure.

Ces résultats appellent les remarques suivantes:

a) L'essai effectué au niveau supérieur du rocher était cependant à une distance suffisante de cet horizon pour que les résultats de mesures en soient peu influencés.

b) De la même façon, les parois de la fouille étaient suffisamment écartées pour que l'effet « d'entaille » soit négligeable.

c) Etant donné l'absence de direction de fissuration privilégiée, nous avons admis la même valeur pour les modules d'élasticité horizontal et vertical.

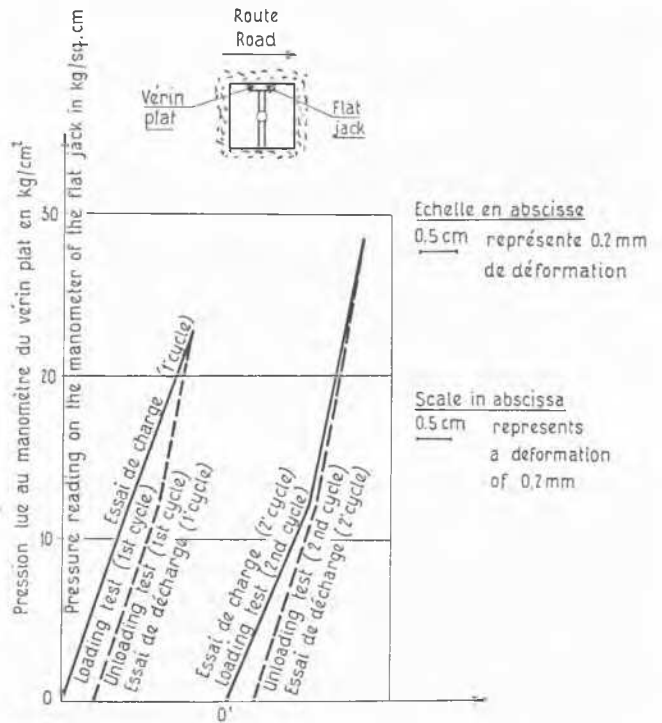


Fig. 4 Puits No 1 Essai No 2 à 5 m de profondeur
Shaft No. 1 Test No. 2 at 5 m Depth

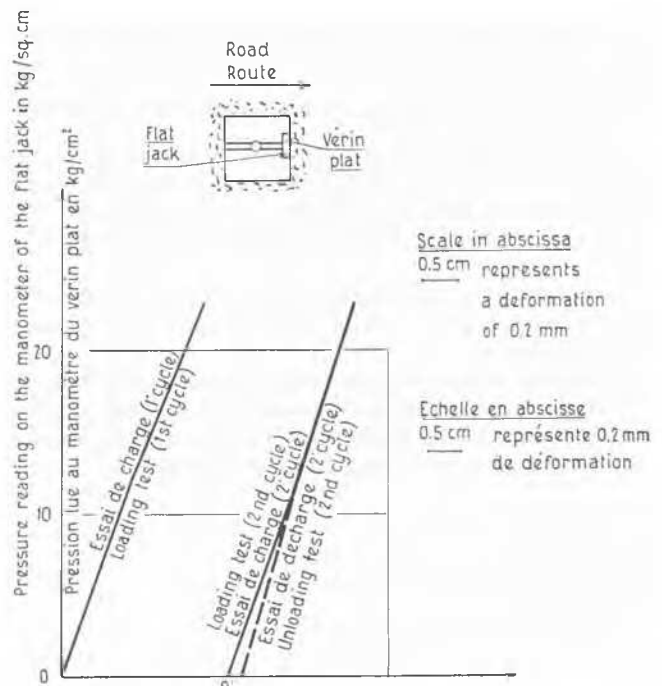


Fig. 5 Puits No 1 Essai No 1 à 5 m de profondeur
Shaft No. 1 Test No. 1 at 5 m Depth

d) Les déformations ont été sensiblement linéaires jusqu'à l'apparition des fissures qui ont provoqué le détachement des blocs de roche.

Interprétation des essais

La force horizontale F résultante des efforts du vent crée un moment de renversement M_F par rapport au plan de fondation, tel que $M_F = FH$, où H est la distance de la force F au plan de fondation.

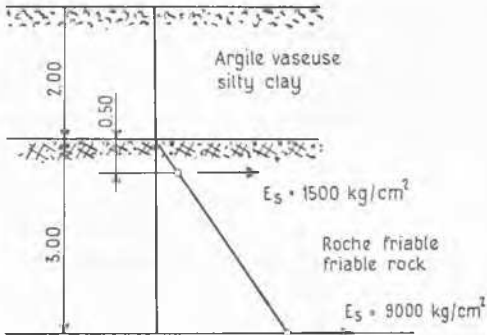


Fig. 6 Variation du module d'élasticité horizontale avec la profondeur
Variation of Horizontal Young's Modulus in Function of the Depth

Les moments résistants définis ci-après sont calculés par rapport à l'intersection de l'axe de l'ouvrage et du plan de fondation. Les réactions sur les parois verticales des massifs engendrent un moment résistant M_S dont le calcul peut être fait en utilisant la méthode indiquée par Sulzberger (1945).

Les réactions sous les massifs créent un moment M_B . Il y a équilibre lorsque $M_F = M_B + M_S$ et cet équilibre doit être réalisé pour la valeur de l'angle de rotation α de l'axe de l'ouvrage envisagé. Le calcul de M_B et de M_S est basé sur la connaissance du module de réaction K du sol. On sait que le module de réaction ne représente pas une caractéristique intrinsèque du terrain, mais dépend de la forme et des dimensions de la surface d'appui. Pour un appui rigide et circulaire de diamètre D , la valeur de K est liée au module d'élasticité E par la formule $K = \frac{4E}{(1-\sigma^2)\pi D}$, où σ est le coefficient de Poisson.

Le module d'élasticité pris en compte pour le calcul du moment résistant M_B a été supposé constant et égal à la valeur mesurée dans le plan de fondation, car les dimensions des massifs sont faibles vis-à-vis de l'épaisseur du rocher sous-jacent.

Par contre, nous avons admis pour le calcul de l'encastrement latéral, une loi de variation linéaire du module d'élasticité (Fig. 6), car:

- 1° cette loi représentait assez bien, les résultats trouvés;
- 2° cette répartition figure au nombre des hypothèses plausibles indiquées par M. Hruban (1944) dans sa théorie générale des Solides semi-infinis à module d'élasticité variable.

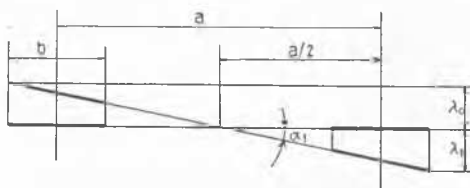


Fig. 7 Tassement initial et rotation des appuis
Initial Settlement and Rotation of the Foundations

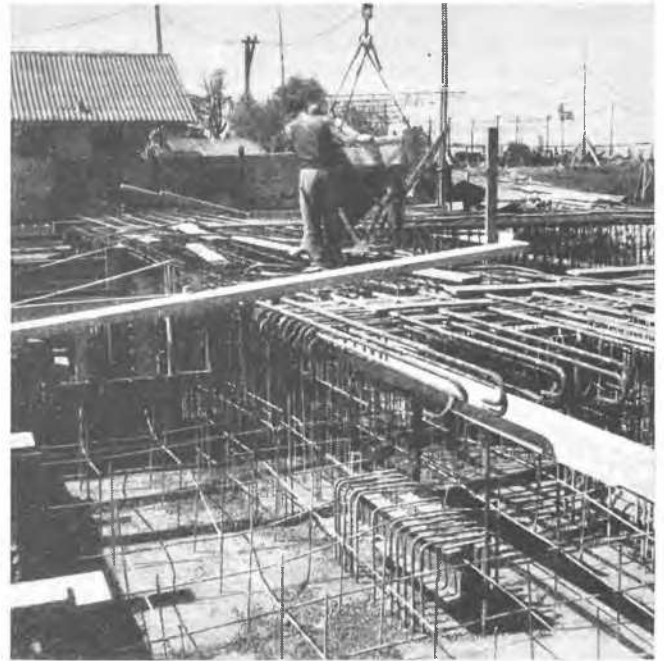


Fig. 8 Exécution du béton armé des massifs de fondation
Execution of Reinforced Concrete of the Foundations

Le calcul montre que le moment dû à l'encastrement latéral est négligeable.

Calcul du moment résistant dans le plan de fondation M_B (Fig. 7)

Sous le poids propre de l'ouvrage, l'assise de fondation subit un tassement élastique λ_0 . Considérons maintenant la position des appuis après rotation. Pour cette position on peut écrire:

$$M_B = 4 \int_{\frac{a-b}{2}}^{\frac{a+b}{2}} Kx^2 \operatorname{tg} \alpha b dx = \frac{b^3}{3} K \operatorname{tg} \alpha (b^2 + 3a^2)$$



Fig. 9 Travaux terminés
Completed Work

où a est la distance entre les axes des massifs de fondation carrés de côté b .

Cette relation est vraie pour toute rotation

$$a \leq a_1, \quad a_1 \text{ telle que } \operatorname{tg} a_1 = \frac{2(q - q_i)}{K(a + b)}$$

(q étant la pression totale et q_i la pression initiale due au poids des terres).

L'égalité $M_F = M_B$ donne $\operatorname{tg} a$ correspondant à un déplacement horizontal au sommet de l'ouvrage imputable à la seule rotation des massifs de fondation.

La surcharge due au poids propre de l'ouvrage et transmise à la base des massifs étant $(q - q_i)$ et la rotation maximum produisant une surpression $K \frac{a}{2} \operatorname{tg} a$, la pression totale maximum est $(q - q_i) + \frac{Ka}{2} \operatorname{tg} a$. Cette dernière valeur doit être inférieure à la limite des déformations élastiques déterminée à partir des essais de charge.

Réalisation

Les travaux ont duré du 23 janvier au 23 juin 1952, sans interruption. Les fouilles ont nécessité l'enlèvement au Derrick de 900 m³ de roche. La continuité du rocher a été vérifiée, en fond de fouille, à l'aide de sondages au fleuret. Afin d'augmenter la surface de contact entre les massifs de fondation et le rocher, les surfaces verticales des fouilles ont été laissées brutes avec leurs aspérités. Aucun coffrage n'a été fait sur les parois extérieures des 4 blocs principaux, jusqu'au niveau de la surface de séparation entre le rocher et les terres de surface (Fig. 8, 9).

La fondation a été assise sur la roche saine à 6 m de profondeur, à 1 m en contrebas du niveau des essais de charge.

Références

- Hruban, M.* (1944): Bulletin International de l'Académie Tchèque des Sciences. Extrait publié dans la Revue Rozpravy II tridy Ceske akademie, n° 13.
- Sulzberger, G.* (1945): Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens.