Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 90 (1964)
Heft: 22

Artikel: Travaux d'excavation et consolidation du rocher d'une centrale souterraine en Écosse
Autor: Vlatseas, Spiros
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-67016

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: 14.07.2025

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

nombre $\frac{\eta p}{E}$ *(petit par rapport à 1) qui caractérise le frottement interne, tandis que dans celui du modèle de Maxwell, c'est le nombre inverse* $\frac{E}{\eta p}$ *qui joue ce rôle (il est alors, dans ce cas, petit par rapport à 1)*[19]. Insistons sur le fait que tout ceci suppose, bien entendu, que la matière soit quasi élastiquement déformable.

En poursuivant les calculs, on verrait que les formules donnant les valeurs des décalages de phase δ et δ' définis § 4 s'obtiennent, dans le cas du modèle de Maxwell, en remplaçant dans (39) et (44) le facteur $\frac{\eta p}{E}$ par $\frac{E}{\eta p}$. Ce résultat n'est d'ailleurs pas étonnant, ces deux facteurs étant respectivement, dans chacun des deux cas étudiés ici, petits par rapport à 1 et caractérisant le frottement interne.

On peut résumer cette discussion en disant que, *dans le cas du modèle de Kelvin comme dans celui du modèle de Maxwell, le nombre* $\frac{\eta p}{E}$ *ou* $\frac{E}{\eta p}$, *caractérisant chaque fois le frottement interne, joue un rôle identique, dans toutes les formules où ce frottement intervient, pourvu que ce dernier soit constamment très petit, c'est-à-dire que la matière soit quasi élastiquement déformable.*

Remarque : Le lecteur s'étonnera peut-être qu'on soit arrivé à cette dernière conclusion, étant donné que les équations différentielles (14) et (49), relatives aux deux modèles successivement utilisés dans cette étude, sont nettement différentes l'une de l'autre. Il semble qu'il y ait là un certain paradoxe. Ce dernier n'est cependant qu'apparent. Il est en effet possible de montrer que la substitution de l'expression (16) de ζ dans ces équations conduit, pour déterminer θ et α, à deux relations qui, si l'on y néglige quelques très petits termes, diffèrent seulement par le fait qu'il faut remplacer, dans la première, $\frac{\eta p}{E}$ par $\frac{E}{\eta p}$, pour obtenir la seconde. Cette substitution étant pleinement justifiée par la signification de ces deux nombres, on voit que l'on n'a en définitive affaire qu'à une seule et même équation. Bien entendu, ceci n'est valable qu'à l'approximation où nous nous sommes placés dans nos calculs.

Zurich, le 1er juillet 1964.

[19] Voir aussi l'alinéa qui suit la formule (29), § 3, de cette publication, et surtout les points 4 et 5 du paragraphe 4, du mémoire cité dans la note 1.

TRAVAUX D'EXCAVATION ET CONSOLIDATION DU ROCHER D'UNE CENTRALE SOUTERRAINE EN ÉCOSSE

par Dr. Ing. SPIROS VLATSEAS, Senior Engineer, The Mitchell Construction Co. Ltd. Beauly, Inverness-shire, Ecosse

1. Renseignements généraux

Avec la mise en service, en 1963, de l'aménagement hydro-électrique de Strathfarrar et Kilmorack, la North of Scotland Hydro-electric Board — entreprise publique pour l'exploitation des ressources hydrauliques en Ecosse du Nord — a complété la deuxième étape de l'utilisation du bassin versant de la rivière Beauly. La première étape, celle de l'aménagement de Glen Affric, avait été terminée en 1952.

L'aménagement de Strathfarrar et Kilmorack est situé au nord-ouest de Inverness, à une distance de 15 à 60 km de cette ville, et se compose de quatre paliers en série, pour un total de 102 MW de puissance installée.

Le premier palier, celui de Deanie, dont les caractéristiques sont rapportées à la figure 1, utilise les eaux d'un bassin versant de 220 km². Un barrage-voûte de 39 m de haut forme, avec un barrage subsidiaire en gravité, le bassin d'accumulation principal, celui de Monar, d'une capacité de 142 millions de m³.

Une galerie d'amenée de 9 km de long alimente la centrale souterraine de Deanie, dont la puissance installée de deux turbines Francis est de 38 MW. Les eaux sont ensuite déchargées dans le réservoir de Beannachran — d'une capacité de 1,4 million de m³ — en tête du deuxième palier, celui de Culligran, dont la centrale, équipée d'une turbine Dériaz et d'une turbine Francis, a une puissance installée de 24 MW. Les deux paliers restants sont constitués chacun d'un barrage-centrale en gravité avec deux turbines Kaplan d'une puissance installée de 20 MW.

2. Géologie

Le terrain, le long du palier de Deanie, est composé presque entièrement de roche cristalline métamorphique appartenant à la série de Moine, pour la plupart des granulites siliceux et micaschisteux, avec des variations locales. De la moraine et des dépôts alluviaux de lac et de rivière couvrent les niveaux inférieurs de la région.

Aux environs de la centrale souterraine, le rocher est composé pour la plus grande part de granulites psammitiques plutôt quartzeux avec des bandes péliques. A proximité immédiate de la centrale même, laquelle a une couverture de 70 m environ sur sa calotte, le rocher a révélé, pendant les creusements, beaucoup de clivages, généralement pleins d'eau et formant entre eux des blocs lenticulaires très instables, sous forme de Vs inversés. Ces clivages donnèrent lieu à des tombées de roche et du hors-profil abondant. D'autre part, la médiocrité du rocher exposé pendant le creusement de la centrale exigea que l'on changeât les méthodes de construction prévues et que l'on posât deux calottes de revêtement, dont la première était composée d'anneaux en fer et béton de remplissage du hors-profil, et la deuxième, celle de couverture, de béton non armé. En outre, il fallut pourvoir au boulonnage du rocher, aux injections de ciment et au revêtement en béton des murs de la centrale, originellement prévus en roche nue.

3. Excavation

Les travaux d'excavation de l'ensemble chambre d'équilibre - centrale - galerie de fuite commencèrent en

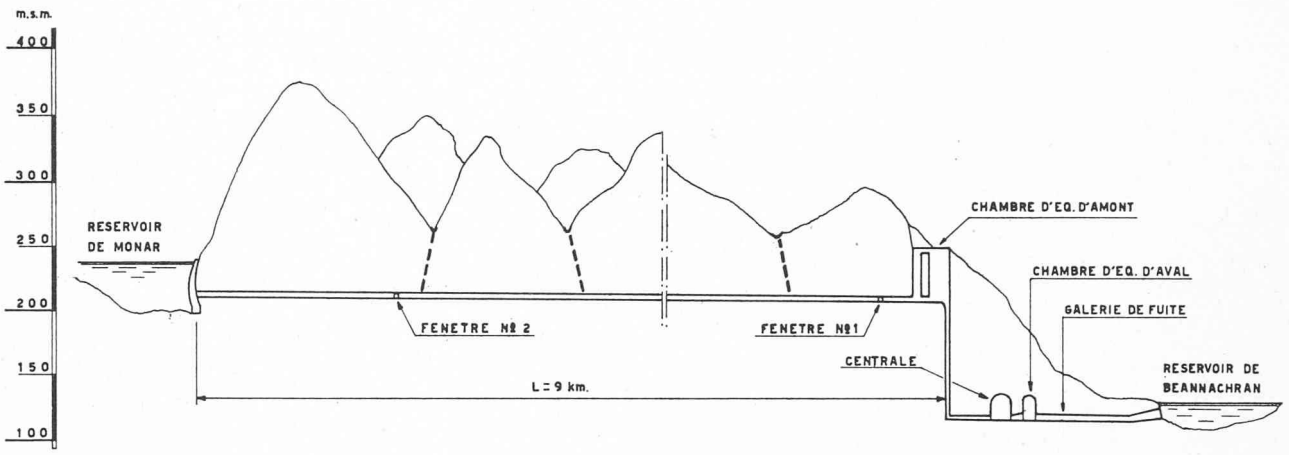

Fig. 1. — Aménagement hydro-électrique de Strathfarrar et Kilmorack. Palier de Deanie.
Profil en long.

septembre 1959 et furent terminés en juillet 1961. La succession des opérations est rapportée à la figure 2, tandis que la figure 3 illustre l'ensemble et en donne les dimensions principales. Les travaux, idéalement répartis en trois phases, furent exécutés comme suit :

a) *Partie supérieure*

Les travaux commencèrent avec le creusement, en section complète, de la fenêtre d'attaque nº 1 jusqu'à la jonction avec la galerie d'amenée. Dès ce point, on continua vers la fenêtre d'attaque nº 2, en amont, et, vers l'aval, jusqu'au pied de la chambre d'expansion. Des marteaux pneumatiques Holman Silver Three furent employés pour la perforation, à partir d'une plate-forme mobile sur rails (Jumbo). Pour le transport, un Eimco 21 Rockershovel sur rails chargea le rocher excavé dans des wagonnets Decauville. En même temps, on procéda au creusement en surface, au sommet de l'ensemble, de la chambre d'équilibre d'amont.

Ensuite, un puits de $2{,}40 \times 2{,}40$ m de section fut creusé au centre de la chambre d'expansion, de bas en haut, jusqu'au bord supérieur, avec plate-forme « Alimak », de fabrication suédoise. Il fut suivi de l'élargissement à section complète, en allant de haut en bas, tandis qu'un deuxième puits « Alimak » était en cours de creusement au centre du puits piézométrique. Les opérations de cette partie furent complétées par l'élargissement de ce puits à section complète, en avançant toujours de haut en bas. Pendant l'élargissement de la chambre d'expansion et le creusement du puits piézométrique, une rigoureuse coordination des opérations (perforation, minage, transport de la fouille) fut nécessaire, pour éviter tout accident. Toutes les surfaces de rocher douteux furent couvertes avec des réseaux de fil de fer ancrés dans le rocher sain.

L'équipement « Alimak », qu'on peut voir en figure 4, consiste en une série de rails verticaux de trois mètres de long chacun, qui sont montés l'un au-dessus de l'autre et ancrés sur la paroi du puits au fur et à mesure que celui-ci avance vers le haut. Une plate-forme métallique — où les mineurs travaillent — protégée par un toit en fer et actionnée par air comprimé, s'élève le long de ces rails. Avant le minage, la plate-forme descend jusqu'à la dernière section de rails du bas, qui « se replie » pour aller se protéger sous la calotte de la galerie. Le même puits sert ensuite à l'évacuation des roches provenant de l'élargissement.

b) *Partie inférieure*

L'excavation de cette partie commença avec l'avancement de la galerie de ventilation vers la calotte de la chambre d'équilibre d'aval, de la galerie de fuite vers le radier de la même chambre et de la galerie d'accès vers la centrale souterraine. Tous les avancements furent exécutés à section complète, en employant les méthodes conventionnelles pour la perforation et le minage. Pour le transport de la fouille, un Eimco 21

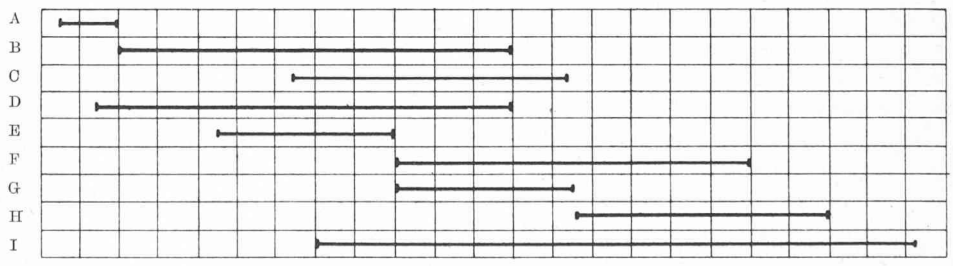

Fig. 2. — Excavation de l'ensemble chambre d'équilibre d'amont - centrale - galerie de fuite.
Succession des opérations.

A Fenêtre nº 1 jusqu'à la chambre d'expansion
B « Puits Alimak » et élargissement chambre d'expansion
C « Puits Alimak » et élargissement puits piézométrique
D Galerie de ventilation et voûte chambre d'équilibre d'aval
E Galerie de fuite jusqu'à la chambre d'équilibre d'aval
F « Puits Alimak » et élargissement de la chambre d'équilibre d'aval
G Diffuseurs et galeries sous pression
H « Puits Alimak » et élargissement puits sous pression
I Galerie d'accès et centrale souterraine

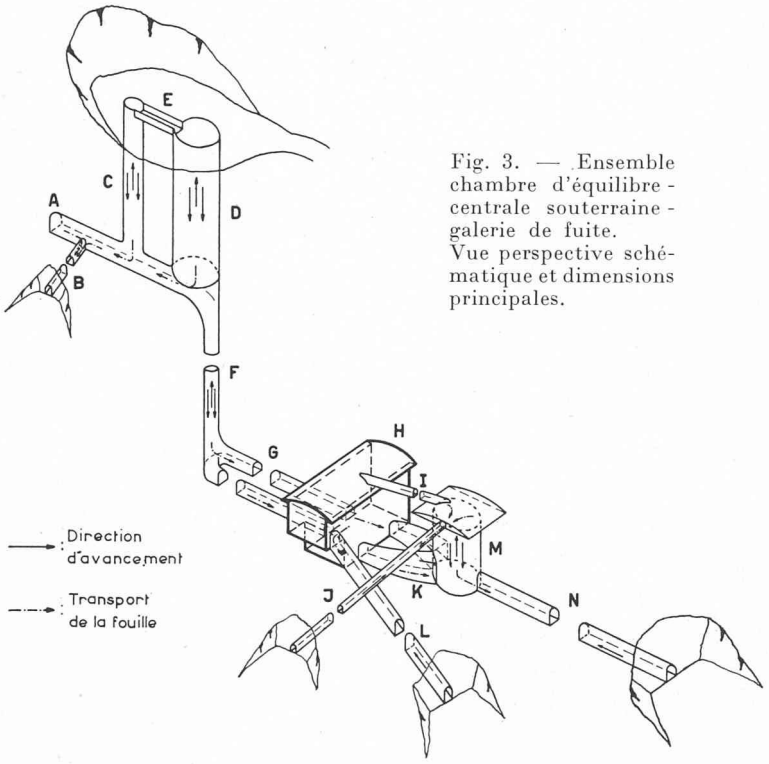

Fig. 3. — Ensemble chambre d'équilibre - centrale souterraine - galerie de fuite. Vue perspective schématique et dimensions principales.

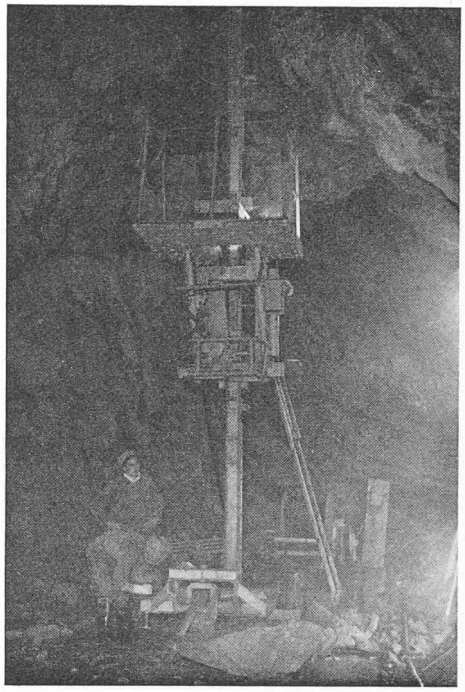

Fig. 4. — Equipement « Alimak ».

A	Galerie d'amenée	s = 23,25	L = 9000,00
B	Fenêtre d'attaque nº 1	s = 9,30	L = 137,00
C	Chambre d'équilibre d'amont, puits piézométrique	d = 5,05	h = 52,50
D	Chambre d'équilibre d'amont, chambre d'expansion	d = 15,80	h = 52,50
E	Déversoir	b = 5,20	h = 3,05 L = 7,90
F	Puits sous pression	d = 5,45	h = 78,50
G	Galeries sous pression *	s = 14,20	L = 48,50
H	Centrale souterraine	b = 13,80	h = 26,00 L = 30,00
I	Galerie d'aération	s = 2,60	L = 15,30
J	Galerie de ventilation	s = 4,70	L = 213,00
K	Diffuseurs *	s_m = 16,40	L = 16,50
L	Galerie d'accès	s = 28,30	L = 225,00
M	Chambre d'équilibre d'aval . . .	d = 15,80	h = 26,00
N	Galerie de fuite	s = 23,25	L = 455,00

s = section en m².
s_m = section moyenne en m².
L = longueur en m.
d = diamètre en m.
h = hauteur en m.
b = largeur en m.
* = chacun(e).

sur rails chargea le rocher excavé dans des wagonnets Decauville, dans le cas de la galerie de ventilation, tandis que, dans les deux autres galeries, on employa des chargeuses Eimco 105 sur chenilles, chargeant sur des basculeurs de 7 m³ de capacité.

Quand l'avancement de la galerie de fuite atteignit le pied de la chambre d'équilibre d'aval, un puits « Alimak » fut creusé vers la calotte. Entre-temps, la calotte même avait été creusée à travers la galerie de ventilation. L'élargissement de la chambre à section complète suivit, tandis que l'excavation avançait dans les diffuseurs et de là, au-dessous de la centrale, le long des galeries sous pression, jusqu'au pied du puits sous pression.

Dès ce point, un « puits Alimak » fut creusé vers le haut jusqu'au radier de la galerie d'amenée, suivi par l'élargissement à section complète du puits sous pression. Le rocher excavé fut transporté au moyen de basculeurs de 7 m³ à travers les galeries sous pression et de fuite aux décharges et, encore une fois, toutes les opérations en cours dans la chambre d'équilibre d'aval et le puits sous pression furent rigoureusement coordonnées.

c) *Centrale souterraine*

Quand l'avancement de la galerie d'accès rejoignit la plate-forme d'arrivée, une galerie de 3,30 m de large et 5,20 m de haut — suffisante pour l'Eimco sur chenilles et les basculeurs — et inclinée de 15 %, fut creusée vers la paroi opposée de la centrale (fig. 5 *a*). Ensuite, le rocher entre la galerie inclinée et la voûte (fig. 5 *b*) et le rocher jusqu'au niveau de la plate-forme d'arrivée (fig. 5 *c*) fut excavé sur toute la largeur de la centrale, et transporté à travers la galerie d'accès aux décharges. Le creusement, en même temps, de la galerie d'aération, facilita la ventilation générale.

A ce moment, le comportement de la roche, à cause de l'air humide, des minages et de la circulation d'eau naturelle dans les abondants clivages, créa des doutes sur la stabilité du rocher de la voûte et des murs. Par conséquent, il fut décidé de supporter la calotte et de procéder au boulonnage du rocher des parois avant de compléter l'excavation.

Dans ce but, les six premiers anneaux furent montés et supportés par les épaulements de la voûte, avec l'aide d'une grue mobile. En employant une plate-forme attachée à des fers en U préalablement soudés aux anneaux, le rocher de la voûte fut boulonné et les hors-profils bétonnés (fig. 5 *d*). La même plate-forme servit pour le montage du reste des anneaux en procédant vers l'autre extrémité de la calotte. Les seize anneaux

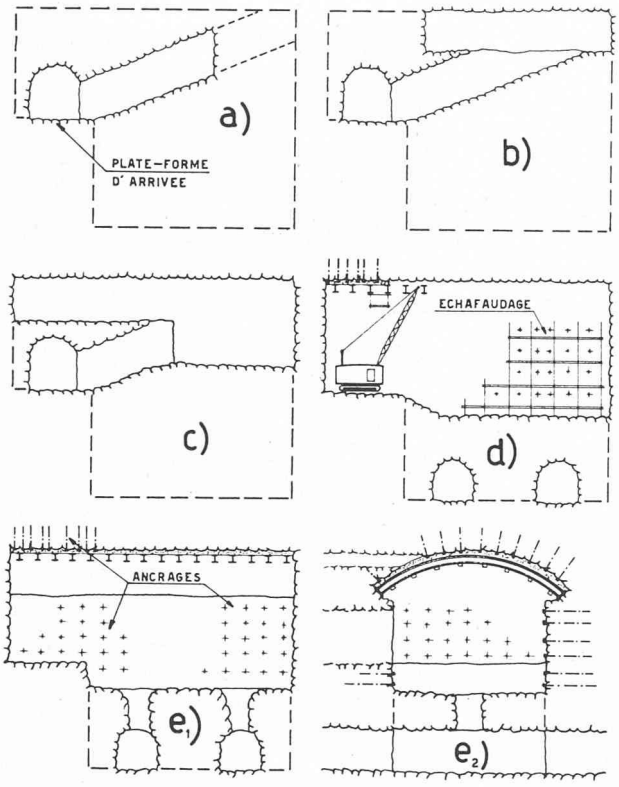

Fig. 5. — Centrale souterraine de Deanie. Séquence des opérations d'excavation.

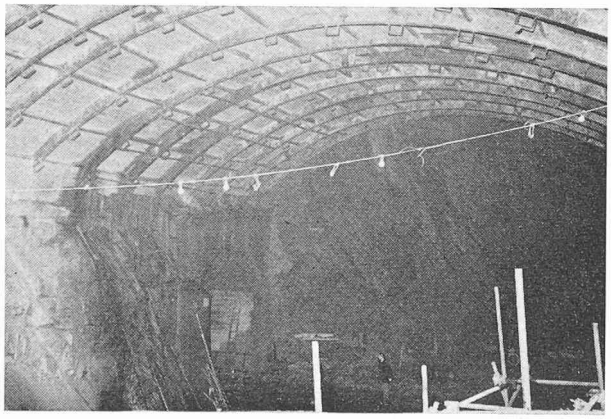

Fig. 6. — Centrale souterraine de Deanie. Vue de la première calotte.

qui y furent employés étaient d'une section de I 12″ X 6″ — équivalant à peu près au NP 30 — composés chacun de six segments de 3,30 m de long. La figure 6 montre l'état de la calotte depuis l'achèvement de ces travaux.

En même temps, on procéda au boulonnage du rocher des parois, d'après un échafaudage (fig. 5 *d*). Ces boulons étaient composés d'un fer rond de 25 mm de diamètre et de 7 m de longueur, ayant à l'une des extrémités un ancrage à expansion. A l'autre extrémité, une tête de répartition en béton fut formée contre la surface du rocher, et l'ensemble fut tendu à 5 tonnes. Au moyen d'un petit tuyau laissé dans la tête en béton, le trou fut ensuite rempli de coulis de ciment, tandis qu'un tuyau en plastique (fig. 7), enveloppé autour du fer

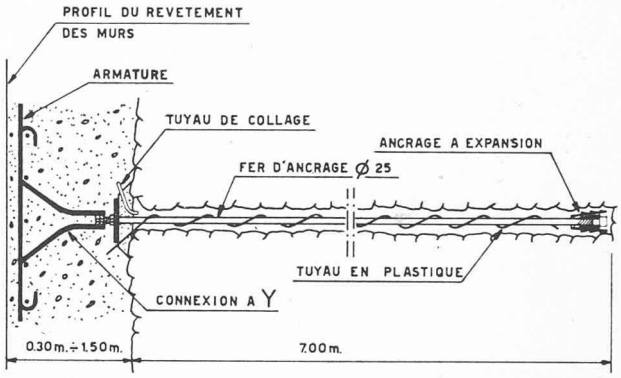

Fig. 7. — Boulons d'ancrage.

d'ancrage, permettait l'échappement de l'air. Le bout libre du boulon fut joint à l'armature de revêtement du mur, au moyen d'une connexion en Y composée de deux fers ronds de 15 mm soudés à deux écrous (fig. 8), de façon que plus d'un fer d'ancrage pût s'opposer aux mouvements locaux éventuels du rocher à travers l'armature même. Au total, 700 de ces boulons furent employés, espacés de 0,70 à 1,20 m.

Après l'achèvement de ces travaux, deux puits verticaux (fig. 5 e_1 et 5 e_2) furent creusés à partir des galeries de communication qui avaient été établies au moment du passage des diffuseurs aux galeries sous pression. Le reste de l'excavation de la centrale jusqu'à son radier fut complété par l'élargissement de ces

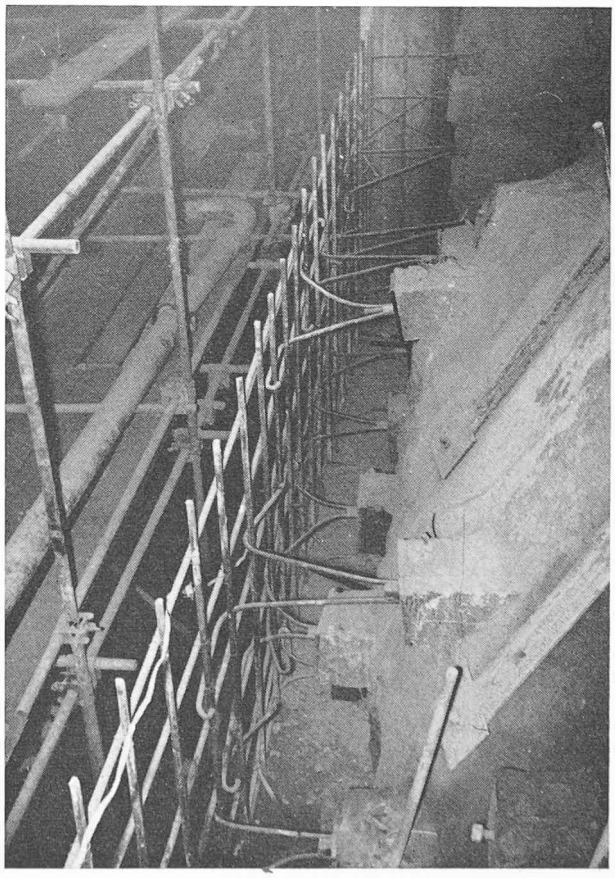

Fig. 8. — Centrale souterraine de Deanie. Vue des connexions des boulons à l'armature.

puits et le transport aux décharges du rocher creusé à travers la galerie de fuite.

4. Injections de ciment dans la centrale

a) *Voûte*

Le colmatage des cavités entre le rocher et la première calotte en béton fut exécuté en forant cinq trous, de la galerie d'aération jusqu'à la clef de la voûte, à vantail, et huit trous, d'après l'échafaudage sur la plate-forme d'arrivée, radialement. Le coulis avait un rapport eau/ciment de 1/1, et un total de 55 tonnes de ciment fut injecté, à une pression de 1,4 kg/cm². Depuis le revêtement des murs de la centrale, une deuxième calotte en béton, de couverture, fut construite sur la première, et les cavités entre les deux remplies avec 7 tonnes de ciment injecté à la même pression.

La consolidation du rocher de la voûte fut effectuée au moyen de 200 trous, perforés chacun à 7 m dans le rocher même et espacés de 2 m. Le coulis de ciment, dont le rapport eau/ciment variait de 3/1 à 2/1, fut injecté à une pression maximum de 3,2 kg/cm². Un total de 80 tonnes de ciment fut utilisé, ce qui donne : 400 kg par trou, ou 57 kg par mètre perforé, ou 120 kg par m² de surface.

b) *Murs*

Le rocher des murs fut consolidé au moyen de 410 trous d'une profondeur de 7 m chacun, l'écartement étant de 2,30 m. Le rapport eau/ciment variait de 3/1 à 1/1 et la pression d'injection maximum fut de 2 kg/cm². Un total de 35 tonnes de ciment fut injecté, c'est-à-dire en moyenne 80 kg par trou, ou 12 kg par mètre perforé, ou 33 kg par m² de surface.

5. Projet et construction

Le projet de l'aménagement et la direction des travaux sur le chantier furent confiés à Sir W. Halcrow & Partners, Consulting Engineers, de Londres. Les travaux en génie civil des premier et deuxième paliers furent exécutés par l'entreprise de travaux publics The Mitchell Construction Company Ltd., de Peterborough, Angleterre.

BIBLIOGRAPHIE

C. M. Roberts : Special Features of the Affric Hydro-Electric Scheme, *Proc. Instn. Civ. Engrs*, septembre 1953, p. 520.

— The Strathfarrar and Kilmorack Scheme. *Water Power*, février 1964 et mars 1964.

DIVERS

Conférence mondiale de l'Energie

La *Conférence mondiale de l'Energie* a tenu sa 14e session partielle à Lausanne, du 13 au 17 septembre 1964. Le thème de cette session était la lutte contre les pertes dans le domaine de l'énergie.

Les sujets abordés par la Conférence furent très nombreux puisque plus de 146 communications y ont été présentées.

Faute de pouvoir entrer dans le détail de ces travaux, un aperçu des conférences générales, données dans le cadre de cette manifestation, permettra de dégager quelques conclusions.

La première conférence générale a été faite par le professeur *H. Reiher* (Allemagne) qui a traité de la lutte contre les pertes dans le domaine du chauffage des locaux et de la climatisation :

Il s'agit bien là d'un domaine dans lequel la lutte contre les pertes peut être menée avec efficacité puisque le chauffage absorbe selon les pays de 23 à 45 % de la consommation totale d'énergie. Les efforts faits dans ce but doivent viser à réduire la déperdition de chaleur dans les bâtiments d'une part et à procurer une meilleure utilisation de l'énergie du combustible utilisé.

La diminution des pertes calorifiques des bâtiments dépasse le but initial d'économie ; elle préserve aussi ces derniers de l'humidité et en améliore ainsi la salubrité. L'isolation des installations et l'adoption de techniques de chauffage modernes, chauffage par rayonnement notamment, peuvent contribuer sensiblement à la réduction des pertes.

Une meilleure utilisation de l'énergie de chauffage peut être obtenue grâce au remplacement des systèmes de chauffage unitaires par des centrales desservant plusieurs bâtiments. Une solution plus avantageuse encore consiste à prévoir des centrales thermiques mixtes produisant de l'électricité et assurant le chauffage de quartiers entiers.

L'intégration économique des centrales nucléaires a fait l'objet de la deuxième conférence générale qui a été donnée par M. *P. Ailleret* (France) :

L'énergie électrique, actuellement de première nécessité, est produite essentiellement dans des centrales thermiques et hydrauliques.

La consommation d'électricité augmente constamment et tous les moyens de production doivent être mis à contribution afin de faire face à la demande, en tenant compte en outre du caractère fluctuant de cette dernière.

Les conditions actuelles justifient pleinement l'utilisation de centrales nucléaires dans des grands réseaux interconnectés.

Aussi bien pour les centrales thermiques conventionnelles que nucléaires, la puissance unitaire a fortement augmenté au cours des dernières années et a été fixée par un compromis entre la réduction des coûts unitaires de premier établissement et des frais d'exploitation et la nécessité d'installer dans les réseaux une puissance accrue permettant de maintenir, dans des limites acceptables, les risques d'interruption de fourniture d'électricité résultant de défaillances.

Il est intéressant de remarquer à ce propos que si le coût unitaire de premier établissement des centrales thermiques classiques varie suivant la puissance 0,7 autour de 50 MW, il varie suivant la puissance 0,9 vers 600 MW. La réduction de ce coût unitaire par augmentation de la puissance des installations subit donc une saturation. Cet effet n'a pas été remarqué pour les centrales nucléaires dont le coût de premier établissement varie suivant la puissance 0,7 jusqu'à 500 et probablement jusqu'à 1000 MW.

Si on se limite actuellement à des groupes thermiques ne dépassant guère 600 MW pour une seule ligne d'arbre pour les unités thermiques conventionnelles, on doit déjà considérer des unités nucléaires de 500 MW au minimum et de 1000 MW de préférence. Il semble d'ailleurs que des centrales de 1000 MW correspondent déjà à un optimum pour un grand nombre de réseaux.

L'interconnexion des réseaux d'un même pays ainsi que les formules d'assistance mutuelle entre pays voisins permettent à des petits réseaux ou à des petits pays de prévoir des installations plus importantes, et par conséquent moins chères, que s'ils étaient isolés.

C'est cependant la densité de consommation qui fixe en dernier ressort la densité des réseaux d'interconnexion et la puissance des unités de production. Le secours réciproque que les centrales peuvent se prêter va décroissant avec leur distance et on peut définir, par une « constante d'espace », la distance au-delà de laquelle des centrales interconnectées dans un réseau d'étendue illimitée ne s'apportent plus de secours réciproque sensible.

D'autres problèmes traités par M. Ailleret étaient liés à l'intégration des capitaux dans la production d'énergie, au