

P11

La mesure des contraintes dans les fondations rocheuses
et sur les ouvrages en béton à E. D. F.

Stress measurement in rock foundations
and in concrete structures at Electricité de France

Anstrengungsermittlung in felsigen Unterbauten
und Betonwerken am E. D. F.

par G. COMES (1) et J. LAKSHMANAN (2)

Résumé — Electricité de France depuis 20 ans réalise, ou fait réaliser par des entreprises privées, des mesures de la contrainte tangentielle que ce soit à la paroi d'excavations souterraines ou sur les parements de galeries dans les ouvrages en béton.

Différentes méthodes de mesures ont été utilisées, actuellement les mesures sont réalisées à l'aide du procédé consistant à ouvrir une saignée puis à glisser un vérin plat dans la fente et à gonfler le vérin jusqu'à annuler la déformation due à l'ouverture.

Les auteurs décrivent les divers procédés de foration employés. Parallèlement ils justifient tant sur le plan théorique que pratique la profondeur de la saignée par rapport à sa longueur et surtout par rapport à l'épaisseur de la zone décomprimée au pourtour de l'excavation.

Les résultats expérimentaux semblent être fonction de l'histoire tectonique des matériaux.

L'interprétation des mesures permet de formuler un certain nombre de conclusions pratiques concernant la stabilité des excavations souterraines.

Summary — Since 20 years, Electricité de France, or its consulting firms, has carried out measurements of tangential stresses on the wall of underground openings or along tunnels in concrete structures.

Different methods have been used, the present technique consists in opening a cut in which a flatjack is inserted, and in increasing the pressure in the jack until the initial strain is restored.

The authors describe the different drilling procedures used. They then justify, theoretically and experimentally the depth of the cut compared to its width and to the thickness of the decompressed zone around the opening.

Experimental results seem to depend on the rocks' tectonic history. Interpretation of the measures gives a certain number of practical conclusions concerning the underground opening's stability.

(1) Direction Equipement E. D. F.
(2) Compagnie de Prospection Géophysique Française.

Zusammenfassung — Seit 20 Jahren, ausführt oder durch Privatgeschäften ausführen lässt E. D. F., Ermittlungen im Bereich der tangentialen Anstrengungen, entweder an Wänden von unterirdischen Aushölen, oder an Verblendungen der Gängen in Betonwerken.

Verschiedene Ermittlungsmethoden wurden angewandt. Gegenwärtig sind die Massen mittels eines Verfahrens erfüllt, wodurch ein Schlitz ausgegraben wird, und dann wird eine Druckkissen darin hineingedrückt, der aufgepumpt wird, so dass die durch Ausgrabung veranlasste Verzerrung ausgeglichen wird.

Die Verfasser beschreiben die verschiedene angewandte Anbohrverfahren. Sie erklären, ebenso theoretisch als praktisch, die Rechtmässigkeit der Verhältnisse, einerseits zwischen Tiefe und Länge des Schlitzes, und andererseits, besonders, zwischen Tiefe des Schlitzes und Dicke der von Druck freigelassenen Zone um Aushöhlens herum.

Wahrscheinlich sind erfahrungsmässige Ergebnisse mit tektonischen Geschichte der Stoffen verbunden.

Die Ausdeutung der Ergebnisse erlaubt, einige praktischen Schlussfolgen abzuziehen, die die Stabilität der unterirdischen Aushöhlen betreffen.

1. Introduction

Electricité de France, depuis 1949, réalise ou fait exécuter, par des entreprises privées, des mesures de la contrainte tangentielle que ce soit à la paroi d'excavations souterraines ou bien sur les parements de galeries desservant les ouvrages en béton.

Toutes les méthodes d'essais utilisées sont basées sur le principe de la libération des contraintes. La mesure consiste à isoler, par découpage mécanique, l'emplacement de l'essai du champ de contrainte auquel il est soumis. Au cours du découpage on mesure, par tous procédés, les déformations de l'élément de paroi ainsi isolé.

Au cours de cette période de 20 ans les différentes méthodes de mesures mises en oeuvre se sont plus ou moins opposées. Elles se groupent en fait en deux tendances bien distinctes:

- *la méthode indirecte* [1] (la plus ancienne) qui nécessite après avoir obtenu «in situ» l'amplitude des déformations après découpage, de mesurer sur échantillons en laboratoire le module de Young et le coefficient de Poisson afin de permettre par le calcul la détermination de la contrainte cherchée.
- *la méthode directe* [2] qui nécessite après l'exécution du découpage rectiligne de sceller un vérin plat dans la saignée. La pression hydraulique développée par le vérin qui permet de ramener l'écartement des bases de mesure à leur valeur d'origine correspond à la valeur de la contrainte cherchée dans la limite du comportement réversible.

En ce qui nous concerne et depuis 1963 nous avons adopté la seconde méthode d'essais. L'utilisation de cette méthode présente pourtant quelques difficultés notamment en ce qui concerne la réalisation de la saignée dans les roches dures et compactes mais ces quelques inconvénients semblent mineurs par rapport à la validité des résultats obtenus.

2. Description de la méthode d'essais

A l'emplacement de l'essai le parement de la galerie doit être nettoyé et purgé sur une épaisseur de 0,20 m environ afin d'enlever la zone de peau ébranlée par le tir. Cette opération est exécutée sur une aire ayant pour dimensions $2 \times 1,50$ environ.

Ainsi est-il possible de réaliser une mesure de la contrainte verticale et une mesure de la contrainte horizontale (figure 1).

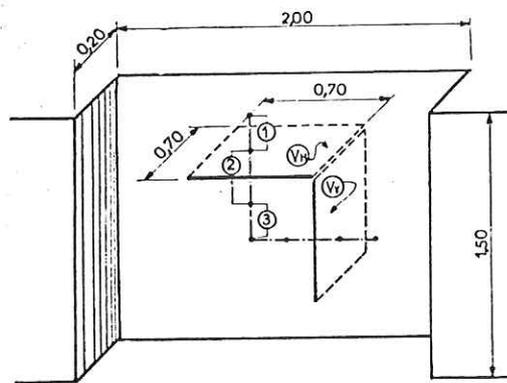


Fig. 1 — Schéma de principe d'un dispositif de mesure

- (1) (3) — Base de mesure de 200 mm
- (2) — Base de mesure de 300 mm
- V_H — Vérin plat horizontal pour la mesure de la contrainte verticale
- V_V — Vérin plat vertical pour la mesure de la contrainte horizontale

Les axes de mesure sont, de ce fait, orientés à 90° l'un par rapport à l'autre, chaque ligne de mesure ainsi formée se compose de 4 plots disposés symétriquement par rapport au vérin; le plot central étant commun aux deux lignes. Les écartements des bases de mesure sont de 200 et 300 mm correspondants aux caractéristiques des dilatomètres mécaniques couramment utilisées [3].

Selon la dureté du matériau on exécute la saignée soit à l'aide:

- d'une perforatrice rotative équipée d'une mèche hélicoïdale, ce qui permet d'obtenir une saignée de 0,040 m d'épaisseur,
- d'un marteau perforateur muni d'un fleuret équipé d'un taillant. Dans ce cas l'épaisseur de la saignée est comprise entre 0,060 m et 0,080 m selon le diamètre de l'outil disponible.

Les vérins plats mis en oeuvre présentent les caractéristiques suivantes:

- longueur: 0,700 m
- largeur: 0,700 m
- épaisseur de la tôle d'acier: 20/10° de mm
- deux ajutages sur un même côté
- épaisseur du boudin: 0,025 m.

Chaque vérin plat est scellé dans son alvéole à l'aide d'un mortier très fluide ce qui impose de laisser durcir le scellement pendant environ 36 heures.

3. Mode opératoire

3.1 Pour les essais

Chaque mesure est entreprise séparément; en principe il est procédé de la façon suivante:

Mesure de la contrainte verticale

- A — Perforation de la saignée horizontale. Le mouvement des plots sur les deux axes de mesures est suivi au fur et à mesure du creusement de la saignée.
- B — Scellement du vérin. Au cours de la période de séchage du mortier les mesures sont poursuivies afin de préciser la valeur du différé.
- C — Mise en pression du vérin plat. Cette opération est réalisée par paliers. A chaque palier on note les mouvements de tous les plots.

La valeur de la contrainte tangentielle une fois déterminée on maintient la pression dans le vérin à la valeur obtenue.

Mesure de la contrainte horizontale

Il est procédé de la même façon que pour la contrainte verticale. On s'assure, au cours de toutes les opérations, que la pression dans le vérin horizontal reste constante (figure 2).

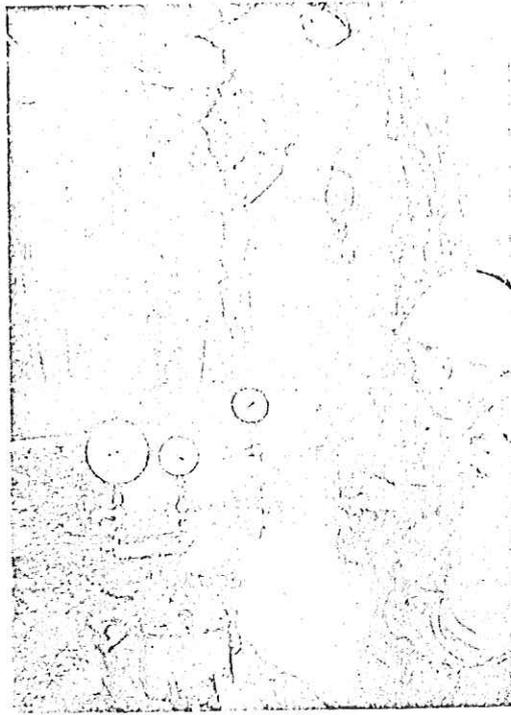


Fig. 2 — Vue générale d'une station d'essais

3.2 Pour exécuter la saignée

Il est possible de réaliser le creusement d'une saignée suivant différentes méthodes de foration. En ce qui nous concerne nous en avons imaginées et employées trois, qui dans l'ordre chronologique comportent:

- Le creusement sur toute la longueur de la saignée des tranches ayant environ 50 mm de profondeur. La réalisation de la saignée nécessite l'exécution de 12 à 14 passes environ (figure 3A).
- La foration, sur toute la profondeur de la saignée, de trous qui sont exécutés en partant de la gauche vers la droite [4]. (Le résultat est identique si l'on inverse le sens du creusement). L'ouverture de la saignée nécessite l'exécution de 8 à 12 forages (figure 3 B).
- La foration, sur toute la profondeur de la saignée, de trous qui sont exécutés à partir du centre de la saignée et qui s'en écartent alternativement à gauche puis à droite. Comme précédemment l'ouverture de la saignée impose la réalisation de 8 à 12 forages (figure 3C).

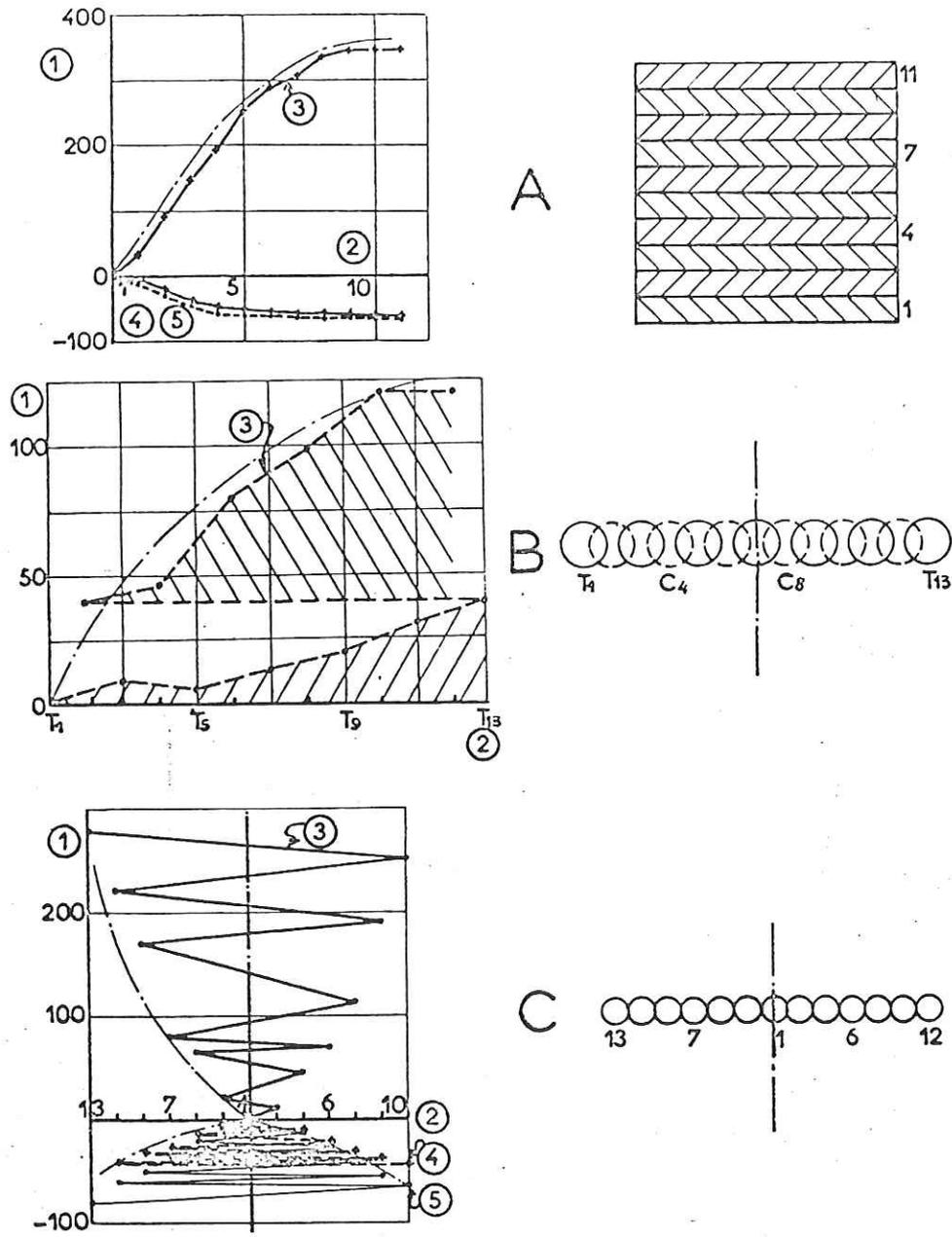


Fig. 3 — Schémas de découpage de la saignée

- A — Saignée continue sur toute la largeur (Venteuil)
- B — Forage sur toute la profondeur de droite à gauche (Vouglans)
- C — Forage sur toute la profondeur s'écartant de l'axe alternativement (Revin-Sisteron)
- (1) — Déformation due à l'ouverture de la saignée en microns
- (2) — Phases d'exécution de la saignée
- (3) (4) (5) — Bases de mesure extensométriques

— La mise en oeuvre de la première méthode de perforation nous a permis de déterminer, en fonction de la longueur de la saignée, la profondeur nécessaire à laquelle il faut creuser pour obtenir la décompression totale des matériaux. Le résultat est identique pour la roche comme pour le béton: il est nécessaire d'atteindre $\text{Profondeur/Largueur}=1$. Toutes les méthodes de foration conduisent en fait au même résultat en ce qui concerne l'amplitude de la déformation due à l'ouverture de l'excavation.

4. Résultats des essais

A. Sur les roches à la paroi d'excavation

Les résultats en notre possession permettent de disposer un catalogue de renseignements obtenus sur des matériaux d'origine et de nature très diverses, mais pour des hauteurs de recouvrement relativement voisines et compris entre 80 et 150 mètres.

B. Sur les bétons de barrage

En ce qui concerne les mesures sur les bétons, elles sont plus délicates à réaliser que sur les roches. Cela est dû aux faibles taux de travail auquel sont soumis les éléments d'ouvrages auscultés ce qui conduit à relever des amplitudes de déformation relativement petites, très proches de la précision de mesure du dilatomètre utilisé.

L'ensemble des résultats est réuni dans le tableau n° 1.

5. Interprétation

5.1 Justification théorique

Il convient de s'assurer que les caractéristiques géométriques du dispositif mis en oeuvre (largeur et profondeur du vérin, écartement des plots de mesure) permettent la mesure effective des contraintes naturelles. L'existence d'une zone décomprimée à la paroi d'une galerie (dès que la contrainte naturelle dépasse une valeur limite) fait que la dimension la plus critique est, de toute évidence,

TABLEAU n° 1

Nature et emplacement de l'essai	Hauteur de couverture verticale en mètres	Densité du matériau	Contrainte verticale théorique $2r_0$	Contraintes mesurées en bars		Rapport	
				verticale	horizont.	$v_v / 2r_0$	v_H / r_0
Roche	Calcaire vouglans — Vouglans	2,5	45,0	70	—	1,5	—
	Craie — Venteuil	2,2	29	32	16	1,1	1,1
		2,2	42	47	30	1,12	1,43
	Marnes noires — Sisteron	2,3	42	34	18	0,80	0,9
		Schistes métamorphiques — Revin	2,7	54	70	135	1,3
	2,7		90	86	—	0,95	—
Béton	Barrage de Rosclend (1)	2,5	46	47	—	1	—
	Barrage du Chambon (1)	2,5	20	20	—	1	—

(1) Mesures exécutées à la paroi de la galerie de visite à retenue partiellement vide.

la profondeur. Quant aux autres dimensions, l'expérimentation citée ci-dessus (paragraphe 3.2) montre qu'il faut avoir

largeur de saignée $\geq 0,8$
écartement des plots extrêmes

profondeur de la saignée $\geq 1,0$
largeur

Afin de connaître l'influence de la profondeur de la saignée, il convient de connaître la répartition des contraintes près d'une galerie en milieu élasto-plastique. Il paraît évident que les mesures réalisées à l'aide d'un vérin horizontal destiné à mesurer la contrainte tangentielle ($\sigma_t = 2\sigma_0$, à la paroi, en milieu élastique, hydrostatique) n'obtiendront qu'une fraction plus ou moins grande de $2\sigma_0$.

D'après Sirieys [5] les contraintes dans la zone plastique sont (dans l'hypothèse d'un champ hydrostatique).

$$\begin{cases} \sigma_r^p = 1/r \cdot d\Phi/dr \\ \sigma_t^p = d^2 \Phi/dr^2 \end{cases}$$

la fonction d'Airy Φ est donnée par

$$\Phi = r^2 \left[-H/2 + H (r/r_0)^m \cdot 1/m + 2 \right]$$

($H = c \cotg \varphi$, $m = 2 \sin \varphi / (1 - \sin \varphi)$ $r_0 =$ rayon de la galerie)

Dans la zone élastique, les contraintes sont

$$\begin{cases} \sigma_r^e = 1/r \cdot dF^1/dr \\ \sigma_t^e = d^2 F^1/dr^2 \end{cases}$$

avec

$$F^1 = \sigma_0 [r^2/2 - r^2 \cdot 0 \log r]$$

Le raccordement entre les deux zones se fait suivant un cercle de rayon RL .

$$(RL/r_0)^m = \sigma_0 + H/H \cdot 2/m + 2$$

Sur la figure 4, ont été tracés des courbes τ_t/σ_0 , τ_r/σ_0 en fonction de r (ces gammes recouvrent l'ensemble des roches étudiées par Electricité de France).

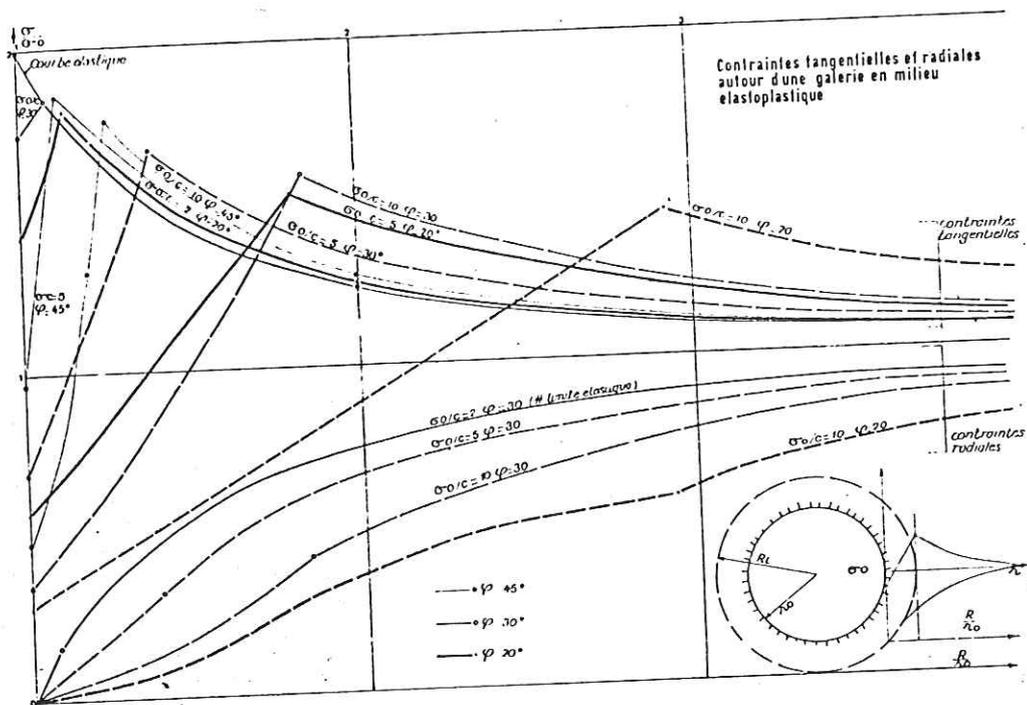


Fig. 4

Afin de calculer, à partir de ces graphiques, la contrainte moyenne mesurée par des vérins de différentes profondeurs, nous avons adopté successivement deux hypothèses simplificatrices.

Dans la première hypothèse, la pression d'annulation du vérin est donnée par la contrainte moyenne régnant dans la zone intéressée par le vérin:

$$\sigma_{i(v)} = 1/a \int_{r_0}^{r+a} \sigma_i \cdot dr$$

(où a est la profondeur du vérin).

Dans la deuxième hypothèse, nous avons supposé que la pression d'annulation était égale à la contrainte tangentielle la plus grande existante dans la zone intéressée par le vérin.

Suivant ces deux hypothèses, ont été tracés les graphiques 5a et 5b, indiquant la contrainte apparente (rapportée à la contrainte tangentielle théorique $2\sigma_0$) en fonction du rayon limite de la zone décompressée (et en supposant $r_0=1$ m, ce qui est le cas général des galeries de reconnaissance). Si l'on tolère une erreur maximale de 20 % sur la mesure de la contrainte (par rapport à la contrainte théorique en milieu élastique), on voit qu'un vérin peu profond ne pourra être utilisé que dans des roches de bonne qualité, ou sous des couver-

tures faibles. Le domaine d'utilisation de divers vérins est résumé par les tableaux suivants:

1ère hypothèse:

Profondeur du vérin (cm)		10	30	70	100
Domaine d'utilisation Rl/ro maximum)		1,10	1,22	1,30	1,43
Domaine d'utilisation $(\sigma/c$ maximum)	$\varphi = 22,5^\circ$	1,8	2,5	2,9	3,4
	$\varphi = 30^\circ$	2,2	3,4	4,2	5,4
	$\varphi = 37,5^\circ$	2,7	4,7	6,1	8,3
	$\varphi = 45^\circ$	4,2	8,0	10,7	14

2ème hypothèse:

Profondeur du vérin (cm)		10	30	70	100
Domaine d'utilisation (Rl/ro maximum)		1,15	1,31	1,54	1,60
Domaine d'utilisation (σ) $(c$ max)	$\varphi = 22,5^\circ$	2,1	2,9	4,3	4,8
	$\varphi = 30^\circ$	2,9	4,5	7	8
	$\varphi = 37,5^\circ$	3,8	6,4	10,5	12,2
	$\varphi = 45^\circ$	5,1	9,2	115,0	17,3

On voit que les deux hypothèses conduisent à des limites d'utilisation peu différentes, la principale différence étant que, dans la première hypothèse, la contrainte lue serait à corriger systématiquement, même en milieu purement élastique, par les multiplicateurs suivants:

Profondeur du vérin (cm)	10	30	70	100
$\frac{2 \sigma}{\sigma_{app}}$	1,50	1,13	1,24	1,30

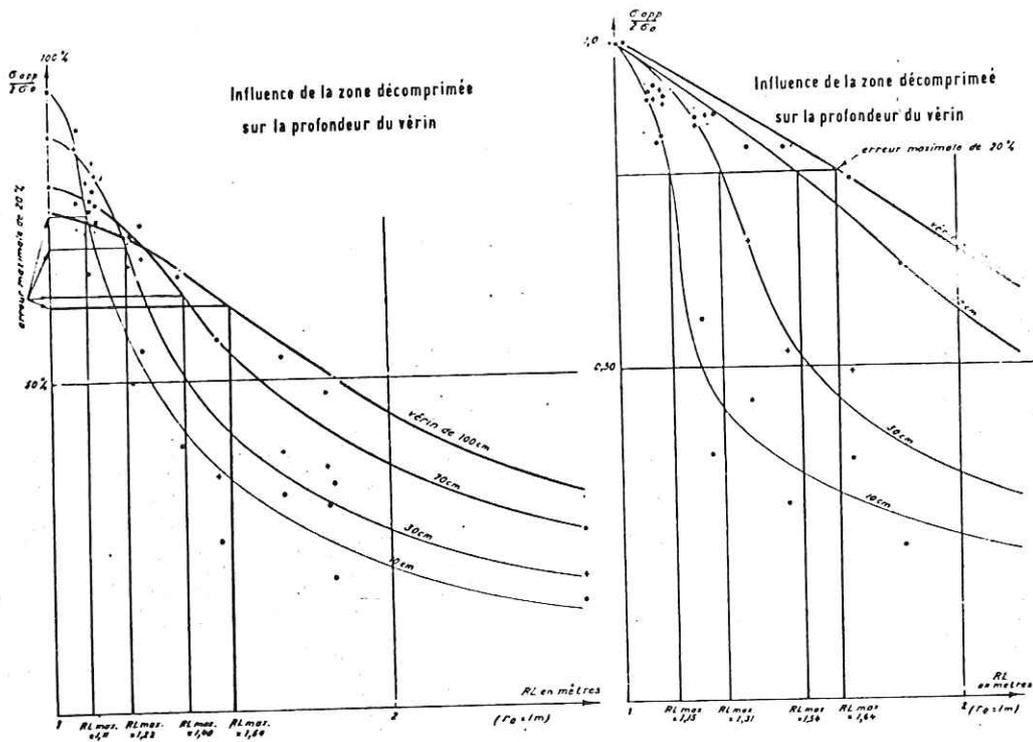


Fig. 5 a

Fig. 5 b

Il apparaît ainsi souhaitable d'employer un vérin le plus profond possible. Ainsi pour $\sigma_0=40$ et dans la 2ème hypothèse, un vérin de 10 cm de profondeur ne sera utilisable pour un matériau présentant des caractéristiques mécaniques suivantes:

$$c \geq 18,2 b, \quad \varphi = 30^\circ \quad \text{ou} \quad c \geq 9,5 b, \quad \varphi = 45^\circ$$

alors qu'un vérin de 70 cm sera utilisable pour un matériau ayant des caractéristiques suivantes:

$$c \geq 9,5 b, \quad \varphi = 30^\circ \quad \text{ou} \quad c \geq 3,7 b, \quad \varphi = 45^\circ$$

Bien entendu, le choix du vérin de 70 cm pour les mesures réalisées à E. D. F. a été guidé aussi bien par des données théoriques, par l'expérimentation, et par la nécessité de réaliser un dispositif économiquement valable. C'est ainsi que nous avons renoncé à mettre en oeuvre des vérins de 100 ou 150 cm de profondeur.

5.2 Confrontation avec les résultats des mesures

Les résultats des mesures ont tendance à se grouper en deux familles (figure 6). Chacune de ces familles est caractérisée par des paramètres bien définis.

Groupe 1

Ce sont des matériaux sédimentaires n'ayant pas subi ou très faiblement d'effort tectonique. Ils présentent un état pseudo-plastique dû à l'absence de métamorphisme. Le relief à la verticale des emplacements de mesure est en pente douce.

Groupe 2

Dans ce deuxième groupe se placent les roches rigides ayant subi des efforts tectoniques. Le relief à la verticale des emplacements de mesure est très accentué. Si l'on voulait corriger les résultats, il faudrait prendre en considération une hauteur de recouvrement plus importante que celle obtenue directement par la verticale élevée à partir de l'emplacement de mesure.

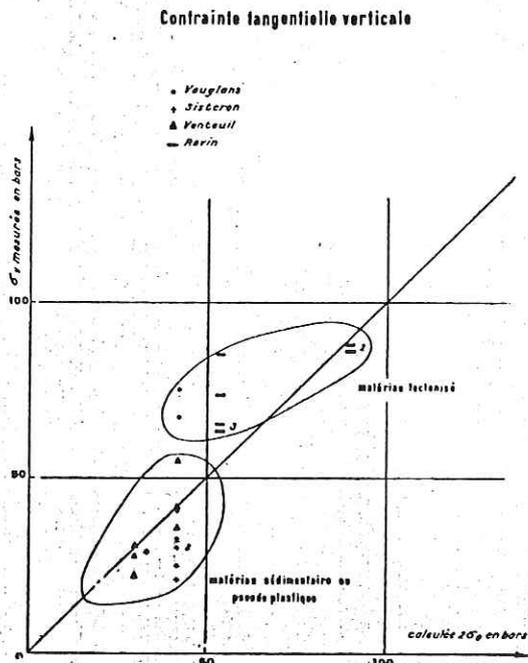


Fig. 6 a

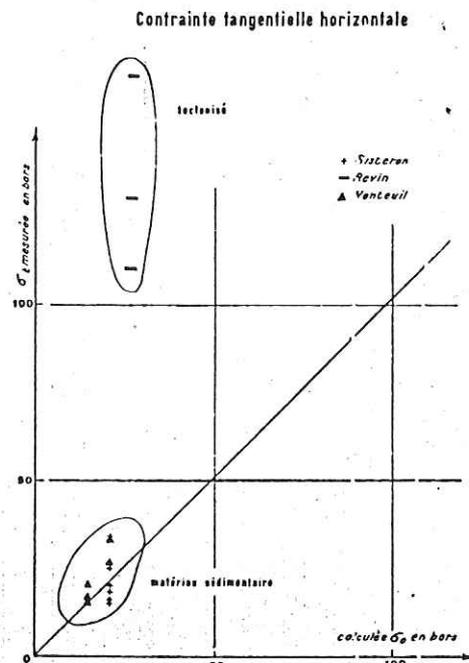


Fig. 6 b

Les roches étudiées constituant le deuxième groupe semblent avoir gardées le souvenir des efforts orogéniques qu'elles ont encaissées au cours des ères géologiques. La distorsion ainsi provoquée peut bien entendu venir se superposer à celle due à l'anisotropie stratigraphique.

Cette différence importante entre les deux groupes est confirmée par les quelques mesures de contrainte horizontale (voir figure 6-bis). Les roches du groupe 1 donnent des chiffres proches des valeurs calculées à partir de la loi de la couverture, alors qu'à Revin les contraintes horizontales sont très élevées.

6. Conclusions

Les mesures de contraintes réalisées par Electricité de France sur divers sites, par la méthode du vérin plat, permettent de formuler un certain nombre de conclusions pratiques concernant la stabilité des excavations, et, en particulier, par la comparaison de la valeur de la contrainte à la paroi avec celle de la résistance à la compression du matériau. Les mesures de contrainte à la paroi ont permis de mettre en évidence, pour certaines roches, des valeurs nettement supérieures à celles que donne la loi de la couverture, notamment en ce qui concerne les contraintes horizontales.

D'autre part, la validité de la méthode utilisée par E.D.F. a pu être justifiée sur le plan théorique. Il a été montré la grande importance de la profondeur de la saignée par rapport à sa largeur, et surtout par rapport à l'épaisseur décomprimée.

Références bibliographiques

- [1] J. TALOBRE — *Dix ans de mesures de compression interne des roches. Progrès et résultats pratiques*, 1959.
- [2] A. MAYER, P. HABIB, R. MARCHAND — Congrès des Pressions des terrains, Liège, 1951
- [3] E. TINCELIN — Thèse en doctorat de l'Université de Nancy — Pression et déformations de terrain dans les mines de fer de Lorraine, 1958.
- [4] M. MARY, P. DUFFAUT, G. COMES — Connaissance mécanique du rocher par sondages et saignées — Q. 32, R. 44, 9ème C. I. G. B. Istamboul.
- [5] P. M. SIRIEYS — Champs de contraintes autour des tunnels circulaires en élastoplasticité, *Felsmechanik und Ingenieurgeologie*. Springer Verlag, Wien, 1964.