**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande

**Band:** 90 (1964)

**Heft:** 6

**Artikel:** Technique des mesures et résultats des essais à haute pression du puits blindé d'Electra-Massa (Valais)

**Autor:** Ott, J.-C.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-66977

**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:** 26.01.2026

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

90e année Lausanne, 21 mars 1964 N° 6

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

**ORGANE OFFICIEL**
de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole polytechnique fédérale de Zurich)

**COMITÉ DE PATRONAGE**
Président: E. Martin, arch. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosgurin, arch.; J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.; M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

**CONSEIL D'ADMINISTRATION**
de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; J. Favre, arch.; A. Robert, ing.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, Lausanne

**RÉDACTION**
D. Bonnard, E. Schnitzler, S. Rieben, ingénieurs; M. Bevilacqua, architecte
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, Lausanne

**ABONNEMENTS**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 an . . . . . | Suisse | Fr. 34.— | Etranger | Fr. 38.— |
| Sociétaires . . . . . | » | » 28.— | » | » 34.— |
| Prix du numéro . . . | » | » 1.60 | | |

Chèques postaux : « Bulletin technique de la Suisse romande », N° II 57 75, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à : Imprimerie La Concorde, Terreaux 29, Lausanne

**ANNONCES**
Tarif des annonces:

| | |
|---|---|
| 1/1 page . . . . . | Fr. 350.— |
| 1/2 » . . . . . | » 180.— |
| 1/4 » . . . . . | » 93.— |
| 1/8 » . . . . . | » 47.— |

Adresse: Annonces Suisses S.A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales

**SOMMAIRE**

Technique des mesures et résultats des essais à haute pression du puits blindé d'Electra-Massa (Valais), par J.-C. Ott, ingénieur-conseil, Genève.
Divers. — Organisation et formation professionnelles. — Les congrès.
Documentation générale. — Documentation du bâtiment. — Nouveautés, informations diverses.

# TECHNIQUE DES MESURES ET RÉSULTATS DES ESSAIS A HAUTE PRESSION DU PUITS BLINDÉ D'ELECTRA-MASSA (VALAIS)

par J.-C. OTT, ingénieur-conseil, Genève [1]

## 1. Conditions géologiques du puits blindé

Un essai modèle grandeur du comportement du rocher, avant la construction d'un puits blindé, n'a de sens que s'il est précédé d'une reconnaissance géologique assez poussée et si celle-ci confirme une certaine continuité dans la nature des roches traversées.

Ainsi, dans le cas qui nous occupe, le tracé du puits blindé a été reconnu par le géologue Dr A. Falconnier, qui a procédé à un classement des divers types de terrains rencontrés par le futur puits blindé, dont la longueur sera d'environ 1000 m, la pente de 80 % et la pression de service (coup de bélier non compris) 742 m. Les terrains rencontrés sont, comme on le voit sur la figure 1, dans le haut des granits et dans le bas des schistes cristallins, le plus souvent moyennement fracturés. Il a été reconnu que l'on peut considérer les schistes cristallins moyennement fissurés comme les plus représentatifs de l'ensemble.

C'est la raison qui motive l'emplacement de la chambre d'essais, dite d'Eichen, qui est située sous une couverture d'environ 100 m dans un rameau de la fenêtre d'accès, située à la cote 970 environ. L'inclinaison et la

[1] Conférence présentée le 9 novembre 1962, à Lucerne, devant les membres de la *Société suisse de mécanique des sols et des travaux de fondation*. Au début de son exposé, l'auteur s'est exprimé en ces termes :

« C'est une grande satisfaction pour moi que notre comité ait choisi pour la séance d'aujourd'hui le thème de la mécanique des roches. Cela non seulement parce que j'ai à cœur depuis des années l'étude de ces problèmes mais essentiellement parce que nos prédécesseurs tels que A. Heim et C. Andreae ont commencé lors de la construction des grands tunnels alpins des recherches à ce sujet qui furent à l'époque celles de pionniers.

» Tout d'abord, je voudrais remercier la Direction de la Société Générale pour l'Industrie et celle d'Electra-Massa, qui ont permis de porter à votre connaissance, avant le début des travaux, les résultats d'essais très coûteux. Ces sociétés apportent ainsi leur contribution à la recherche, au lieu de ne servir que leurs propres intérêts.

» Les essais en vue de la construction des puits blindés de l'aménagement d'Electra-Massa doivent être considérés comme un exemple de travail d'équipe entre ingénieurs civils, ingénieurs mécaniciens, géologues, chimistes et surtout électroniciens. Une telle collaboration des divers spécialistes est aussi souhaitable au sein de notre Société.

» Nos grands voisins dont les Alpes recouvrent le territoire, la France, l'Italie et l'Autriche, travaillent sur les mêmes problèmes depuis de nombreuses années.

» Les sociétés Electricité de France et Tiroler Wasser-Kräfte AG. nous ont fait participer à leur expérience et ont ouvert pour nous leurs dossiers. Cette collaboration internationale est aussi précieuse à nos yeux.

» J'exprime également mes remerciements à MM. *Robbe, Schmidt* et *Sacchi*, qui ont exécuté les essais sous la conduite de M. *F. Robert*. »

*(Réd.)*

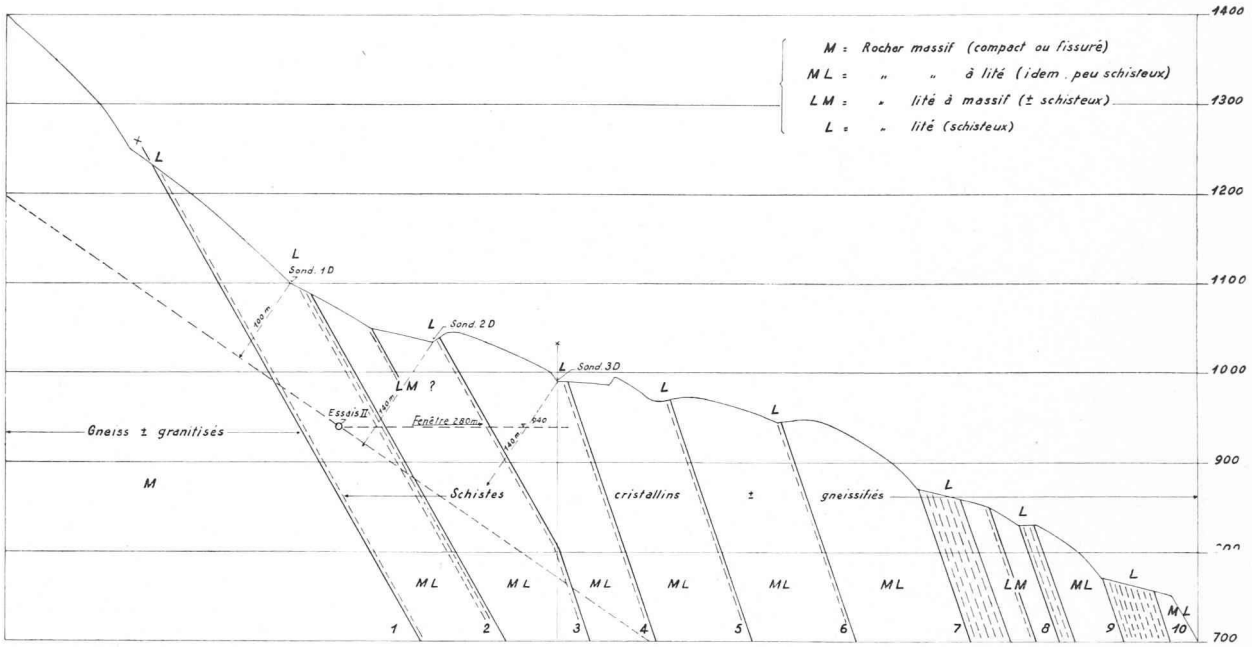



Fig. 1. — Profil géologique du puits blindé.

Rapport FALCONNIER du 19 mai 1958

direction de cette chambre sont celles mêmes du futur puits blindé. On a ainsi respecté l'angle d'intersection avec la direction des couches. Autrement dit, l'excavation se présente à peu près perpendiculairement à leur direction.

A l'emplacement de la chambre d'essais, on s'est trouvé vis-à-vis de schistes cristallins apparemment assez durs, recoupés par un certain nombre de diaclases et en particulier par une faille remplie de calcite et de quartz cristallisé (fig. 3).

## 2. But des essais

Ce n'est pas la première fois qu'une chambre d'essais est envisagée. Rappelons, par ordre chronologique, les essais plus connus : Kemano, Grande-Dixence, et chez nos voisins français : Montpezat, la Bathie de l'aménagement de Roselende. Dans les cas ci-dessus, le blindage avait une épaisseur telle, que sa limite élastique ne soit pas dépassée lors de la mise en service.

A quoi les essais d'Eichen se distinguent-ils des précédents ?

1. Tout d'abord dans le fait que l'on voulait pouvoir pousser aussi loin que possible l'investigation du rocher proprement dit ; c'est-à-dire diminuer l'épaisseur du blindage à la limite techniquement réalisable, pour explorer son comportement lorsqu'il ne joue que le rôle de pellicule étanche et que tous les efforts sont pratiquement reportés sur la roche.

2. Il s'agissait de connaître le comportement d'un blindage mince vis-à-vis de la pression de l'eau de nappe, contenue dans les fissures du rocher, qui, comme l'on sait, est à l'origine de divers incidents dans plusieurs aménagements suisses et étrangers : Rothbrunner, Handeck, etc.
   C'est donc l'étude du problème du flambage qui nous intéressait.

3. Nous voulions également examiner le comportement d'un système de drainage spécial par auréoles, de forages rayonnants pour voir si son comportement était encore satisfaisant après injection et si sa mise en place pouvait éventuellement dispenser le constructeur du puits de prendre d'autres mesures contre le flambage provoqué par la pression extérieure. Il y a lieu de préciser l'importance du problème du flambage, qui avec des tôles minces devient prépondérant non pas seulement dans la partie supérieure du puits blindé, mais également dans la partie médiane, sinon tout en bas.

4. Nous désirions pousser la pression jusqu'à la rupture.

5. La mise en charge a eu lieu au moyen d'un très grand nombre de cycles (fig. 4) avec un échelonnement rigoureusement déterminé des points de mesures et de la vitesse de charge.

6. L'appareillage devait permettre de maintenir de façon prolongée, et sans fluctuation notable, une pression constante pour mesurer le fluage.

Pour le maître de l'œuvre, l'intérêt économique d'essais qui permettraient de démontrer que le blindage mince, déjà appliqué depuis longtemps en Italie par Marioni, offre une sécurité suffisante ressort des indications suivantes :

Dans le cas du puits blindé d'Eichen étudié selon les critères usuels, on obtient une épaisseur moyenne de 23 ou de 30 mm, selon la participation du rocher admise, la nuance de l'acier choisie, le taux de travail admis dans l'acier.

Si cette épaisseur pouvait être ramenée par exemple à 10 ou 15 mm, on économiserait entre 600 et 1200 tonnes d'acier. Sans parler de la diminution du prix unitaire provenant de la simplification des soudures.

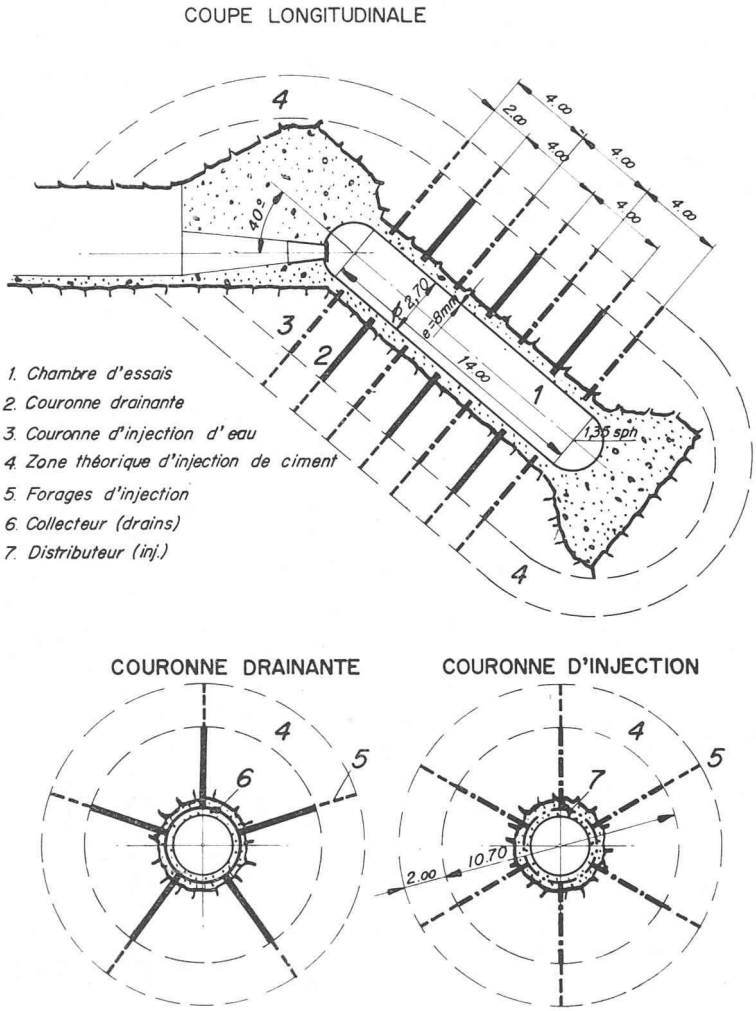



Fig. 2. — Coupe schématique de la chambre d'essai.

Afin d'être renseigné sur le cas extrême, on adopta pour l'essai une épaisseur de *8 mm* qui représente la limite inférieure acceptable pour une mise en place correcte.

### 3. Mesures effectuées

A. *Mesures des dilatations de la chambre sous l'effet de la pression intérieure*

Il s'agissait tout d'abord de connaître la déformation des parois de la chambre, ou, si l'on préfère, les variations de diamètre de celle-ci :

Trois méthodes ont été appliquées :

1. Une série de trois croisillons télescopiques, munis d'un enregistreur mécanique et à transmission électrique « Huggenberger », donnant le centième de millimètre, ont été installés dans trois sections.
2. Mesure des allongements circonférentiels de la tôle proprement dite, en y collant des jauges de contrainte réparties sur trois sections (fig. 11).
3. Mesure des variations du volume global de la chambre, d'où l'on peut déduire, moyennant certaines corrections, les variations diamétrales moyennes. A cet effet, on a déterminé le volume de liquide introduit lors de la mise en pression et on a fait la correction de compressibilité des liquides.

B. *Essais de flambage à la pression extérieure*

La difficulté consistait à provoquer cette pression extérieure.

Le dispositif mis en place consistait à créer au large de la chambre, à une distance d'environ 2 m, un anneau d'injection limité si possible vers l'intérieur, en utilisant des obturateurs et en constituant en quelque sorte une enveloppe semi-étanche à la pression extérieure, provoquée par un deuxième système constitué par trois auréoles intercalées, dites de drainage et d'injection (fig. 2).

Pratiquement, les forages de ces auréoles ont été pourvus d'un filtre breveté par SGI ne laissant pas passer le coulis de ciment et mise au point au cours d'essais préliminaires chez Swissboring.

Le dispositif de mise en pression sera décrit par M. F. Robert dans un prochain numéro du *Bulletin technique de la Suisse romande.*

En outre, pour cet essai, une série de prises de pression manométriques ont été distribuées sur toute la circonférence de la chambre.

Préalablement à l'essai de flambage, la forme exacte de la chambre a été relevée avec précision (fig. 8). Elle présente à ce moment des défauts importants vis-à-vis de la forme circulaire théorique.

C. *Mesures diverses*

Les contraintes résiduelles dans la tôle après le 25e cycle de charge ont été déter-

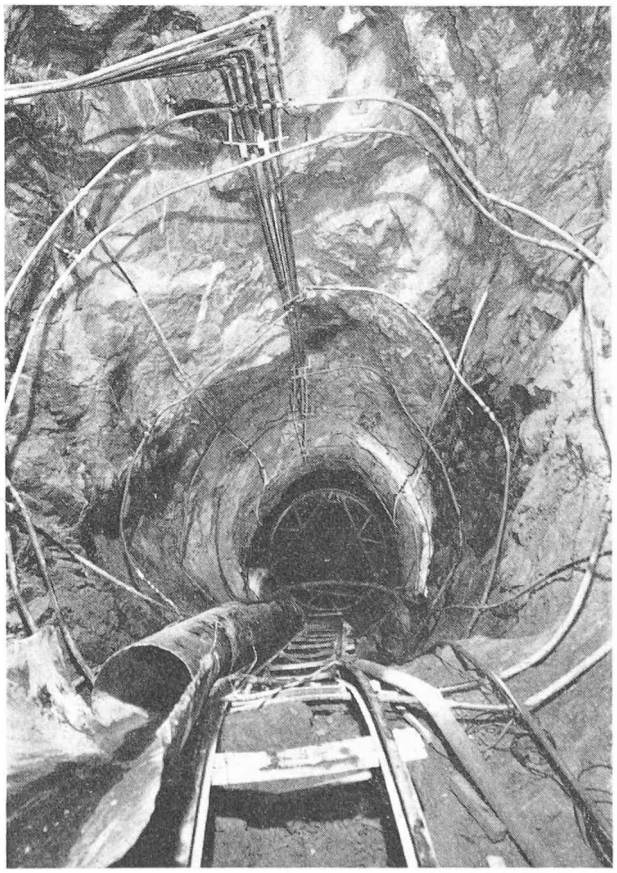


Fig. 3. — Pose de la première virole, le 10 août 1959.

minées en découpant soigneusement trois rondelles, dont on a mesuré au moyen d'une rosette de jauges de contrainte la contraction avant et après qu'elles aient été libérées de la masse.

Parallèlement à cet ensemble de mesures, une série de contrôles ont été faits soit pour mesurer les contraintes dans les endroits dangereusement sollicités, au voisinage du trou d'homme, soit pour mesurer les allongements longitudinaux, soit enfin, pour déterminer les caractéristiques des matériaux utilisés, à savoir le béton tout d'abord et ensuite la tôle.

### 4. Déroulement des opérations

1. *Pression intérieure*

Nous avons porté (fig. 5) en abscisse les déformations diamétrales moyennes $\Delta\varnothing$ et en ordonnée la pression $p$. Il est commode de raisonner en déformation relative « $\varepsilon$ », qui s'applique aussi bien à l'accroissement du diamètre qu'à l'allongement de la circonférence et, par conséquent, nous obtenons la déformation diamétrale en valeur absolue, en multipliant la déformation linéaire par le diamètre de la chambre : ici 2,70 m.

Imaginons tout d'abord que le blindage travaille librement sans la participation du rocher.

Que se passerait-il ?

Pour un tube sans liaison longitudinale et infiniment long, nous obtiendrions schématiquement une fonction $\sigma = f(\varepsilon)$ limitée par une droite oblique dans la phase élastique et une droite horizontale dans la phase plastique au cours de laquelle le tube se dilate à pression intérieure presque constante.

Si le tube est limité par un fond buté sur un massif d'appui, le schéma reste le même mais la ligne oblique est un peu plus raide, car la traction longitudinale exercée par le fond contrarie la dilatation radiale.

Le calcul montre qu'elle doit, à la limite élastique, c'est-à-dire lorsque $\sigma_t = 3430$ kg/cm², passer par le point $\varepsilon = 1{,}8\ ^0/_{00}$ au lieu du point $\varepsilon = 2\ ^0/_{00}$. Ces coordonnées définissent la frontière entre la phase élastique et la phase plastique pour le métal [1].

La fonction représentée par la ligne --- définit exactement la part de pression $p_r$ que le tube peut supporter pour un allongement donné. Si la pression $p$ dans la chambre est plus grande que $p_a$, le solde $p_r$ se reporte sur le rocher.

Avant d'examiner la courbe de déformation sur la figure 5, mentionnons tout d'abord, ce qui n'est pas visible à l'échelle du dessin, que la ligne de déformation durant les premiers cycles est faiblement inclinée jusqu'à $p = 5$ kg/m², avec une brisure à $\varepsilon = 0{,}2\ ^0/_{00}$. Cela signifie que jusque-là le blindage travaille seul et qu'il y a un vide d'environ $^2/_{10}$ mm au départ. On doit l'attribuer au refroidissement lors du premier remplissage.

Pour bien saisir l'interaction entre le blindage et le rocher, examinons plus en détail le déroulement d'un des cycles de charge. Prenons tout d'abord le 14e cycle. A pression nulle dans la chambre, l'acier n'est pas comprimé.

Si nous passons au 15e cycle, l'allongement devient tel que l'on entre dans la phase plastique. Lorsque la rupture intervient au 25e cycle, point $C$, le blindage a

[1] Les caractéristiques de la tôle (Union 24), d'après les essais, sont les suivants :

Limite apparente élastique, 3430 kg/cm² ; résistance à la traction, 4180 kg/cm² ; allongement à la rupture sur $5{,}6\sqrt{S} = 43{,}5$ % ; module d'élasticité $E = 2\,130\,000$ kg/cm². (Essais Vevey sur éprouvettes rectangulaires dans le sens du laminage.)

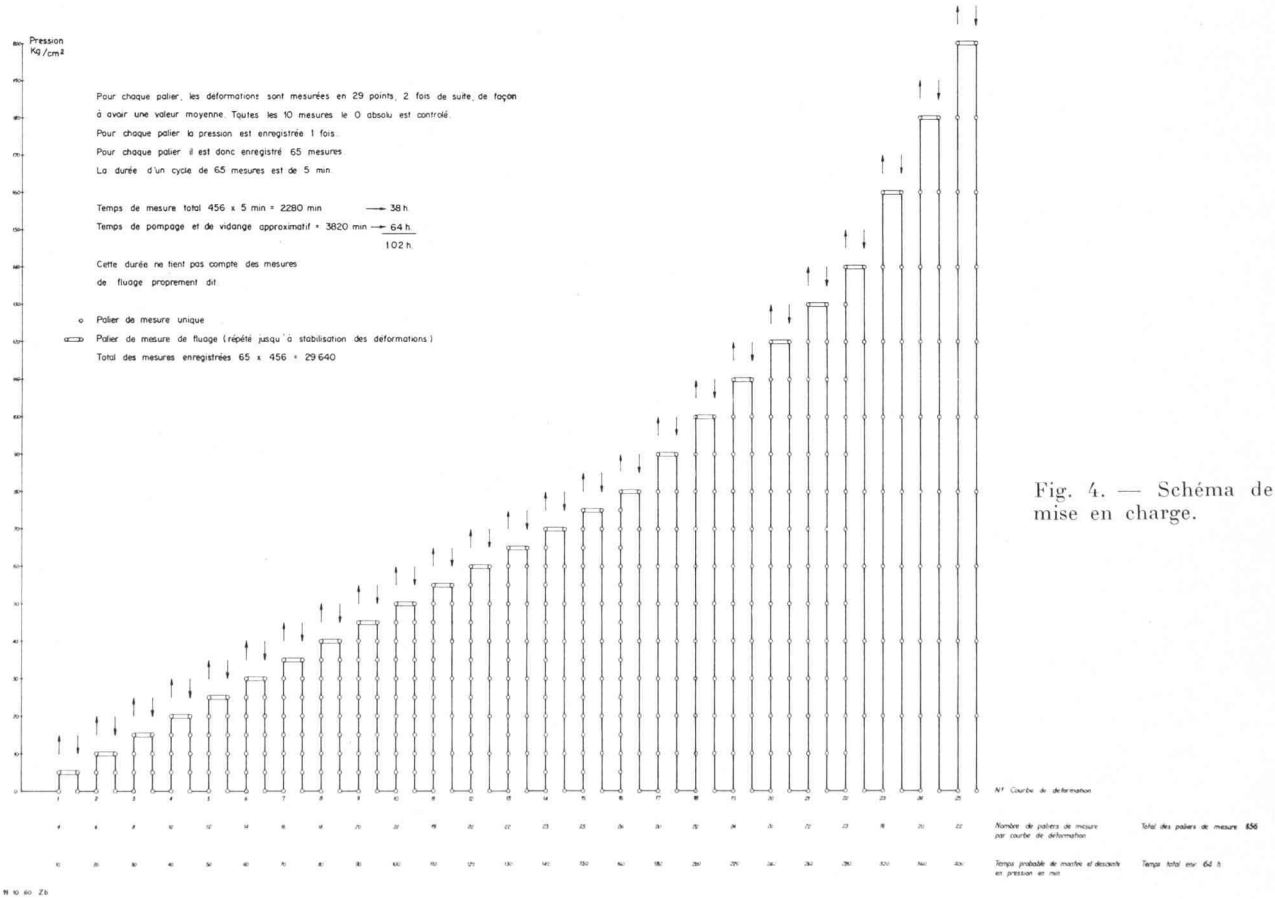



Fig. 4. — Schéma de mise en charge.

largement dépassé la limite élastique, son allongement est d'environ 11 ‰.

Ensuite, la pression tombe jusqu'au point *E*. Sur le diagramme inférieur, on suit le tracé *c-e*. C'est à ce moment, c'est-à-dire en août 1961, que l'on décide de vérifier si le blindage est effectivement comprimé. L'essai consiste à placer une rosette de jauges de contrainte dans un petit cercle, puis à découper le support en forme de disque qui se détend. Les deux mesures faites figurent sur le diagramme par des étoiles. On obtient la confirmation des hypothèses faites. La précontrainte comprise entre 2000 et 3000 kg/cm² est effective.

Enfin, après avoir obturé les trous et réparé la déchirure qui s'était produite au 25e cycle, on procéda 11 mois plus tard à l'essai de fluage prolongé figurant au 26e cycle. La pression monte de *E* à *F'*, où elle est maintenue pendant vingt jours. A pression constante, on observe un fluage très important (fig. 6) ; pendant cette période, le blindage se déforme plastiquement du point *f'*-*g'* (fig. 5). Une stabilisation complète du fluage n'a pu être obtenue après 20 jours. L'essai est alors interrompu.

A ce moment, le blindage est de nouveau très fortement comprimé.

Les essais de charge sont terminés en décembre 1960. Viennent alors les préparatifs pour l'essai de flambage à la pression extérieure. La forme de la chambre est relevée avec précision (voir fig. 8).

Ces mesures permettent de calculer l'expansion permanente moyenne que la chambre a subi, soit 3,9 ‰ par rapport aux dimensions théoriques des plans de construction. Celles-ci ont été vraisemblablement respectées avec une précision usuelle de ± 1 mm. (La précision sur la mesure de l'expansion est ainsi, par cette méthode, d'environ + 1 ‰.)

Ajoutons encore combien il est important d'avoir prolongé l'essai de fluage à haute pression. Les premières observations peuvent faire penser à une stabilisation alors que durant les journées suivantes la vitesse de fluage ne diminue pas. Le blindage ayant cédé localement, on peut se demander

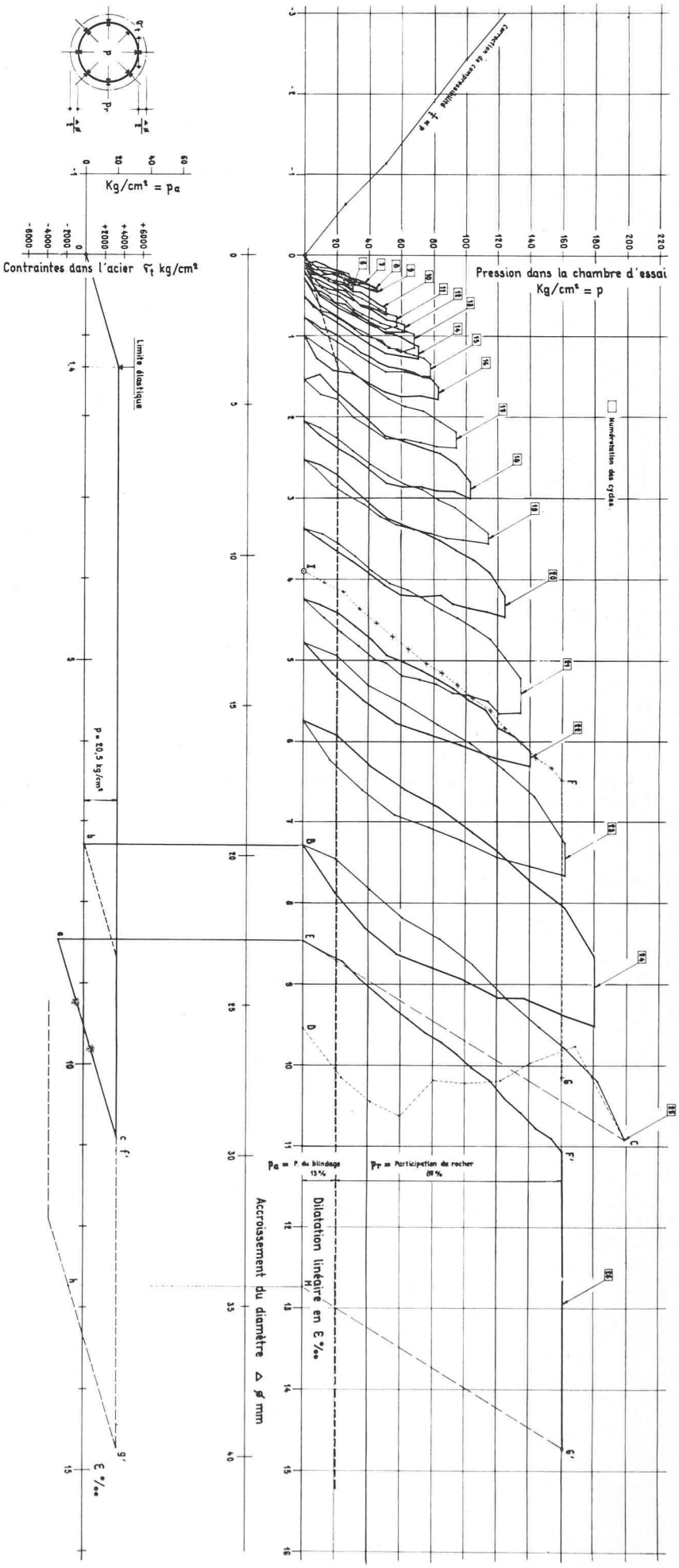
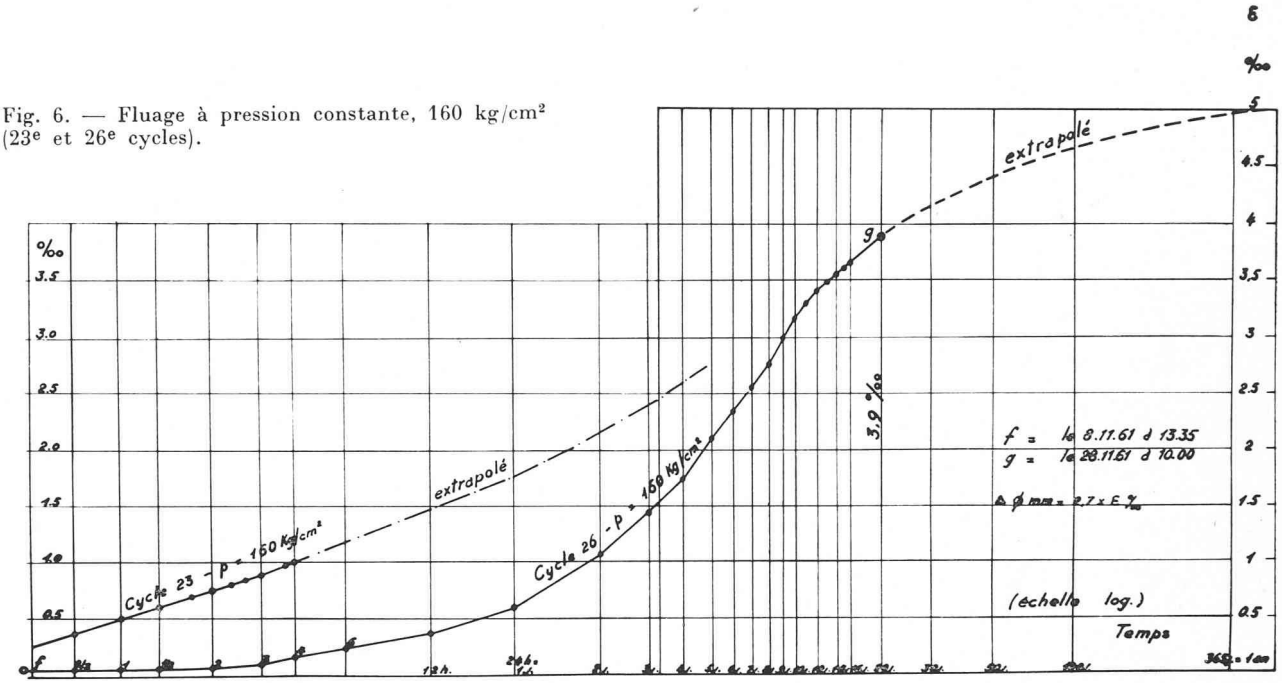



Fig. 5. — Courbe de déformation radiale et contrainte dans l'acier.
Remarque : Le 26e cycle se trouve après mesure de la déformation permanente résiduelle de 3,9 ‰ situé en réalité en JFG au lieu de EF'G'. En effet, entre le 25e et le 26e cycle, il y a un arrêt de 11 mois durant lesquels le rocher s'est détendu.

Fig. 6. — Fluage à pression constante, 160 kg/cm² (23e et 26e cycles).




dans quelle mesure, après réparation de la soudure entre la calotte supérieure et la colerette du trou d'homme, on eût pu dépasser la capacité de charge de la chambre d'essai, atteinte au 25e cycle avec 197 kg/cm². Pour notre part nous croyons, au vu du résultat du cycle 26, que des déformations très grandes se seraient produites, car la roche ne résiste plus que par traction, la pression de couverture étant dépassée de beaucoup.

Au moment de la rupture, la participation du rocher était de 90 %, le solde de 10 % étant pris par le blindage.

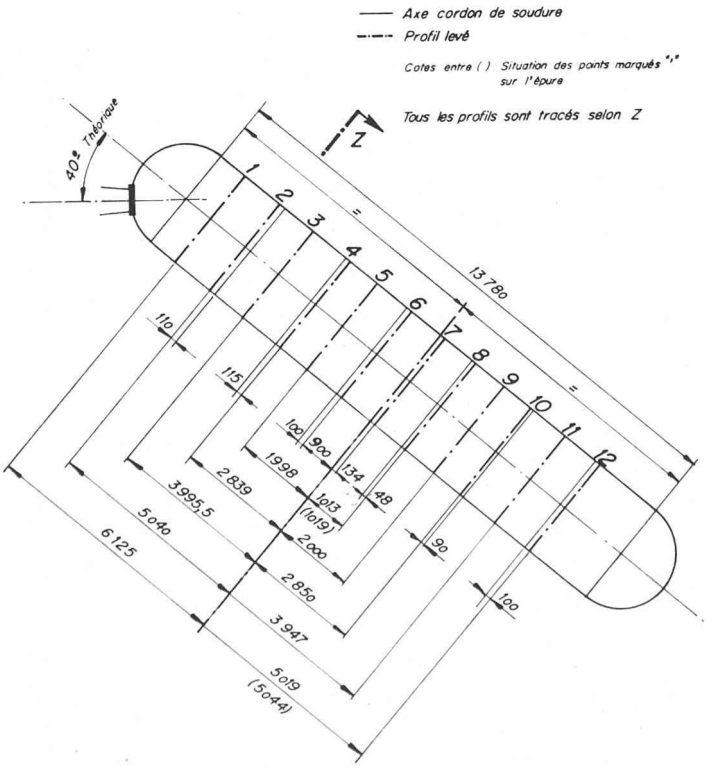



Fig. 7. — Situation des profils déformés.

Le module de déformation instantané reste la caractéristique la moins variable. Durant tous les cycles, elle oscille entre 41 000 kg/cm² et 65 000 kg/cm², à deux exceptions près. La valeur supérieure correspond aux basses pressions *p*.

Comparé à d'autres essais, ce module est relativement bas.

Examinons maintenant les déformations de la chambre ; elles se présentent de deux façons :

— tout d'abord des déformations formant de grandes ondulations ;

— et ensuite, des déformations localisées qui font penser à un véritable emboutissage de la tôle dans des zones où le béton a cédé.

Ce deuxième type de déformations est principalement localisé sur deux lignes du radier, qui correspondent à l'emplacement des deux rails ayant servi à la mise en place du blindage. Nous pensons qu'elles sont dues à des défauts localisés du bétonnage, plus difficile dans cette zone-là.

Les déformations sont fortement exagérées par l'échelle du dessin indiquée dans la figure 8.

Si nous auscultons maintenant la tôle, nous constatons qu'elle n'est décollée absolument nulle part, qu'elle adhère intimement au revêtement en béton.

Vis-à-vis des compressions très importantes subies par la tôle, on peut se demander souvent comment il se fait qu'elle n'ait pas flambé (par flambage, nous entendons un phénomène d'instabilité provoquant une ondulation de courbure inverse dans la tôle) alors que sous des pressions d'eau bien inférieures on verra par la suite ce flambage se produire.

L'explication qui nous paraît la plus plausible est la suivante :

Lorsqu'on comprime, par exemple, une colonne ou une gaine « Chaloz » par un câble précontraint centré, on n'obtient jamais de flambage, pour la bonne raison qu'à la première apparition d'une flèche, le câble intérieur déformé exerce des pressions latérales qui tendent à redresser la colonne.

De même, par exemple, il n'est pas possible de faire flamber un tube de papier en l'entourant d'un élastique fortement tendu. Dans notre cas, le rocher, en se détendant contre la tôle, agit de même. Dès qu'une ondulation se forme, la pression sur la crête augmente et la pression sur le creux diminue.

### 5. Essai de flambement

L'essai de flambement a eu lieu en dernier lieu. Au moyen d'une pompe, on a injecté dans les couronnes dites drainantes (fig. 2), un débit d'eau destiné à mettre la zone fissurée comprise entre la tôle et le béton sous une pression amenant le flambage, tandis que l'on mesure, en un grand nombre de points, la pression interstitielle entre le béton et la tôle.

Cet essai a tout d'abord confirmé que la tôle adhère intimement au béton, puisqu'il ne s'établit pas derrière la tôle une pression uniforme (voir fig. 10) comme dans le cas où une fente subsiste.

Nous avons toutefois été fortement gênés par les pertes d'eau au travers de la zone précédemment injectée, qui s'est révélée assez perméable après l'application des hautes pressions qui l'ont probablement fissurée.

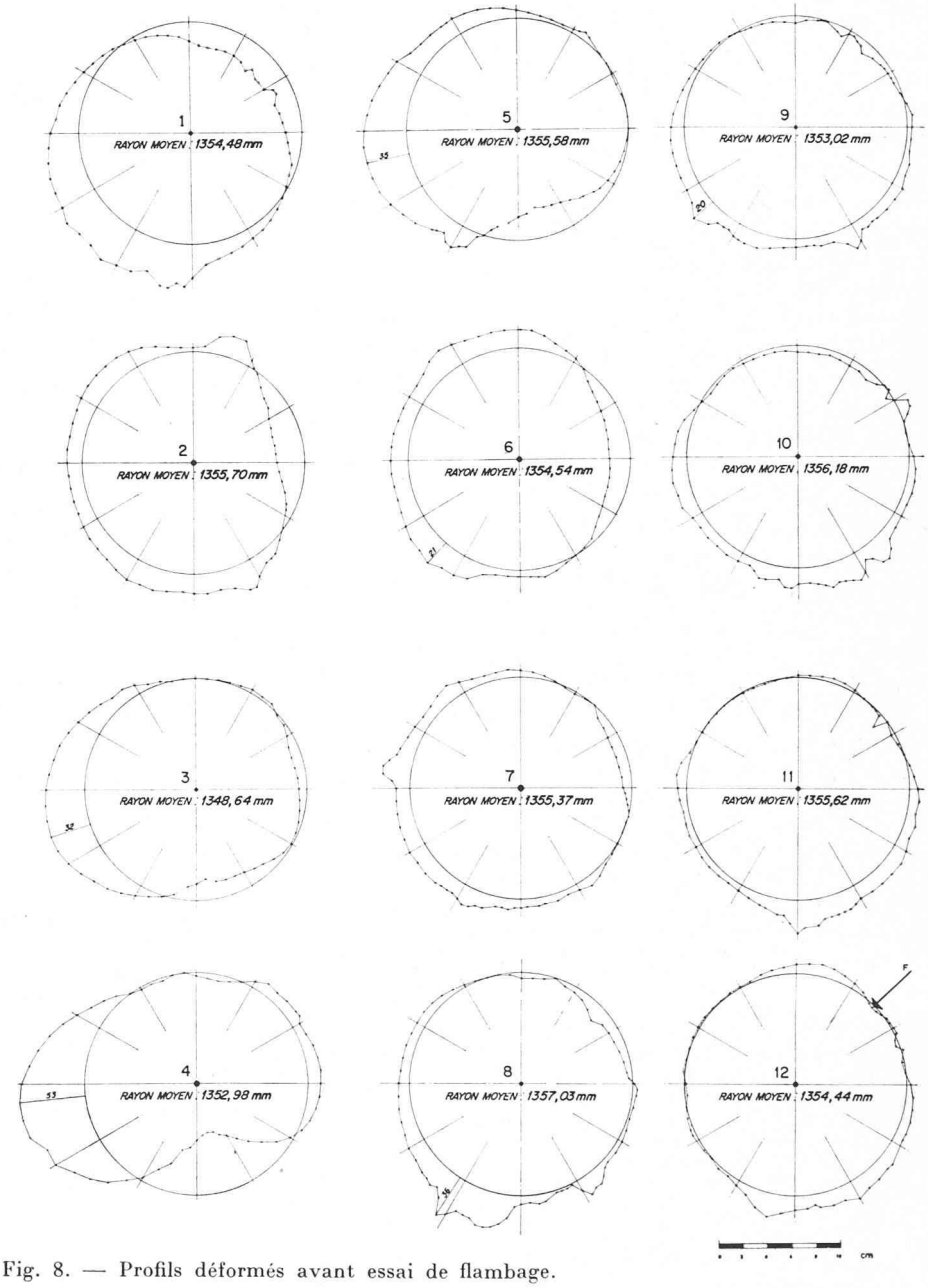



Fig. 8. — Profils déformés avant essai de flambage.

D'une façon générale, on a constaté dans les divers points de mesures que la pression montait progressivement pour atteindre un maximum, puis qu'elle redescendait, probablement sous l'effet de l'ouverture de nouvelles fissures dans le rocher.

A un moment donné, une cloque apparaît progressivement au fond de la chambre, dans la section 12 (voir fig. 8 et photo 9). A ce moment, on assiste véritablement à un décollement de la tôle, ou, si on veut, à un flambage lent. La pression d'eau dans la cloque était de 3,2 kg environ.

Mais toutefois, à ce moment-là, en d'autres points du blindage, la pression était loin d'être partout égale (voir diagramme n° 10) ; on ne peut donc pas la considérer comme une pression de flambage déterminante.

On doit constater que, sur ce point particulier, les essais ne nous ont pas apporté une réponse satisfaisante.

Nous devons signaler ici qu'une série d'essais beaucoup plus complets sur le flambage a été entreprise pour

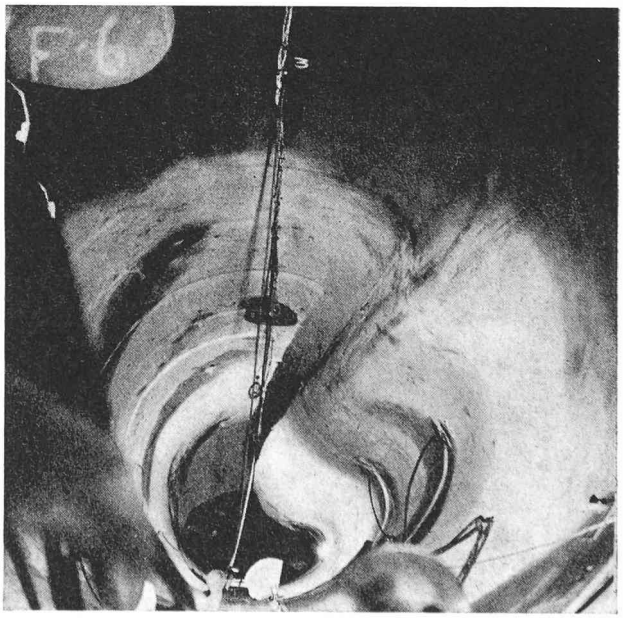


Fig. 9. — Flambage par pression extérieure.

le compte de la Société hydro-électrique de l'Our (Luxembourg), sur notre instigation, par un constructeur autrichien (Voest) et en collaboration avec la Tiroler Wasser-Kräfte AG et nous-mêmes. Sur la base de ces essais, nous savons que le flambage s'annonçant par une cloque longitudinale est provoqué par un défaut de forme. Nous souhaitons d'ailleurs que le résultat de ces études, dont M. le Dr Seeber, de Tiwag, et l'entreprise Voest, à Linz, sont les principaux artisans, soit bientôt diffusé.

Le problème du flambage a d'ailleurs fait l'objet de recherches très complètes et nous nous en voudrions de ne pas mentionner celles de Montel, publiées dans la *Houille blanche*, qui a mis sur pied une formule qui fait intervenir à la fois l'espace vide initial entre la tôle et le béton et le défaut de forme initial du blindage. Cette formule correspond, à notre avis, le mieux aux essais précités. Si nous l'appliquons au cas particulier d'Eichen, nous obtenons une pression de flambage de l'ordre de 2,6 kg/cm².

## 6. Conclusions

Que conclure de l'ensemble des observations si diverses, dont la multiplicité même rend malaisée une interprétation indiscutable.

a) *Comportement du rocher*

Ses propriétés s'écartent d'autant plus du corps idéal, élastique, homogène, réagissant instantanément aux sollicitations que les pressions mises en jeu sont plus considérables. Ainsi on doit constater :

a 1 Le module de déformation apparent instantané n'est pas constant, il diminue légèrement avec l'élévation des pressions.

a 2 La roche a la mémoire des états de charges antérieures. Son comportement diffère selon le nombre et le mode de sollicitations.

a 3 Les états de tension préalables dans la roche jouent un rôle.

a 4 Les déformations permanentes sont importantes aux pressions élevées.

a 5 Les fluages à pression constante sont de règle. Ils représentent une fraction des déformations élastiques en dessous de 120 kg/cm², un multiple des déformations élastiques en dessus de 160 kg/cm² et pour une charge appliquée de façon prolongée. Ils ne sont pas nécessairement permanents. Ils ont un caractère de réversibilité partielle. On constate parfois une détente différée, elle peut se prolonger des mois durant.

Les caractéristiques de matériaux à deux phases, l'une solide, l'autre liquide, apparaissent indiscutablement.

Un complexe composé d'éléments élastiques juxtaposés, tel un massif de pierres sèches, ne se comporte pas ainsi. Il faut la présence d'eau interstitielle dans les fissures et peut-être aussi dans les espaces intercristallins pour freiner tel un « dash-pot » la détente de l'énergie emmagasinée longtemps auparavant.

Mais nous ne pensons pas qu'il s'agisse d'un phénomène comparable aux déformations plastiques de corps fragile obtenues à de très hautes pressions par Ross et Eichinger, lors de brillants essais, devenus classiques.

b) *Comportement du béton*

Bien que le béton ait été de qualité médiocre et mis en œuvre trop liquide ($w\beta d$ = 200-300 kg/cm² à 28 j.), son fluage propre n'intervient que pour une petite part vu son âge (15 mois) — moins de 20 %, croyons-nous, dans l'ensemble des phénomènes plastiques.

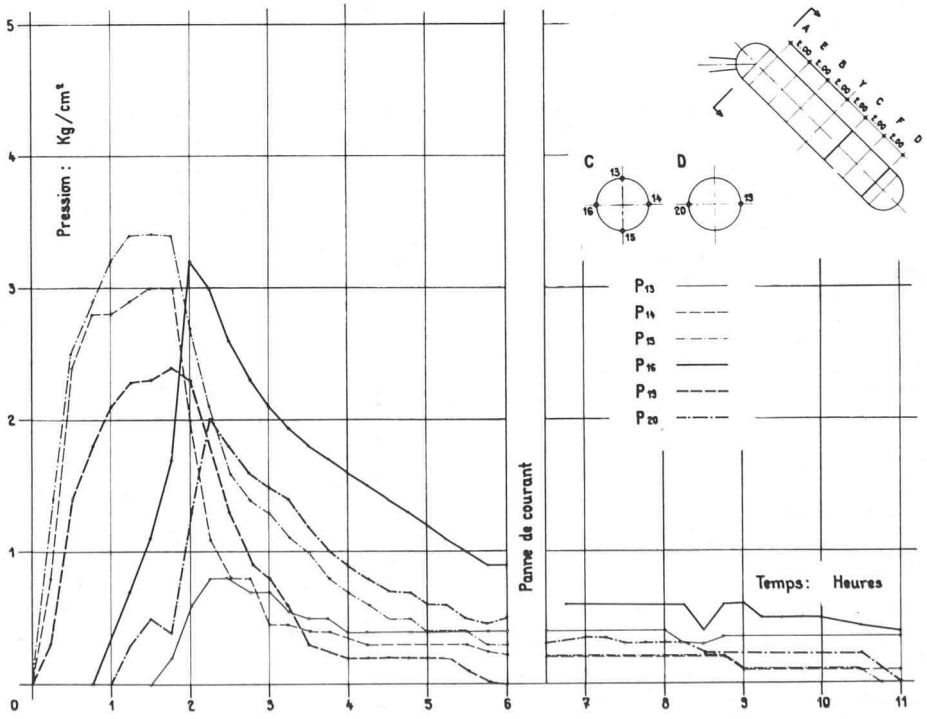



Fig. 10. — Répartition des pressions extérieures durant l'essai de flambage.

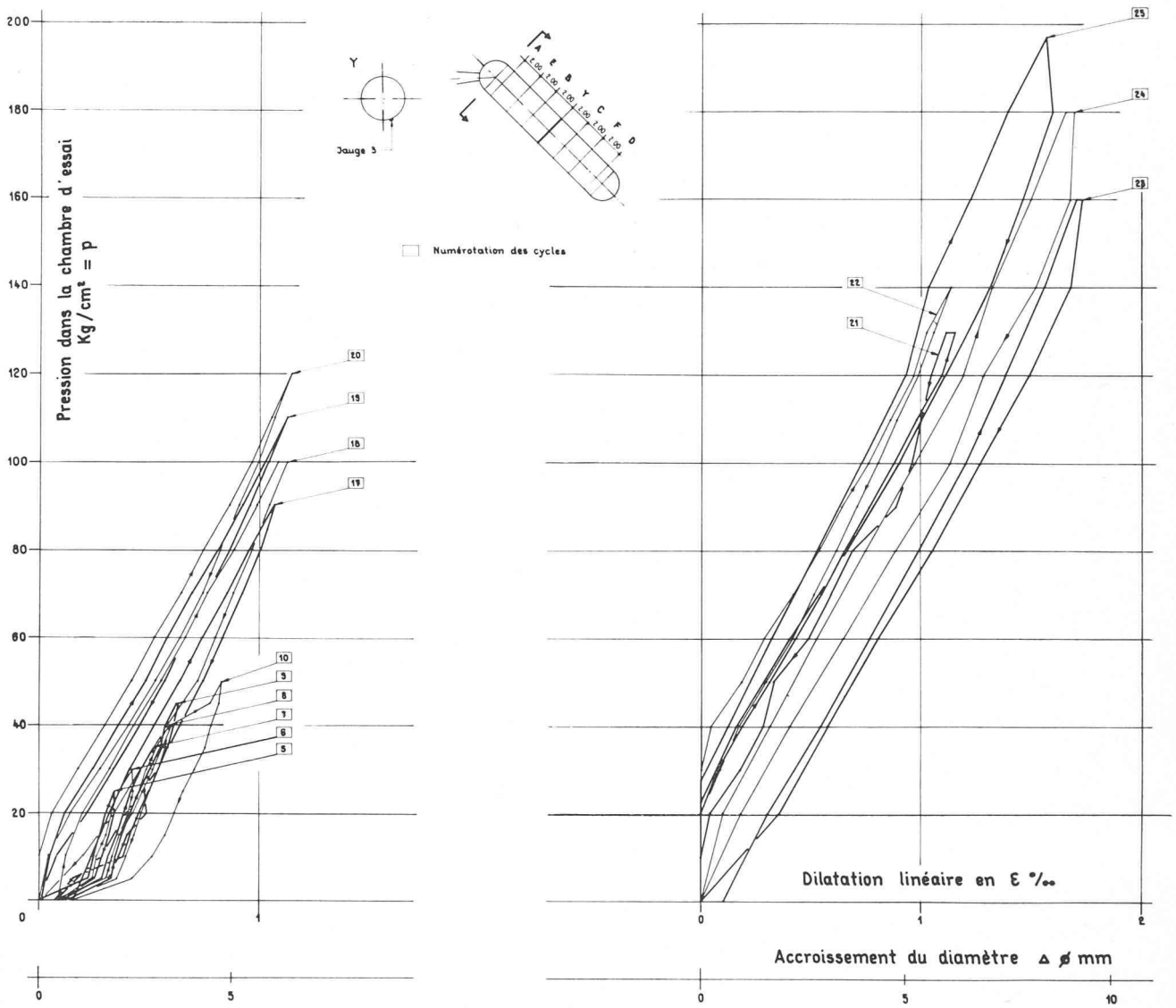



Fig. 11. — Diagramme d'une jauge de contrainte. (Cycles 5 à 20 et 21 à 25)

Fait signalé lors des essais Electricité de France, lors de l'essai du puits blindé de la Bathie-Roseland, le béton constitue visiblement un des éléments faibles de l'ensemble vis-à-vis des compressions radiales qu'il doit supporter qui, elles, sont à peu de chose près la pression intérieure du tube (90 %).

En outre, il est nécessairement fissuré radialement parce que la résistance à la traction de l'anneau est dépassée pour des allongements compris entre 0,15 et 0,4 ‰, soit déjà pour de faibles pressions internes.

Sous des pressions très élevées, le gonflement circonférentiel consécutif à une forte pression radiale peut tendre à refermer ces fissures. J. Orth a montré qu'un cube de béton soumis à la compression simple diminue d'abord de volume, passe par un volume critique minimum, puis regonfle peu avant la rupture.

c) *Comportement du blindage*

c 1 Initialement, par suite des injections, le blindage est collé au béton, puis au premier remplissage il se refroidit (16°). Il se crée un vide de l'ordre de 0,2 à 0,3 mm. Ce vide permet un allongement de la tôle qui travaille comme si elle était libre jusqu'à 5 kg/cm². On constate alors un module de déformation qui se relève. Désormais, tôle et rocher travaillent ensemble.

c 2 Les déformations du blindage sont complexes. On constate :

1) une déformation générale et progressive de la chambre — expansion ou contraction ;
2) des ondulations, ovalisations ou défauts progressifs de forme, dus à des hétérogénéités de la roche ;
3) des déformations très localisées, emboutissage en forme de flache dans des zones où le béton défectueux a cédé (mauvais enrobage des rails).

Les déformations sous c 2 1) sont mesurées par les volumes de liquide introduits ou soutirés de la chambre de pression. Les déformations sous c 2 2) sont décelées par les valeurs inégales des mesures des jauges de contrainte ou des déflectromètres Huggenberger et lors du contrôle de forme après essai. Les défauts sous c 2 3) apparaissent à l'œil nu lors de l'inspection et se décèlent aussi par des sauts brusques des mesures de jauges.

On ne peut donc pas avoir une concordance parfaite des divers modes de mesure.

c 3 Le blindage a travaillé alternativement en phase plastique et élastique. Des états de coactions se sont établis entre rocher et blindage qui ont modifié profondément l'équilibre initial.

Après un certain nombre de cycles, au cours desquels la limite élastique a été dépassée, *le blindage se trouve, après vidange de la chambre, en état de très forte compression* (entre 2000 et 3000 kg/cm²).

c 4 *Mais cet état n'est pas instable*, malgré la minceur du blindage qu'on s'attendrait à voir flamber. Cela ne se produit pas. On doit donc admettre une certaine compensation des réactions du revêtement en béton sur les crêtes et sur les creux des ondulations. Pour la même raison, une colonne ne flambe pas sous l'effet d'un câble précontraint central.

c 5 La rupture du blindage s'est produite à une pression *intérieure très élevée* (197 kg/cm²) alors que le blindage n'apportait plus qu'une faible participation à la résistance générale (10 %).

c 6 Cependant, à ce moment la dilatation moyenne du blindage (11 ‰ env.) n'était pas supérieure à l'allongement qu'on peut faire subir sans dommage à des tuyaux expansés contre des frettes (10 ‰ — voir procédé Bouchayer-Viallet). En effet, la rupture s'est produite en un point singulier (soudure entre le blindage mince et le trou d'homme épais, état de tension spatial complexe).

Dans la partie cylindrique de la chambre, on constatait au même moment des déformations sans rupture beaucoup plus importantes (dépressions en forme de cuvettes avec rayon de courbure de quelques décimètres correspondant à des allongements de 5 à 10 %).

Que conclure au point de vue pratique ?

Vis-à-vis de la pression intérieure, un blindage composé d'une tôle 36/42, à grand allongement, offre une très grande sécurité, même si la limite élastique est dépassée, car elle se prête admirablement aux déformations du rocher, souvent beaucoup plus grandes qu'on le présume même dans les roches réputées peu déformables.

Sans aller aussi loin que nous l'avons fait dans nos essais, on peut envisager d'appliquer à l'intérieur du puits blindé une surpression provoquant la fermeture des fissures au voisinage du puits et mettant la tôle dans un certain état de précontrainte. A notre avis, cette surpression, dans le cas du puits d'Eichen par exemple, ne devrait pas dépasser 120 kg, de façon que le fluage ne soit pas trop important et de façon que la détente rapide et différée de la roche soit inférieure à la limite de 3 ‰, citée plus haut.

Cette légère précontrainte aurait, par ailleurs, l'avantage de révéler à temps des défauts localisés, facilement réparables et de constituer une épreuve de la tenue du revêtement, au même titre que la mise en précontrainte des câbles à une tension supérieure à la tension de service, d'où on obtiendrait à la fois un contrôle de l'acier et un contrôle du béton.

En ce qui concerne le risque de sous-pression, nous avons pu constater que les drains mis en place avant l'injection peuvent parfaitement conserver leur efficacité, mais nous ne pensons pas que celle-ci soit totale, car le risque d'une diminution de leur capacité d'évacuation, par calcification progressive, existe. Nous ne pensons donc pas qu'on puisse compter uniquement sur les drains pour abaisser à zéro la pression de nappe, mais qu'il est prudent de compter sur une pression résiduelle de 30 à 50 m d'eau, et que le blindage doit être dimensionné au flambage en conséquence.

Les essais ultérieurs que nous avons eu l'occasion d'effectuer sur des blindages minces, ancrés dans le béton au moyen de pattes d'ancrage, ou d'autres systèmes, ont montré que les concentrations de contrainte, dues à la présence de ces raidissements ou de ces pattes d'ancrage, ne sont pas à craindre.

Il eût été hautement intéressant de connaître l'état du béton après les essais, pour en examiner la disposition de la fissuration et la résistance résiduelle : faute de crédit, cela n'a pas été possible. Toutefois, il serait souhaitable, devant l'intérêt général que la question présente pour les constructeurs de puits blindés, que ce problème soit également tiré au clair.

De même, il nous semble qu'il y aurait un grand intérêt à reprendre les essais mécaniques de roches fissurées, non homogènes, sous triple étreinte et sous un régime de pressions analogues à celles qui se développent dans les puits blindés, à haute chute, pour déterminer de quels éléments dépendent, et selon quelle loi, le fluage et la détente différée qui se sont manifestés avec tant d'importance.

---

# DIVERS

## Fédération européenne du génie chimique

*Rapport annuel 1962*

Cette année, la Fédération européenne du génie chimique jette un regard en arrière sur dix années d'existence. La tâche de l'association, créée en 1953 sur une base fédérative, est d'encourager le progrès dans les domaines de la chimie technique, de l'appareillage chimique et de la technique des procédés par une collaboration européenne et internationale des groupements technico-scientifiques, en vue de l'intérêt général.

Le rapport annuel 1962 de la Fédération européenne du génie chimique, publié en deux parties, donne, dans la partie I, un aperçu détaillé sur le travail accompli en 1962, les manifestations tenues et à venir, et indique les noms des personnalités qui participent aux différentes assemblées et aux différents groupes de travail de la Fédération.

On a accueilli avec une joie particulière le fait que la « Dansk Ingeniørforening » soit devenue membre de la Fédération européenne en 1962 ; ainsi des groupements membres de tous les pays d'Europe occidentale sont-ils maintenant représentés dans la Fédération. Par l'admission de la « Turkish Chamber of Chemical Engineers » et du « Verein Deutscher Ingenieure in Argentinien », comme sociétés correspondantes, des spécialistes venant de deux nouveaux pays autres qu'européens sont entrés dans la Fédération. Ainsi, fin 1962, la Fédération comprenait-elle 35 groupements de 18