LA HOUILLE BLANCHE

ÉDITIONS B. ARTHAUD, Succ^r de J. REY, GRENOBLE

Pour la Rédaction :	Abonnement	{ France..... 40 francs	Pour les Abonnements et Annonces :
S'adresser à M. P. PAGNON	pour une Année	{ Etranger..... 50 francs	S'adresser à M. B. ARTHAUD
Secrétaire Général	Le Numéro : 7 francs		Editeur
19, Boulevard Gambetta, 19	Compte Chèques Postaux LYON 5-84		23, Grande-Rue, 23
GRENOBLE			GRENOBLE

COMITÉ DE DIRECTION SCIENTIFIQUE

BARBILLION, Professeur titulaire d'Electrotechnique à la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble.

CAMICHEL, Directeur de l'Institut Electrotechnique de Toulouse.

CHALUMEAU, Ingénieur en chef de la ville de Lyon.

DARRIEUS, Ingénieur des Arts et Manufactures.

DUVAL, Directeur des Services électriques de la Société Générale d'Entreprises

FLUSIN, Directeur de l'Institut d'Electrochimie et d'Electrometallurgie de Grenoble.

GENISSIEU, Ingénieur en chef au Ministère des Travaux Publics.

GRIGNARD, Membre de l'Institut, Doyen de la Faculté des Sciences, Directeur de l'Ecole de Chimie Industrielle de l'Université de Lyon.

MAUDUIT, Directeur de l'Institut Electrotechnique et de Mécanique appliquée à Nancy.

MERCIER, Administrateur-Délégué de l'Union d'Electricité.

DE PAMPELONNE, Inspecteur général du Génie Rural.

PARODI, Directeur honoraire des Services d'Electrification de la Compagnie des Chemins de fer d'Orléans

PEPY, Professeur à la Faculté de Droit de Grenoble.

PAGNON, Ingénieur I. E. G., Secrétaire général

SOMMAIRE

HYDRAULIQUE. — Note IV sur le coup de bélier : Méthode de contrôle des galeries et conduites forcées. Cas des « galeries cuirassées ». Cas des barrages, par Charles JAEGER, ingénieur diplômé E. P. F., docteur ès sciences techniques — Sur le degré d'irrégularité des régleurs de turbines et l'influence de l'asservissement de marche à vide Escher-Wyss (A propos d'une étude de M. GAGG), par L. BARBILLION, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble.

ELECTRICITÉ. — L'électrification des chemins de fer en Suisse (*suite et fin*), par G. KOLOVITCH, ingénieur I. E. G.

DOCUMENTATION.

LÉGISLATION. — Le mois fiscal, par R. et J. LEFEBVRE. — Principales dispositions de la « loi tendant au rétablissement de l'équilibre budgétaire » : Impôts directs, Régrèvements en matière de droits d'enregistrement et de taxes sur les sociétés, Loi du 23 Décembre 1933. — Amortissements non passés en écritures. — La cession d'actions d'apport dans la période de non négociabilité. Droit de mutation non exigible lorsque les immeubles faisant partie de l'apport ont été vendus par la Société avant la cession. — Nouveau statut des actions à vote privilégié, régime fiscal applicable à l'adaptation.

INFORMATIONS. — **BIBLIOGRAPHIE.**

HYDRAULIQUE

Note IV sur le coup de bélier ⁽¹⁾

Méthode de contrôle des galeries et conduites forcées — Cas des « galeries cuirassées » — Cas des barrages

par Charles JAEGER, Ingénieur diplômé E. P. F., Docteur ès-sciences techniques.

I. — GÉNÉRALITÉS

Le tragique accident survenu le 4 Janvier 1934 aux installations des Lacs Blanc et Noir, dans les Vosges, soulève nombre de problèmes techniques de la plus haute importance.

(1) Charles Jaeger : « *Théorie générale du coup de bélier — Application au calcul des conduites à caractéristiques multiples et des chambres d'équilibre* », Dunod, Paris, 1933. Voir également *Le Génie Civil* du 23 Décembre 1933. Ce travail sera complété par une série de notes, numérotées dans l'ordre chronologique de rédaction. Ce sont : Note I, sur une méthode graphique générale parue dans *La Revue Générale de l'Electricité* du 17 Mars 1934. Note II, relative à l'influence du coup de bélier sur le réglage des turbines, parue dans la *Schweizerische Bauzeitung*, nos 6 et 7, tome I, 1934. Note III, sur la méthode Gibson, dans le cas d'une conduite quelconque, paraîtra incessamment.

D'une façon générale, la notion de la « sécurité » d'une installation est à réviser sur maint point. Les remarques qui suivent ont pour but d'apporter une contribution à l'étude des galeries sous pression et, particulièrement, de celles protégées par un manchon en béton, ou par une cuirasse métallique. On peut étendre nos résultats aux conduites forcées de construction hétérogène et — cas très importants — à l'étude et à la surveillance des barrages.

Les travaux du récent Congrès international des barrages (1) ont permis de dégager deux principes essentiels : la nécessité de prospecter scientifiquement le terrain où le barrage sera implanté, et l'utilité d'une surveillance continue de l'ouvrage d'art une fois achevé. A cet effet, on a mis récemment

(1) A. Genthial : *Le premier Congrès des grands barrages*, Stockholm, Juin-Juillet 1933, *Le Génie Civil*, du 7 Octobre 1933.

au point les méthodes les plus diverses. Citons, par exemple, la prospection du sous-sol au moyen de sondages électriques (1), ou, d'ondes ébranlant la sol (2), d'autre part, la surveillance du barrage au moyen d'appareils sonores noyés dans le béton, la mesure des déformations élastiques du massif de béton, au moyen de pendules, ou par visées optiques (3). Il est évident que ces diverses méthodes ne font que compléter les procédés anciennement connus, que l'on continuera à utiliser parallèlement ; soit : établissement d'une carte géologique générale, sondages, galeries de sondages, etc., d'une part ; d'autre part : inspection du barrage, jaugeage des pertes d'eau, etc.

En regard de tout ce qui a été tenté en vue d'augmenter la sécurité des barrages, et de les soumettre à un contrôle constant, il nous semble qu'il est indispensable de chercher à assurer une sécurité analogue aux conduites forcées et aux galeries en charge. Car, une rupture de conduite peut être aussi grave, on l'a vu, qu'une rupture de barrage.

Nous nous arrêterons aujourd'hui principalement au cas des galeries en charge et, plus particulièrement, à celles revêtues d'un manchon de béton ou d'une cuirasse. L'extension de nos calculs à d'autres cas ne présentera aucune difficulté.

L'avantage essentiel des types mentionnés réside dans leur résistance en cas de rupture de la cuirasse. Le rocher, même fissuré, oppose, par sa masse et son épaisseur, une résistance aux voies d'eau.

Par contre, on fera, à ces types, deux objections graves : les calculs statiques de la cuirasse supposent que l'on connaisse avec une approximation suffisante la valeur du coefficient d'élasticité moyen du rocher en place. Or, on ne connaît, par des mesures de laboratoire, que le seul coefficient de blocs de rocher isolés de leur milieu ou, exceptionnellement, le coefficient élastique local en quelques points, obtenu par mesure directe. Nous montrerons plus loin que l'ingénieur, insuffisamment renseigné, peut se tromper de plus de 100 % dans l'estimation des tensions réelles de l'acier de la cuirasse. D'autre part, une pareille galerie ne peut être visitée que de l'intérieur, après arrêt de l'usine et vidange de la conduite. Une visite locale révélera d'ailleurs difficilement les défauts du système et ne permettra que de vagues hypothèses sur leur portée réelle. Il sera impossible de déceler des défauts du rocher, caché par la cuirasse. La vidange de la galerie, répétée, est enfin une cause de fatigue exceptionnelle pour cette dernière, en la mettant brusquement en tension sous la pression des eaux extérieures d'infiltration accumulées derrière le revêtement.

La méthode de contrôle que nous proposons fait tomber ces deux objections : le système de galerie, cuirassée ou non, serait alors le système le mieux garanti contre tout danger de rupture et contre ses conséquences éventuelles.

II. — PRINCIPE DE LA MÉTHODE

Le principe de la méthode consiste à mesurer la vitesse de propagation d'une onde dans la conduite, ou la galerie, et d'en déduire, soit le coefficient d'élasticité moyen du rocher en place, si le rocher est nu, soit le coefficient d'élasticité appa-

rent de la cuirasse, si la galerie est revêtue d'un manchon en béton ou d'une cuirasse, soit, enfin, la valeur réelle des tensions de la tôle d'acier. A cet effet, on mesurera la vitesse des ondes sur des parcours limités, de façon à pouvoir localiser aisément tout défaut et, surtout, afin de pouvoir tirer des conclusions valables des formules données par la théorie de l'élasticité des conduites et galeries.

Nous supposons que cette théorie est connue en principe et renvoyons, pour le détail des calculs, à notre ouvrage « Théorie générale du coup de bélier ». (1)

III. — ANALYSE DES CAS PRINCIPAUX ET EXEMPLES NUMÉRIQUES

a) La galerie est creusée dans le rocher nu. — Nous avons vu plus haut que la donnée la plus importante du calcul des cuirasses était le coefficient d'élasticité moyen du rocher en place.

Dans le cas d'une galerie destinée à recevoir un manchon ou une cuirasse, la prospection par ondes est donc tout à fait indispensable. Elle sera très utile, également, dans la cas où le rocher reste nu.

Supposons que l'on puisse noyer un secteur de la galerie, encore non revêtue. La célérité, ou vitesse de propagation d'une onde est donnée par la formule :

$$[105] \quad a = \sqrt{\frac{g/\gamma}{\frac{1}{\epsilon} + \frac{2}{E_2}}} \quad (1)$$

dont on tire le coefficient d'élasticité :

$$E_2 = \frac{2}{\frac{g}{\gamma a^2} - \frac{1}{\epsilon}} \quad (2)$$

dans laquelle le module d'élasticité de l'eau est :

$$\epsilon = 2,07 \times 10^8 \text{ kg/m.}$$

Pour un rocher excellent, nous pouvons admettre :

$$E_2 = 3 \times 10^9 \text{ kg/m}^2,$$

mais il se peut que, sur certains secteurs de roche mauvais, E_2 descende à $1 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$. Nous verrons plus loin qu'une cuirasse d'épaisseur donnée, calculée avec

$$E = 2 \text{ à } 3 \times 10^9 \text{ kg/m}^2,$$

serait dangereusement compromise si E_2 tombait à

$$1 \times 10^9 \text{ kg/m}^2.$$

Calculons donc la célérité a pour les deux valeurs extrêmes de E_2 .

On trouve pour

$$E_2 = 3 \times 10^9 \text{ kg/m}^2, \quad a = 1336 \text{ m/sec.}$$

$$E_2 = 1 \times 10^9 \text{ kg/m}^2, \quad a^1 = 1197 \text{ m/sec.}$$

(1) Charles Jaeger : *Théorie générale du coup de bélier*, p. 119 et ss.

(2) Les chiffres entre crochets se rapportent à notre ouvrage cité : *Théorie générale du coup de bélier*.

(1) Lugeon : *Barrages et Géologie*, Paris et Lausanne 1933 ; p. 40.

(2) A. Creis et J. Cadisch : *Seismische Sondierungen im Dienste der Kraftwerkgeologie*, *Schweizerische Bauzeitung*, 8 Avril 1933.

(3) Juillard : *La recherche et la mesure des déformations dans les grands barrages en béton*, *Le Génie Civil*, du 21 Octobre 1933.

Le rapport des deux célérités est

$$\frac{a}{a'} = \frac{1336}{1197} = 1,114.$$

C'est-à-dire que la célérité peut varier de 10-12 % selon la nature du rocher.

Supposons que les divers points de mesure des célérités soient distants de 10 à 50 m, selon le cas, et que, sur une distance pareille, le rocher est relativement homogène. Il suffirait, en ce cas, d'estimer la célérité a sur chaque secteur avec une approximation de 1 %

b) Application de la relation (2) à l'étude des barrages. — La formule (2) est applicable sans autres au cas des barrages.

La méthode de mesure des célérités dans une galerie creusée en plein rocher permettrait de prospector systématiquement le sol de fondation d'un barrage en utilisant les trous de sondage ou les galeries d'exploration. Il serait des plus utile de connaître le coefficient d'élasticité moyen du rocher en place sur toute l'étendue, et en profondeur, des fouilles. Il en résulterait de même des variations de ce coefficient, à la suite d'un traitement par injections de lait de ciment, par exemple. Le mode de prospection que nous proposons compléterait avantageusement les sondages accoustiques et électriques qui nous orientent sur la position de la roche en profondeur. Le barrage lui-même pourrait être l'objet de contrôles minutieux et périodiques. On utiliserait à cet effet les puits de drainage et les galeries de visite qui forment un réseau à l'amont du massif de béton, c'est-à-dire dans la partie la plus exposée à l'action des eaux d'infiltration. Il serait utile de compléter les données obtenues sur l'état du masque amont, soit en mesurant la propagation des ondes dans des galeries d'accès perpendiculaires au plan des drains, soit en plaçant des postes d'écoute à proximité du paroi aval et en notant le temps de parcours des ondes traversant la massif de béton lui-même. Cette méthode paraît praticable, à condition de choisir judicieusement l'amplitude des ondes et la disposition des points d'écoute.

Notons que les mesures que l'on effectue actuellement sur des barrages nous renseignent sur leur déformation générale résultante; les mesures directes de tensions n'ont pas donné de résultats décisifs. On voit donc l'avantage qu'il y aurait à mesurer le coefficient d'élasticité du béton en place dans un grand massif, et les variations dudit module. Nous ne connaissons à l'heure actuelle aucune expérience qui puisse nous fournir des indications sur ces divers points (1).

Il est évident que ces mesures devraient être répétées de temps à autre. C'est de la comparaison des résultats, que l'on tirera les renseignements les plus précieux, qui permettront de suivre, entre autres, l'amélioration progressive d'un béton, avec l'âge, ainsi que le prétendent certains auteurs ou, au contraire, sa désagrégation sous l'action des eaux d'infiltration (2).

c) Cas d'une cuirasse en tôle d'acier avec manchon de béton. (En négligeant le coefficient de contraction latérale du béton et du rocher). — Lorsque le béton n'est pas fissuré, nous avons :

$$[112] \quad a = \sqrt{\frac{g}{\frac{1}{\epsilon} + \frac{2b}{Ed}(1 - \lambda'_1)}} \quad (3)$$

(1) Juillard : *Le Génie Civil*, du 31 Décembre 1932, p. 659, et *Schweiz Bauzeitung*, des 9 et 16 Juillet et 6 Août 1932.

(2) Oren Reed : *Civil Engineering*, Avril 1932 et Juin 1933.
Réménieras : *Science et Industrie* (Travaux publics), Septembre 1933.

ou :

$$[114] \quad \lambda'_1 = \frac{\frac{b^2}{Ed}}{\frac{b^2}{Ed} + \frac{b}{E_1(c^2 - b^2)}(b^2 + c^2 - 2\lambda'_2 c^2)} \quad (4)$$

$$[113] \quad \lambda'_2 = \frac{\frac{2b^2}{c^2 - b^2}}{\frac{2b^2}{c^2 - b^2} + \frac{c^2 + b^2}{E_2}} \quad (5)$$

Dans ces formules :

b est le rayon de la cuirasse en tôle, d son épaisseur et c le rayon externe du manchon de béton. $E = 2 \times 10^{10}$ kg/m² représente le coefficient d'élasticité de l'acier, et $E_1 = 3 \times 10^9$ kg/m² le coefficient du béton (supposé très dense).

Dans ces conditions, on calcule sans difficulté que la tension dans la tôle, sous une pression d'eau p en kg/cm², est donnée par :

$$\sigma_e = p(1 - \lambda'_1) \frac{b}{d}; \quad (6)$$

dans le manchon de béton (pour $b < R < c$) :

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{p \lambda'_1}{c^2 - b^2} \left[b^2 - \lambda'_2 c^2 - \frac{(1 - \lambda'_2) b^2 c^2}{R^2} \right] \\ \sigma_t = \frac{p \lambda'_1}{c^2 - b^2} \left[b^2 - \lambda'_2 c^2 + \frac{(1 - \lambda'_2) b^2 c^2}{R^2} \right]; \end{cases} \quad (7)$$

et dans le rocher ($R > c$) :

$$\sigma_r = -p \lambda'_1 \lambda'_2 \frac{c^2}{R^2} \quad \text{et} \quad \sigma_t = p \lambda'_1 \lambda'_2 \frac{c^2}{R^2} \quad (8)$$

De plus :

$$\sigma_{\max} = \sigma_t - \frac{1}{m} \sigma_r \quad (9)$$

σ_r = tension radiale ; σ_t = tension tangentielle ;

$\sigma_{\max}$ = tension maximum ; $\frac{1}{m}$ = constante de Poisson.

Illustrons notre exposé par un exemple numérique. Soit :

$$b = 2,50 \text{ m. ; } c = 2,70 \text{ m. ; } d = 0,025 \text{ m.}$$

et effectuons les calculs successivement pour

$$E_2 = 1 \times 10^9 \quad \text{et} \quad E_2 = 3 \times 10^9.$$

On trouve pour

	$E_2 = 1 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$	$E_2 = 3 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$
$\lambda'_2 =$	0,75	0,856
$\lambda'_1 =$	0,858	0,938
$\bar{E} =$	$1,41 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$	$3,23 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$
$a =$	1252 m/sec.	1340 m/sec.
$\sigma_e =$	14,2 p kg/m ²	6,2 p kg/m ²

Dans ce tableau, $\bar{E}$ désigne le coefficient d'élasticité apparent de la conduite cuirassée, qui, introduit dans la formule (1), donnerait la même célérité que celle calculée au moyen de (3), c'est-à-dire, dans notre cas :

$$\bar{E} = \frac{E d}{b(1 - \lambda'_1)} = \frac{2 \times 10^{10}}{10^2(1 - \lambda'_1)} \quad (10)$$

et

$$\sigma_e = p \frac{E}{\bar{E}}. \quad (11)$$

On voit que pour $\frac{b}{d} = 100$, la valeur $\bar{E}$ ne diffère que peu de E_2 . Le rapport des deux célérités a sera en ce cas :

$$\frac{a}{a'} = \frac{340}{1252} = 1,07,$$

soit une variation de 7 %, peu différente de la valeur trouvée précédemment. En ce cas également il suffirait de lire les célérités à 1 % près pour déceler, sous la cuirasse, une chute grave du module E_2 . Par contre, on voit l'énorme influence qu'exerce la valeur de E_2 sur σ_e , puisque le rapport des deux tensions serait :

$$\frac{\sigma'_e}{\sigma_e} = \frac{14,2}{6,2} = 2,29,$$

soit, un accroissement de 129 % de la tension !

On voit quel rôle capital joue la valeur de E_2 : C'est donc avec raison que nous préconisons la prospection scientifique du rocher, avant la mise en place de la cuirasse, seul moyen de donner quelque valeur aux calculs théoriques.

d) *Cas de rupture de la cuirasse.* — Examinons maintenant l'effet d'une rupture de la cuirasse, se produisant sur une longueur de 2 m., alors que les points de mesure seraient espacés de 10 m. en 10 m. La rupture de la cuirasse entraînerait celle du béton et du rocher, et nous estimons à $E_2 = 0,5 \times 10^9$ kg/m² le coefficient du rocher fissuré. Avant rupture, c'est la formule (3) qui serait valable, avec $E_2 = 3 \times 10^9$ kg/m². Après rupture, la cuirasse n'agit plus et nous appliquons la formule (1) qui donne :

$$a'' = \sqrt{\frac{\frac{g}{\gamma}}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{2}{E_2}}} = \sqrt{\frac{\frac{9,81}{10^3}}{\frac{1}{2,07 \times 10^8} + \frac{2}{0,5 \times 10^9}}} = 1052 \text{ m/sec.}$$

Le rapport des deux célérités serait donc :

$$\frac{a}{a''} = \frac{1340}{1052} = 1,274$$

Entre les deux points de repère, la célérité baisserait de 27 % sur $2/10 = 20$ % de la longueur. La perte de vitesse apparente sur 10 m. serait donc de $0,20 \times 27$ % = 5,4 %. Il suffirait de lire les célérités avec une approximation de 1 %, comme dans les cas précédents, pour déceler une rupture de la cuirasse, sans avoir à vider la conduite.

e) *Cas du béton et du rocher fissurés sous la cuirasse.* — Si l'on calcule les tensions maxima du béton au moyen des formules (7), on s'apercevra que, dans nombre de cas, le béton ne saura résister à ces tensions et se fissurera. En ce cas, la formule valable prend la forme :

$$[118] \quad a = \sqrt{\frac{\frac{g}{\gamma}}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{2b}{E d} (1 - \lambda_3)}} \quad (12)$$

où :

$$[117] \quad \lambda_3 = \frac{\frac{b^2}{E d}}{\frac{b^2}{E d} + \frac{c^2 - b^2}{2 c E_1} + \frac{b}{E_2}} \quad (13)$$

Les tensions seront données, dans l'acier, par :

$$\sigma = p (1 - \lambda_3) \frac{b}{d} = p \frac{E}{\bar{E}} \quad (14)$$

et, dans le rocher (pour $R > c$) :

$$\sigma_r = -p \lambda_3 \frac{b c}{R^2} ; \quad \sigma_t = p \lambda_3 \frac{b c}{R^2}$$

$$\text{et } \sigma_{\max} = \sigma_t - \frac{1}{m} \sigma_r \quad (15)$$

Reprenons notre exemple numérique. Nous trouvons pour :

$$E_2 = 1 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$$

$$E_2 = 3 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$$

$\lambda_3 = \dots$	0,83	$\dots$	0,983
$\bar{E} = \dots$	$1,177 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$	$\dots$	$2,98 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$
$a = \dots$	1222 m/sec.	$\dots$	1337 m/sec.
$\sigma_e = \dots$	17 p kg/cm ²	$\dots$	6,7 p kg/cm ²

Les fissures du béton ont comme effet de diminuer la valeur du coefficient apparent $\bar{E}$ et, surtout, d'augmenter sensiblement les tensions σ_e dans les tôles. La présence ou la formation de ces fissures sont décelées par un ralentissement dans la propagation des ondes.

Il est fort possible qu'en introduisant λ_3 dans les formules (15), on s'aperçoive que le rocher est, lui aussi, menacé de rupture, jusqu'à une distance $R_1 > c$ de l'axe de la conduite. Dans ce cas, nous assimilons le rocher fissuré au béton fissuré, en supposant égaux leur coefficient d'élasticité. Supposons que dans notre cas les fissures s'étendent sur une profondeur $R_1 = 5$ m qui remplacera c dans la formule (13). On trouvera alors :

$$E_1 = E_2 = 1 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$$

$$E_1 = E_2 = 3 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$$

$\lambda_3 = \dots$	0,741	$\dots$	0,896
$\bar{E} = \dots$	$0,773 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$	$\dots$	$1,92 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$
$a = \dots$	1149 m/sec.	$\dots$	1292 m/sec.
$\sigma_e = \dots$	25,9 p	$\dots$	10,4 p

On voit clairement l'influence nocive de la fissuration progressive de la roche sous la cuirasse et l'accroissement des tensions dans la tôle. Récapitulons : la célérité des ondes et les tensions prennent les valeurs suivantes :

	Béton sain		Béton fissuré		Béton et rocher fissurés	
	a m/sec.	σ_e kg/cm ²	a m/sec.	σ_e kg/cm ²	a m/sec.	σ_e kg/cm ²
$E_2 = 3 \times 10^9 \text{ kg/m}^2 \dots$	1340	6,2 p	1337	6,7 p	1292	10,4 p
$E_2 = 1 \times 10^9 \text{ kg/m}^2 \dots$	1252	14,2 p	1222	17 p	1149	25,9 p

La formation progressive de fissures dans le béton et le rocher peut doubler les tensions des tôles d'acier. Le danger croissant sera mis en relief par la chute de la célérité.

En fait, l'effet de la fissuration est encore plus néfaste que ne le laisse voir le tableau précédent : le béton et le rocher fissurés se dévalent et perdent peu à peu leurs qualités primitives. Leur coefficient d'élasticité baisse. Cet effet nocif s'ajoute au premier, et la valeur de a pourra tomber de 1340, non seulement à 1292, mais au dessous de 1200, 1150, ..., alors que les valeurs σ_e croîtront de 6,2 p à 10 p, ou 20 p.

On pourrait enfin utiliser la méthode des célérités pour déceler des sacs d'eau derrière un revêtement. En effet, le

module d'élasticité de l'eau est environ 1/10 du module du béton du rocher sain. Toute voie d'eau diminue la valeur du module apparent $\bar{E}$.

f) *Formule générale.* — Afin de bien mettre en relief la relation qui existe entre les tensions σ_e dans la tôle et la célérité a , nous pouvons combiner les équations (6) et (3) ou (4) et (12). On obtient alors la relation fondamentale :

$$\sigma_e = p \frac{E}{\bar{E}} = p \frac{E}{2} \left(\frac{g}{\gamma a^2} - \frac{1}{\varepsilon} \right) \quad (16)$$

Cette formule d'une belle simplicité, montre que σ_e dépend de p et de a seuls ; ε , E , γ , g étant des constantes connues. Les valeurs $\frac{b}{d}$, E_1 et E_2 (ces deux dernières, si difficiles à estimer) n'interviennent pas. La formule donne directement la valeur réelle de σ_e en fonction de p , quelle que soit l'épaisseur de la tôle. Si celle-ci se corrode sous l'action des eaux d'infiltration dans le béton et le rocher fissurés, le ralentissement de la célérité a nous renseignera immédiatement sur le fléchissement et la résistance de la tôle et sur l'accroissement des tensions spécifiques σ_e .

Remarquons enfin que la formule (16) est valable pour le cas d'une tôle nue non enrobée de béton, cas le plus fréquent des conduites forcées à l'air libre.

Soit $E = 2 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$; on trouve :

pour	$a = 900$	$\frac{\sigma}{p} = 72,8$
	1000	= 49,6
	1100	= 32,7
	1200	= 19,8
	1300	= 9,7
	1400	= 1,7

Ce tableau final met en relief l'importance capitale d'une auscultation périodique de la galerie cuirassée sur toute sa longueur. D'après l'exposé que nous venons de faire, on déduira, de la mesure des célérités, à la fois la valeur effective des tensions σ_e dans la tôle d'acier et les transformations plus ou moins profondes de la roche située derrière la tôle. On sera averti à temps de tout danger de rupture des tôles :

Afin de nous rendre compte de l'exactitude nécessaire aux mesures, nous admettons que la lecture des célérités se fasse à 1 % près. On calcule, en ce cas, qu'une erreur de 1 % dans la mesure de a entraîne une erreur de 4 % dans l'estimation de σ_e si a est voisin de 1000 m/sec. et une erreur de 8 % si a est voisin de 1300 m/sec. Si nous admettons que deux points de mesure des temps soient espacés de 10 m., et que nous voulions déceler les plus petits défauts du système, par exemple, une variation de E_2 sur 1 m. de distance, il faudra que l'exactitude de lecture de la célérité a soit de $\frac{1}{1000}$, ce qui est possible.

On effectuera ces mesures en disposant le long du trajet de l'onde des repères de quartz piézométrique, reliés à des amplificateurs et à un oscillographe à rayon cathodique, muni d'un dispositif d'enregistrement photographique. Le détail de l'installation variera, de cas en cas, selon le but que l'on se

propose : vérification générale ou recherche de défauts locaux, etc.

CONCLUSIONS

Nous avons, au cours de cette étude, suivi les diverses phases de contrôle auquel on soumettra une galerie :

Avant de poser la cuirasse, on prospectera le rocher nu, afin de déterminer son module d'élasticité moyen E_2 . Cette prospection est indispensable pour toute galerie destinée à être cuirassée, afin de déterminer expérimentalement les parties faibles qu'il faudra renforcer. Il sera très utile aussi de prospecter toute galerie destinée à rester sans revêtement ou avec un revêtement léger. On pourra, par cette méthode préciser les secteurs de la galerie qui devront être protégés spécialement. En ce cas, la prospection pourra être faite avec une installation portable, permettant une lecture à 1 % près sur des bases variant de 10 à 50 m.

Toute galerie cuirassée devra être vérifiée périodiquement avec un appareil de haute précision, donnant une exactitude de 1 % sur une base de 10 m., afin de déceler à temps toute surtension locale dans les tôles d'acier, et de suivre les progrès, plus ou moins lents, de la désagrégation toujours à craindre de la roche : formations de fissures ; accumulation d'eau d'infiltration derrière la cuirasse ; corrosion de la tôle par les eaux d'infiltration, etc. A l'heure actuelle, nous ne possédons aucun renseignement sur ces phénomènes, et aucun technicien ne peut se prononcer sur la durée probable d'une cuirasse. Seule, notre méthode d'auscultation par ondes permet de suivre année par année, mois par mois, les variations réelles des tensions dans les tôles d'acier.

Une vérification de la galerie est indispensable après tout accident, après un coup de bélier accidentellement trop brusque, à l'apparition de sources nouvelles sur le parcours de la galerie et, évidemment, dans tous les cas où un séismographe a décelé une perturbation locale dans la région.

Un pareil service de surveillance devrait être obligatoire. Les avantages qu'on pourrait en tirer sont de nature à faire préférer les galeries cuirassées aux conduites forcées à l'air libre, inesthétiques, vulnérables en temps de guerre et même en temps de paix (sabotage, accidents, etc.), et dont la rupture prend presque toujours une allure de catastrophe.

Nous pensons qu'on peut ainsi faire un grand pas vers la sécurité totale d'une installation. Notre théorie générale du « coup de bélier » nous permet de calculer la surcharge maximum qui peut se produire en un point quelconque de la conduite, notre méthode de mesure des célérités permet de déduire les tensions de la tôle d'acier des célérités mesurées. En combinant l'une et l'autre méthode on obtient les tensions maximales réelles. Le calcul et le contrôle permanent seront à la base de la sécurité de l'installation.

Rappelons enfin que notre méthode est applicable à la prospection des fouilles d'un barrage et au contrôle du barrage lui-même. Si nous avons moins insisté sur ce problème, ce n'est point que son importance soit moindre, au contraire ! Nous pensons, d'ailleurs, y revenir.