

# utilisation des tirants précontraints

en Chine

par

**Li Shi-Zhong**

Ingénieur, Bureau d'étude et de prospection hydro-électrique du Nord-Est,  
Chang-Chun, relevant du Ministère de l'Industrie de l'Énergie  
de la République Populaire de Chine.

Le tirant précontraint est une pièce tendue d'un type nouveau. Les tirants scellés à une extrémité dans le massif rocheux profond peuvent profiter des efforts d'ancrage du terrain pour maintenir la stabilité d'ouvrages ou de massifs rocheux.

Depuis les années 60, on sait sceller des tirants dans n'importe quel terrain, non seulement rocher mais encore sable et gravier ou argile. L'expérience pratique d'un grand nombre de travaux a prouvé que la technologie du confortement des ouvrages ou des massifs rocheux par tirants précontraints est une technologie avancée.

En Chine, on a utilisé, en 1964, des tirants précontraints de 324 t (scellement injecté sous pression) pour consolider la fondation du barrage de Méchan et de bons résultats ont été obtenus. En 1965, on a utilisé des tirants précontraints de 300 t dans les zones d'appui des vannes-segments de la sortie de la galerie d'amenée d'eau d'Erlonchan. En 1974, on a réussi à renforcer une cavité de 40 m de portée par des tirants précontraints de 60 t (scellement mécanique). En 1975, dans la centrale de n° 310 (1), on a utilisé des tirants précontraints de 110 t (scellement mécanique, raccordement sous pression par explosion) pour renforcer le massif rocheux instable de l'entrée de la galerie d'amenée d'eau.

Actuellement le tirant précontraint est utilisé de plus en plus largement dans les travaux publics en Chine.

## 1 Aperçu de l'utilisation des tirants précontraints

Un tirant peut pénétrer dans un massif rocheux stable sur une profondeur de 10 à 40 m, en traversant le plan de glissement (ou la zone instable). On profite de la résistance à la traction élevée des fils d'acier pour augmenter l'effort normal et la résistance au cisaillement du massif rocheux (particulièrement dans le plan de structure faible) dans le but d'améliorer le comportement mécanique du rocher et d'assurer effectivement le rôle de renforcement.

L'utilisation des tirants est conditionnée par la géologie, la nature du massif rocheux, la méthode d'exécution, etc. Depuis les dernières années, la théorie du calcul des structures souterraines a progressé de nouveau à cause de développement de la mécanique des roches, des techniques de calcul, des techniques de mesure expérimentale. L'expérience pratique d'un grand nombre de soutènements et de traitements de protection par boulonnage et gunite a notamment permis l'évolution des tirants précontraints.

### 1.1 Utilisation des tirants dans des barrages

Des tirants précontraints peuvent être utilisés dans le renforcement des barrages déjà construits, pour augmenter leur stabilité et effectuer leur surélévation. On peut également construire des barrages précontraints pour réduire la dimension du profil.

Au mois de novembre 1962, alors que le niveau du réservoir atteignait la cote 124,89 m, une fuite importante est brusquement apparue dans la fondation de la rive droite du barrage de Maichan (2). La fondation du barrage en rive s'est inclinée et s'est élevée vers la gauche et vers l'aval, des diaclases se sont ouvertes et une fracture continue s'est formée sur 101 m de long, avec une largeur maximale de 17 mm. La fondation du barrage s'est désorganisée jusqu'à une profondeur de 15 à 25 m au-dessous de la surface de base. Après comparaison avec d'autres solutions, on a adopté la solution de renforcement par des tirants précontraints dont la longueur varie de 30 à 47 m. Les tirants précontraints, composés respectivement de 123 et 165 fils d'acier à haute résistance de 5 mm de diamètre, sont mis en place dans des forages de 110 mm et 130 mm de diamètre respectivement (fig. 1). La précontrainte de montage d'un tirant est de 240 t et 324 t respectivement. L'effort total de précontrainte, pour 102 forages permanents, est de 24 200 t, ce qui a augmenté la stabilité du plan de glissement de l'accident et du plan de glissement profond, et empêché la déformation de la fondation du versant. En

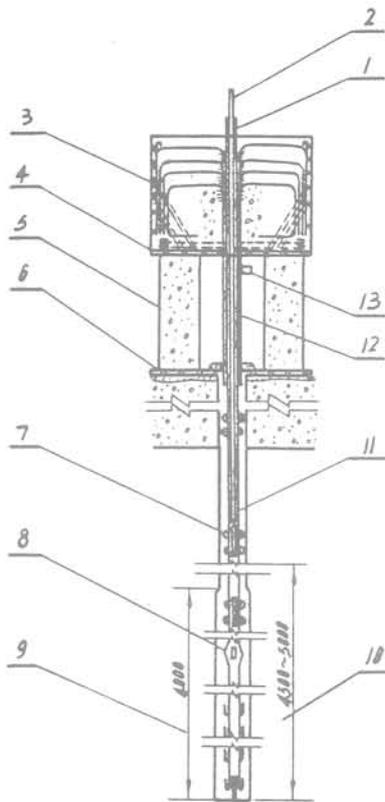


Fig. 1 Constitution des tirants précontraints utilisés dans la fondation du barrage de Maichan

- 1 forage d'injection
- 2 tubage en acier
- 3 tête d'ancrage en béton armé
- 4 plaque d'acier
- 5 bloc d'appui
- 6 plan pris en compression
- 7 distance des grilles 1 m
- 8 partie diffusante
- 9 forage élargi sur une longueur de 4 m
- 10 zone de scellement sur une longueur de 4 à 5 m
- 11 fils d'acier à haute résistance
- 12 tubage en acier
- 13 tubage de retour du mortier

1969, la cote 133,33 m a été atteinte par la retenue, et aucun phénomène anormal n'est apparu.

## 1.2 Utilisation des tirants dans une cavité de grande portée

On peut utiliser des tirants précontraints pour le soutènement et la protection de la voûte et des parois d'une cavité. On peut également utiliser simultanément, pour le renforcement d'une cavité, des tirants précontraints, le boulonnage, la gunite, le béton armé et l'injection sous pression.

On a ainsi renforcé une cavité de 40 m de portée, creusée dans un calcaire ordovicien à pendage doux avec des couches minces de calcaire marneux et de schiste argileux. Malgré les mesures prises pour le creusement par la galerie de faite, et la conservation de colonnes de rocher, il s'est pourtant produit des cassures du revêtement. Pour remédier à cela, on a mis en place quatre rangs de 60 tirants précontraints, composés de 6 torons de 7 fils de 4 mm, d'une capacité de 60 t et d'une longueur de 10 à 15 m, disposés suivant une direction radiale dans la zone supérieure de la voûte (fig. 2).

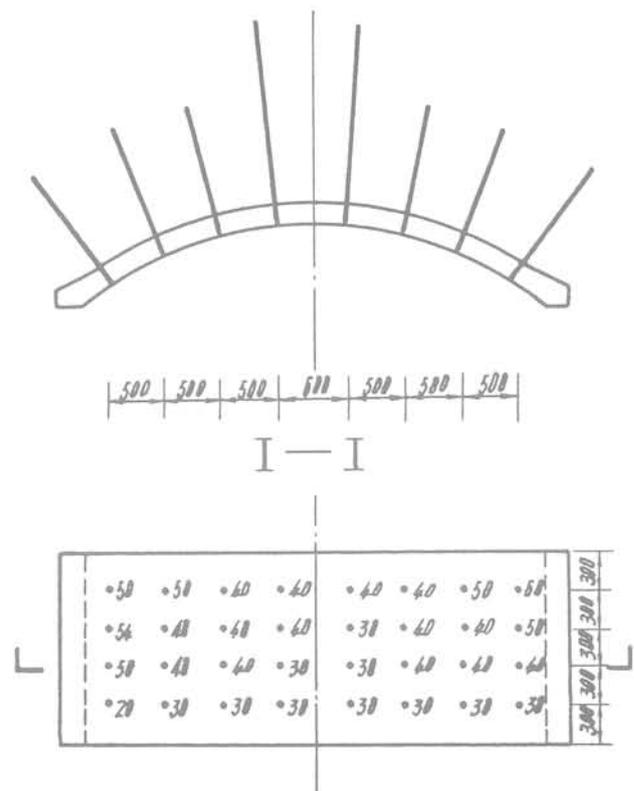


Fig. 2 Disposition des tirants et valeurs (en t) de la précontrainte

Un calcul par la méthode des éléments finis a montré qu'il existe une zone de contraintes de traction dans la voûte et le radier. Avant la mise en tension des tirants, la plus grande contrainte de traction sur la paroi de la cavité est 0,4 MPa en haut et 0,9 MPa en bas. La plus grande contrainte de compression apparaît dans les voussoirs et est environ 10,4 MPa. Après la mise en précontrainte, la zone de contraintes de traction de la voûte s'est déplacée au-delà de l'extrémité des tirants. Une zone de contraintes de compression uniforme apparaît dans la zone renforcée. Il n'existe plus qu'une petite zone de contraintes de traction sur la paroi de la cavité (fig. 3).

A cause de l'augmentation de la compression entre les couches rocheuses produite par les tirants précontraints, un anneau de rocher portant s'est formé sur une certaine profondeur, ce qui augmente la stabilité et la continuité du massif rocheux et sa capacité portante. Le contact entre la couche rocheuse et le revêtement est devenu plus serré, ce qui améliore la condition de contrainte du revêtement. Les résultats d'observations ont prouvé que la voûte a été stabilisée.

## 1.3 Utilisation des tirants dans un massif rocheux

La prise d'eau de la centrale n° 310 (1) est à 25 m au-dessous du niveau normal de la retenue. L'assise rocheuse est principalement constituée de diorite. Le rocher est altéré sur 3 à 3,5 m d'épaisseur. Des diaclases et des failles se développent dans le versant. La direction d'une famille de discontinuités est à peu près perpendiculaire au bord du réservoir (un lac naturel), parallèle à l'axe de la prise d'eau. La direction d'une autre famille est parallèle au bord du lac. C'est pourquoi de nombreux dièdres instables se sont formés dans le massif rocheux, après l'explosion du bouchon rocheux de la prise d'eau. Le plus important

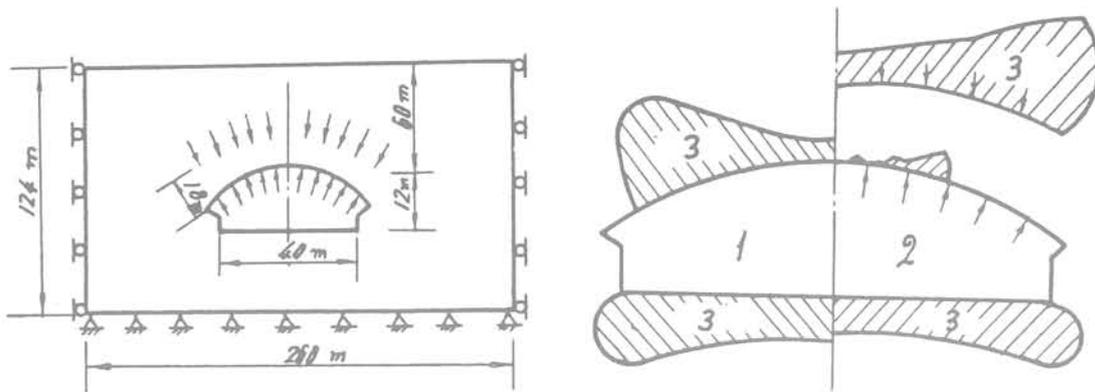


Fig. 3 Effet de renforcement par tirants précontraints, calculé par la méthode des éléments finis

- 1 caverne non mise en précontrainte
- 2 caverne mise en précontrainte
- 3 zone hachurée : contraintes de traction

est un massif de glissement formé par un filon de granite et des failles (F5), soumis à une force totale du glissement de 726 t environ (fig. 6 et 7).

Pour empêcher le glissement du massif rocheux suivant la faille (F5) et la fermeture de la prise d'eau pendant l'explosion du bouchon rocheux ou l'exploitation de la centrale, il a fallu réaliser un renforcement du massif. Plusieurs solutions de renforcement ont été comparées : poutres en béton armé coulées en galerie dans le versant pour résister au cisaillement; poutres en acier enfoncées dans des forages pour accroître la résistance au cisaillement, etc. La solution de renforcement par des tirants précontraints présente les avantages suivants : il est possible de supprimer toute excavation et l'usage d'explosif dans le versant près du bouchon rocheux; l'exécution n'est pas influencée par le niveau d'eau du lac; le domaine de renforcement est plus étendu (la plus grande distance atteinte dans le massif rocheux est de 22 m, jusqu'au toit du bouchon rocheux). On peut utiliser les forages des tirants pour une injection de consolidation. La solution par tirants précontraints est notamment une méthode de renforcement actif du massif rocheux. La mise en tension permet d'améliorer la résistance du plan faible du rocher et d'augmenter la capacité portante du massif rocheux. La solution de renforcement par tirants précontraints a été finalement adoptée. La constitution des tirants de la centrale n° 310 (1) est présentée dans la figure 4.

Les résultats de l'observation de l'explosion du bouchon rocheux et de l'exploitation depuis 4 ans ont prouvé que les tirants précontraints mis en place assurent efficacement le renforcement du massif rocheux de la prise d'eau de la centrale.

#### 1.4 Utilisation des tirants dans la zone d'appui de vannes-segments

Dans la centrale n° 330 (3), par exemple, la poussée de l'axe des vannes-segments est de 2 800 à 4 200 t. Si on adopte une structure en béton armé, il faut disposer en éventail 1 120 cm<sup>2</sup> d'armatures dans la zone d'appui d'une pile de vanne, et il est difficile de satisfaire le critère de la résistance à la fissuration du béton. Par la solution utilisant du béton armé avec des tirants précontraints, on peut économiser environ 1/3 d'acier et, éviter la fissuration.

D'après les résultats d'essais et de calculs faits sur ordinateur électronique, on a déterminé que la force de traction de mise en place d'un tirant précontraint est de 300 t. Un tirant est composé de 162 fils de 5 mm de diamètre ou de 84 fils de 7 mm de diamètre. Deux rangs des tirants dont chacun est composé de 10 fils (la longueur est respectivement de 20 m et 16,5 m) sont disposés en forme de secteur dans les piles de vanne de 3 m d'épaisseur. La force composée et la poussée d'axe sont superposées (photos 1, 2 et 3).

#### 1.5 Utilisation des tirants pour le traitement d'éboulements dans une cavité

La portée de la cavité est de 30 m, le piédroit a 17,7 m de haut. La cavité se trouve dans une couche de phyllite. Des failles se développent dans le massif rocheux avec un remplissage en matériaux argileux, devenant plus marneux au contact de l'eau. La valeur d'expansion libre est de 20 mm/m. La résistance à la compression simple est de 0,3 à 0,4 MPa pour le matériau hors d'eau et 0,1 à 0,2 MPa après imbibition. En mars et avril 1975, deux éboulements de rochers de 4 et 7 m se sont produits malgré la protection par boulonnage, gunite et grille d'acier. On a stabilisé ces éboulements en utilisant des câbles de torons composés chacun de 7 fils d'acier de 4 mm de diamètre, d'une longueur de 14 et 18 m, précontraints à 15 t et 36 t et injectés en deux fois (fig. 5).

## 2 Conception des tirants précontraints

### 2.1 Disposition des tirants

Dans la zone de la prise d'eau de la centrale n° 310 (1), par exemple, le domaine à renforcer par des tirants précontraints est principalement le massif frontal au-dessus de la prise d'eau. On a disposé en fleur de prunier deux rangs de tirants, distants de 1,5 m environ en tête de forage et de 5 à 7 m à l'extrémité du forage; on a disposé également 6 tirants sur les deux côtés pour augmenter la compression latérale du massif rocheux. Les forages ont de 14 à 22 m de longueur (fig. 6).

La disposition des tirants est déterminée d'après la condition d'équilibre des forces (fig. 7).

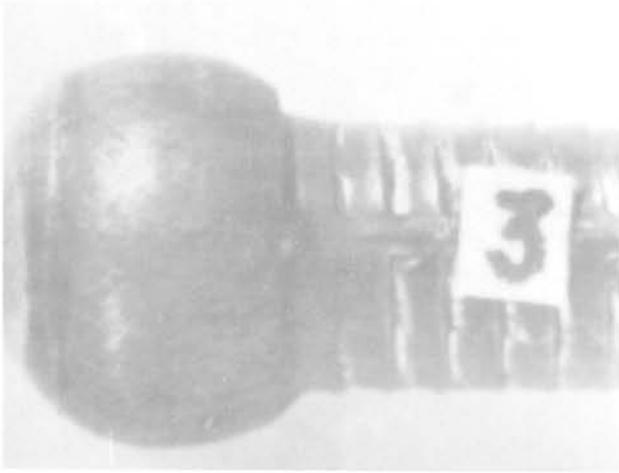


Photo 1 Fils d'acier à haute résistance derrière la tête d'ancrage

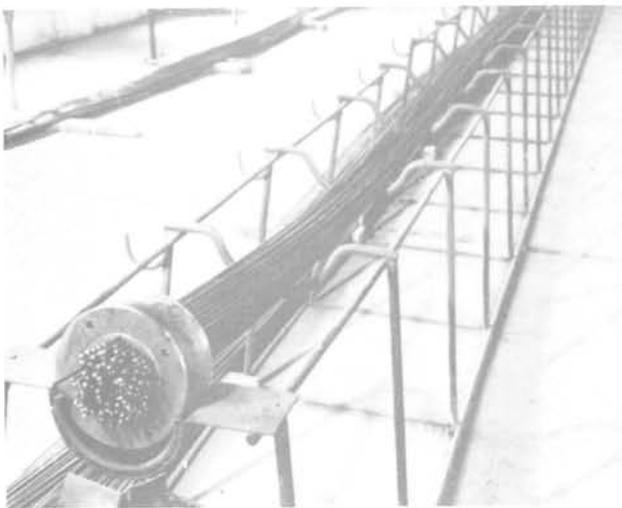


Photo 2 Tête d'ancrage extérieure et gerbe des fils à haute résistance

$$P = f \cdot Q \cdot \sin(\theta - \alpha) + Q \cdot \cos(\theta - \alpha) \quad (1)$$

où

P = force totale de glissement suivant le plan de glissement probable (déjà diminuée de la résistance au cisaillement du massif rocheux).

Q = force résultante des tirants dans le massif frontal du rocher au-dessus de la prise d'eau de la galerie.

$\alpha$  = inclinaison des tirants dans le massif frontal du rocher au-dessus de la prise d'eau de la galerie.

$\theta$  = angle de pendage du plan de glissement.

f = coefficient de frottement.

Pour obtenir la force maximale de résistance au glissement, il faut avoir :

$$\frac{dP}{d\alpha} = -f \cdot Q \cdot \cos(\theta - \alpha) + Q \cdot \sin(\theta - \alpha) = 0$$

soit  $f = \text{tg}(\theta - \alpha)$  c'est-à-dire  $\phi = \theta - \alpha$ .

Pour obtenir un résultat optimum, l'angle entre la direction de la force résultante des tirants et le plan de glissement probable doit être le plus proche possible de l'angle de frottement interne. La disposition des tirants est alors déterminée en fonction de la position de la galerie de travail.



Photo 3 Tirants dans la zone d'appui des vannes-segments

## 2.2 Analyse de la valeur de la précontrainte des tirants

Dans le cas de la prise d'eau de la centrale n° 310, d'après l'équilibre des forces (fig. 7), on a :

$$\frac{K \cdot P}{N} = (F_1 + F_3) + (F_2 + F_4) \cdot f \quad (2)$$

où

$$F_1 = F \cdot \cos(\theta - \alpha_1)$$

$$F_2 = F \cdot \sin(\theta - \alpha_1)$$

$$F_3 = F \cdot \cos(\theta - \alpha_2)$$

$$F_4 = F \cdot \sin(\theta - \alpha_2).$$

Les définitions de P,  $\theta$  et f sont les mêmes que dans la formule 1.

N = nombre de groupes des tirants (N = 7 pour le cas du massif frontal du rocher au-dessus de la prise d'eau de la galerie).

K = coefficient de sécurité (coefficient dynamique pour explosion de 1,5 et coefficient de perte de précontrainte de 10 % d'où K = 1,65).

$\alpha_1, \alpha_2$  = inclinaison des tirants supérieurs et inférieurs.

F = puissance unitaire d'un tirant (précontrainte de mise en place)

$$\text{d'où } F = K \cdot P / \{ N [ \cos(\theta - \alpha_1) + \cos(\theta - \alpha_2) + f \cdot \sin(\theta - \alpha_1) + f \cdot \sin(\theta - \alpha_2) ] \} = 89 \text{ t.}$$

## 2.3 Constitution d'un tirant

Le tirant d'ancrage est constitué de trois parties principales : partie passive (zone d'ancrage au terrain), partie libre, partie active (tête du tirant).

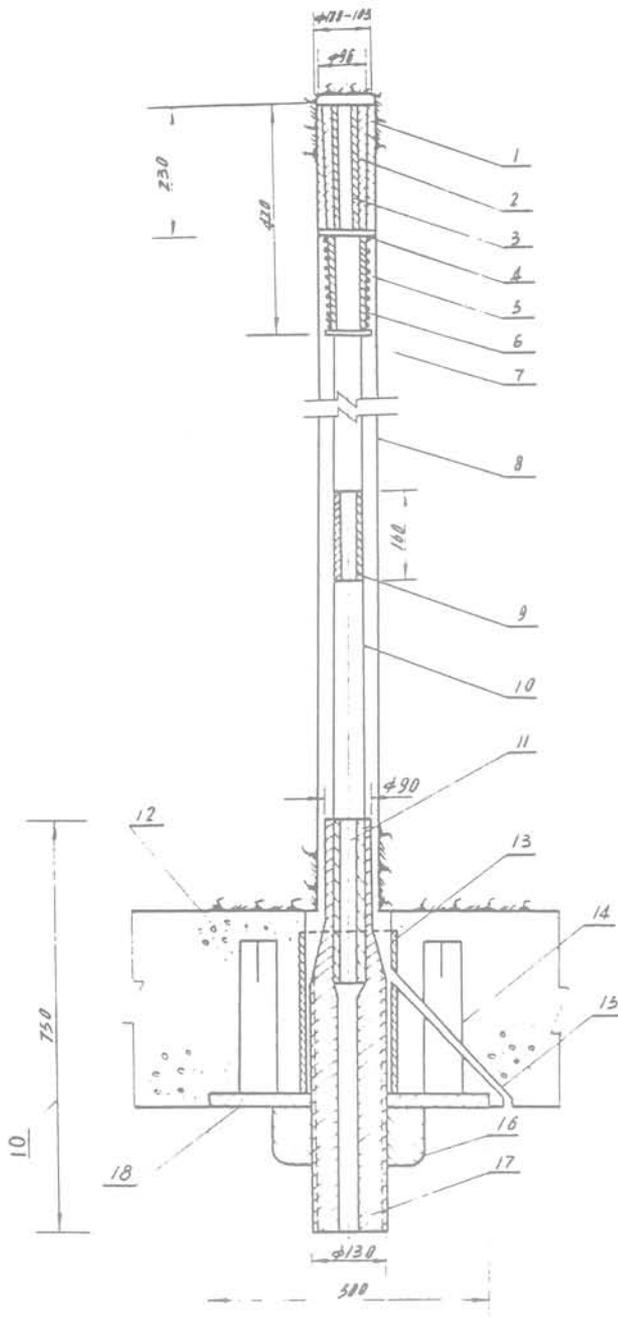


Fig. 4 Constitution des tirants utilisés dans la centrale n° 310

- 1 plaque de serrage extérieure
- 2 obturateur interne
- 3 manchon de tubage intérieur
- 4 cercle d'appui
- 5 ressort
- 6 manchon de tubage pour ressort
- 7 cercle de soutien
- 8 forage
- 9 manchon de tubage intermédiaire
- 10 fils d'acier du tirant
- 11 manchon du tubage intérieur
- 12 appui en béton
- 13 manchon de tubage à l'extrémité du forage
- 14 plaque d'ancrage
- 15 tubulure de retour du mortier
- 16 boulon
- 17 bouchon d'ancrage extérieur
- 18 plaque d'appui à l'extrémité du forage

### 2.3.1 Partie passive

La partie passive est à l'extrémité du forage. Le rôle de cette partie est de fournir la force d'ancrage lors de mise en tension. Le type d'ancrage au terrain peut être soit un scellement au mortier d'injection, soit un scellement mécanique.

Le scellement au mortier d'injection, adopté dans la fondation du barrage de Méchan, consiste à sceller des fils d'acier par du ciment pur dans la partie élargie en bout de forage. Il faut non seulement assurer l'adhérence entre le mortier et le piédroit du rocher, mais encore le mortier en prise ne doit pas être abîmé après la mise en tension.

Le mortier doit remplir tout l'espace entre les fils d'acier pour assurer la résistance à l'arrachement et la protection des fils contre la corrosion.

Dans le cas d'un tirant de 110 t de la centrale n° 310, si le scellement d'injection était adopté, il faudrait une longueur de scellement de 1,5 à 2 m, et l'opération de mise en tension ne pourrait avoir lieu qu'un mois après l'injection du scellement. Pour accélérer l'exécution et augmenter le plus possible l'étendue de renforcement, on a adopté le scellement mécanique du type coquille à expansion. La liaison entre un obturateur intérieur et le rocher est obtenue par trois plaques de serrage extérieures. Pour le scellement mécanique, les conditions techniques requises pour la réalisation de la tête d'ancrage et du diamètre du forage sont sévères, sinon il est difficile d'obtenir la force de scellement prévue.

### 2.3.2 Partie libre

C'est la partie principale du tirant. Dans le cas de la centrale n° 310 chaque tirant est composé de 22 fils d'acier de 7 mm de diamètre. La contrainte limite de traction est de 1740 MPa. La qualité des forages d'ancrage permanent pour le barrage de Méchan est excellente, et il n'y a pas de phénomène de fissuration. Mais il est possible de voir apparaître la corrosion sous contrainte et la fissuration (poursuivie jusqu'à la rupture dans un forage d'essai), si les mesures prises contre la corrosion à long terme des tirants à haute résistance sous contraintes élevées ne sont pas convenables. C'est pourquoi, nous admettons en général que la contrainte de projet utilisée doit être 65 % de la contrainte limite de traction. Dans le cas de la centrale n° 310, compte tenu de l'influence de la vibration due à l'explosion et de la variation de contrainte, on a retenu une contrainte de projet égale à 60 % de la contrainte limite de traction, soit 1045 MPa, c'est-à-dire une mise en tension de 90 t par tirant, l'effort limite de traction étant de 147 t.

### 2.3.3 Partie active (tête extérieure du tirant)

Son rôle consiste à maintenir la précontrainte des tirants après leur mise en tension et à régler la précontrainte si nécessaire. C'est pourquoi les conditions requises pour cette partie active sont un ancrage assurant un réglage facile et une perte de précontrainte minimale.

La tête extérieure des tirants utilisée pour le renforcement d'une cavité à grande portée, mentionnée précédemment (fabriquée par l'Institut de génie civil du Bâtiment de Pékin), porte un anneau d'ancrage hexagonal et un bouchon d'ancrage cylindrique, tendu par un vérin creux du type  $y_c - 60$ . La tête d'ancrage extérieure dans la fondation du barrage de Méchan est

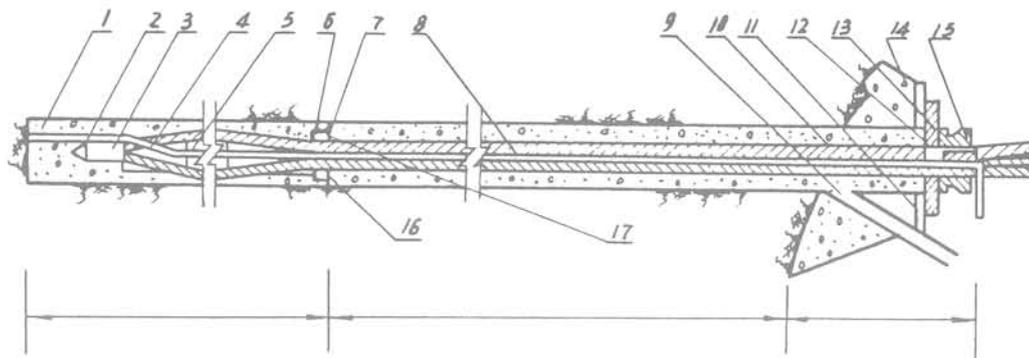


Fig. 5 Constitution de tirant utilisé pour le traitement d'un éboulement dans une cavité

- 1 tige de fixation de position
- 2 tuyau d'évacuation d'air
- 3 tête d'ancrage du tirant
- 4 tuyau d'évacuation du coulis
- 5 anneau
- 6 anneau d'arrêt du coulis
- 7 bouchon pour fixer les fils
- 8 tubage
- 9 tubage d'injection
- 10 fils d'acier
- 11 plaque d'appui fixée
- 12 plaque d'appui mobile
- 13 cercle d'ancrage extérieur
- 14 massif de béton
- 15 bouchon d'ancrage extérieur

en béton armé (diamètre de 0,8 à 1 m, hauteur de 0,8 à 1 m résistance admissible de 50 MPa). La tête d'ancrage extérieure dans la centrale n° 310 est un boulon en acier (A3), le raccordement entre la tête d'ancrage extérieure et les fils d'acier étant réalisé suivant la technologie du raccordement sous pression par explosion (4).

La partie active comprend encore le cale en béton et la plaque d'appui dont le rôle est de permettre la perpendicularité entre le plan de l'orifice de forage et le tirant. Afin d'éviter la rupture de la roche à cause de la concentration des contraintes, on scelle la tête du tirant à la plaque d'appui après la mise en tension, puis la plaque d'appui transmet uniformément la précontrainte au rocher.

### 3 Essai des tirants précontraints

#### 3.1 Essai de traction des fils d'acier à haute résistance

Les fils d'acier adoptés dans la fondation du barrage de Méchan, de 5 mm de diamètre, fabriqués par l'usine d'acier de Tiensin, sont des fils d'acier étirés à froid. Les normes de fabrication de l'usine sont : résistance limite de traction 1600 MPa, nombre de courbages de 180° à froid  $\geq 4$ , pourcentage d'allongement 3%. Les résultats de contrôle d'exécution ont montré que la résistance limite de traction est supérieure à 1700 MPa pour 94,6% des mesures et inférieure à 1600 MPa seulement pour 0,37% des mesures.

De nombreux essais et mesures *in situ* ont montré que les tirants sont mis en surtension 2 à 3 fois pendant une demi-heure à 75% de la résistance limite de

traction. La contrainte correspondant à la limite d'écoulement (contrainte produisant une déformation permanente de 0,2% après le déchargement) satisfait le critère de projet (inférieure ou égale à 80% de la contrainte limite de traction). Le module d'élasticité est augmenté à  $2,10^5$  MPa environ, mais la plasticité est baissée.

Les fils d'acier à haute résistance utilisés dans la centrale n° 310, de 7 mm de diamètre, sont de fabrication japonaise. La résistance limite de traction mesurée est de 1740 à 1750 MPa, sans grande dispersion. Le module d'élasticité est de  $2,25 \cdot 10^5$  MPa pour une contrainte inférieure à 1300 MPa, ce qui montre que la qualité est excellente.

#### 3.2 Essai du mortier d'injection

##### 3.2.1 Essai

Dans le cas du réservoir du Shuanpai, on a utilisé un ciment à base de silicate de la classe 600, avec malaxage artificiel ou mécanique (vitesse de rotation 210 tr/mn). La résistance à la compression du mortier de ciment peut atteindre 50 MPa pour un rapport eau-ciment inférieur à 0,43. Dans le cas du réservoir de Méchan, la vitesse de rotation du mélangeur est de 460 tr/mn. Le temps de mélange est de 5 minutes. Pour un rapport eau/ciment de 0,4 à 0,45 et un dosage à 0,20% de plastifiant, la résistance à la compression simple à 28 jours est de 60 MPa, la valeur maximale pouvant atteindre 86 MPa. On n'a observé aucune fissure du mortier de ciment de prise dans les forages de tirants. Tous les espaces annulaires entre les fils des tirants sont remplis par le mortier. De plus il n'y a pas de bulles de gaz dans les forages. L'adhérence entre la paroi et le mortier est excellente.

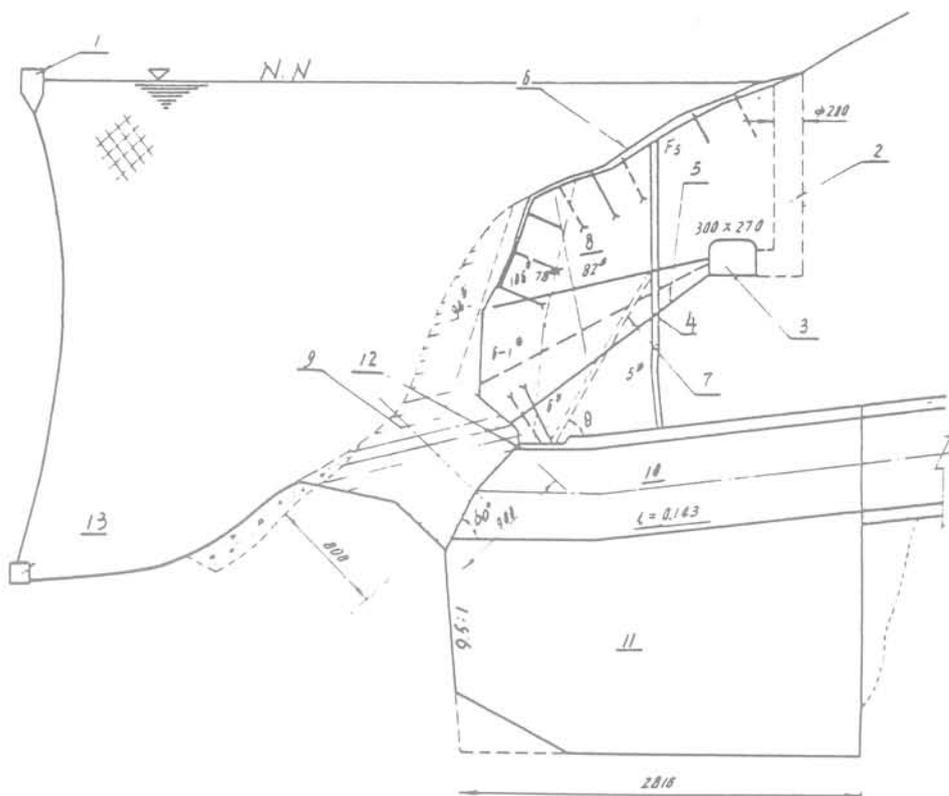
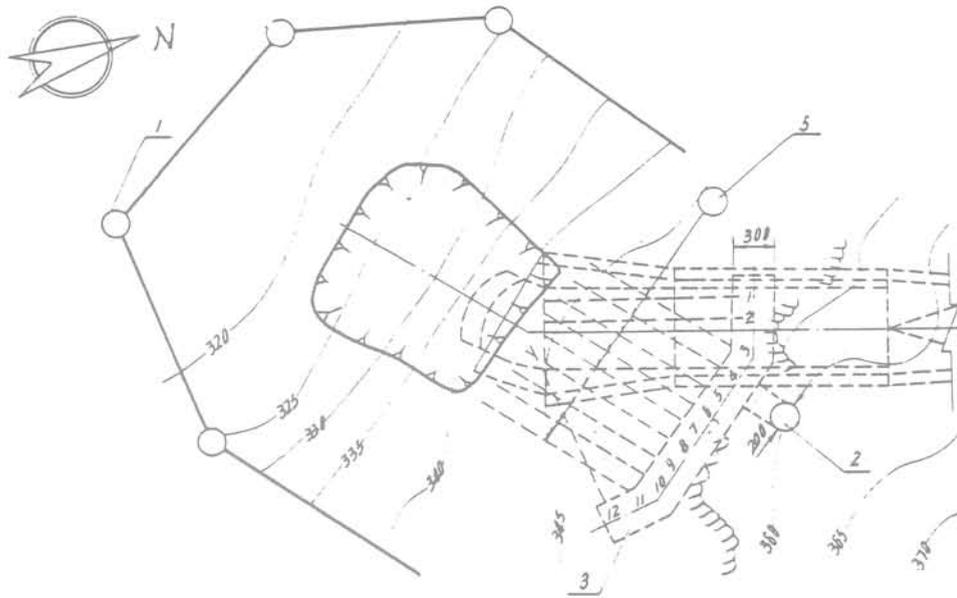


Fig. 6 Disposition des tirants de la prise d'eau de la centrale n° 310

- 1 flotteur
- 2 puits
- 3 galerie de travail
- 4 faille
- 5 tirants précontraints
- 6 béton injecté
- 7 pendage de la roche
- 8 boulonnage
- 9 bouchon rocheux
- 10 galerie d'amenée d'eau
- 11 fosse d'accumulation des pierres
- 12 tronçon de gunite
- 13 stabilisateur

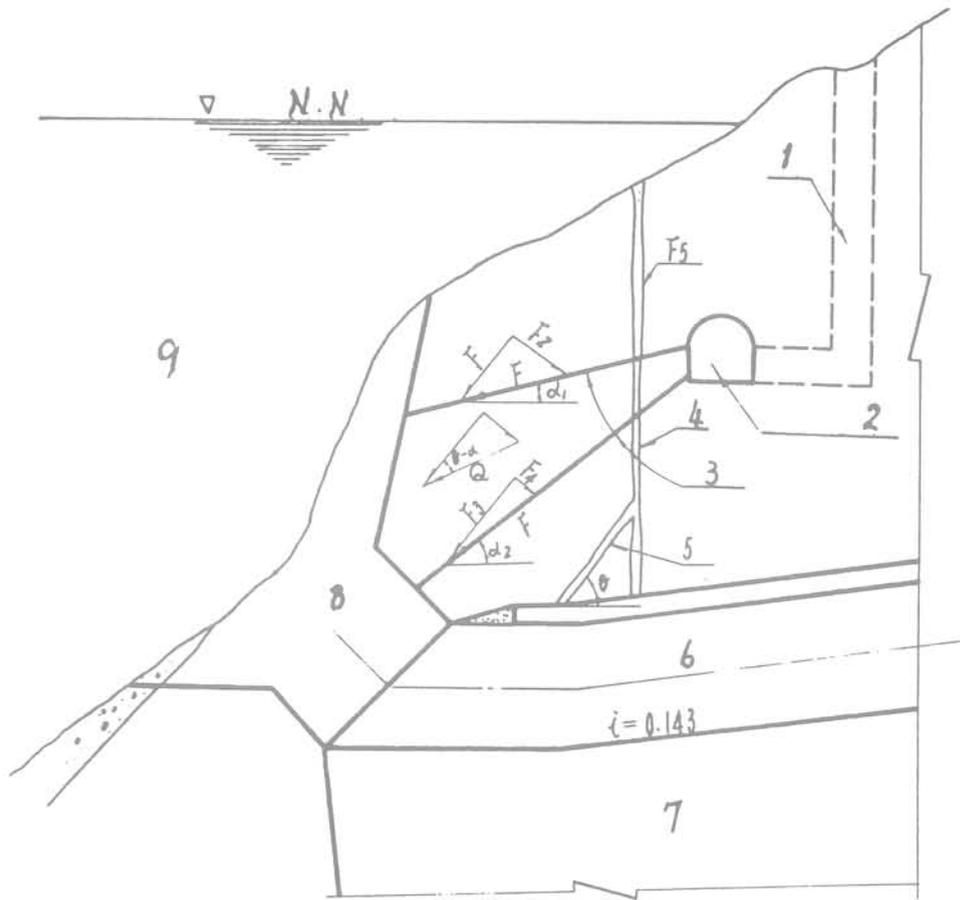


Fig. 7 Schéma du calcul du tirant précontraint

- 1 puits
- 2 galerie de travail
- 3 tirants précontraints
- 4 faille
- 5 pendage de la roche
- 6 galerie d'amenée d'eau
- 7 fosse d'accumulation des pierres
- 8 bouchon rocheux
- 9 lac naturel

### 3.2.2 Imperméabilité du mortier de prise

Si la couche de protection des fils est très mince, elle ne satisfait pas la condition requise d'imperméabilité, ce qui influence la durabilité de la précontrainte. Si la couche de protection est surépaisie de 5 mm, on peut par exemple diminuer les 52 fils du rang extérieur du tirant utilisé dans la fondation du barrage de Méchan, soit 42 % des 123 fils du tirant. C'est pourquoi il est nécessaire de contrôler que l'épaisseur de la couche de protection est convenable. Les résultats des essais et l'expérience pratique de travaux ont montré que l'épaisseur minimale de la couche de protection doit être entre 14 et 16 mm pour satisfaire le critère d'imperméabilité sous 1 MPa.

### 3.2.3 Scellement

Le rocher des forages d'essai du réservoir de Shuangpai est constitué de grès rouge violacé et de schiste. Pour un rapport eau/ciment de 0,38 à 0,40 et une longueur de la zone d'ancrage de 3,58 m, la force d'ancrage d'un tirant à 123 fils de 5 mm de diamètre dépasse 280 t (force d'ancrage de projet de 270 t). La valeur maximale atteinte est 390 t. On a fait des essais analogues dans le cas du réservoir de Méchan. La

force d'ancrage peut dépasser 240 t pour une longueur de la zone d'ancrage de 2 m. La zone de scellement par injection peut donc fournir une résistance suffisante à l'arrachement.

### 3.3 Essai de raccordement sous pression par explosion

En ce qui concerne les tirants de la centrale n° 310, on a adopté la technologie du raccordement sous pression par explosion (4) pour le raccordement entre la tête d'ancrage extérieure ou intérieure et les fils à haute résistance. La longueur de superposition est respectivement de 20 et 23 cm. On peut estimer la quantité d'explosif d'après les formules suivantes :

$$q = K_c \cdot S \cdot \delta \quad (3)$$

$$Q = \sum q \cdot l \quad (4)$$

avec :

- Q = quantité totale d'explosif (gramme).
- q = quantité d'explosif utilisée par unité de longueur du manchon tubulaire (g/cm).
- l = longueur du manchon tubulaire chargé d'explosif (18 cm).
- K<sub>c</sub> = coefficient de quantité d'explosif, obtenu

expérimentalement pour un seul fil d'acier ( $K_c = 3,32 \text{ g/cm}^3$  pour un explosif au nitrate d'ammoniaque).

S = périmètre du manchon tubulaire extérieur (cm).

$\delta$  = épaisseur de la paroi du tube (1,4 cm).

introduisant les valeurs mentionnées dans la formule (4) ci-dessus on obtient  $Q = 2310$  grammes, mais dans la pratique on prend  $Q = 2550$  grammes. Après le raccordement des tirants sous pression par explosion, des essais de traction ont été faits à l'Institut du Bâtiment relevant du Ministère de la Métallurgie : à l'exception d'un tirant rompu pour une traction de 110 t à cause de l'influence d'une reprise de soudure électrique, les cinq autres ont résisté à une traction de 132 t, et deux d'entre eux ne se sont rompus à une extrémité du manchon que pour une traction de 147 t et 150 t. La raison principale de la liaison solide du raccordement sous pression par explosion est la formation d'un cône de métal au raccordement. Le manchon tubulaire se déforme brusquement sous la pression de l'explosion, en produisant un « écoulement » remplissant tout l'espace entre les fils d'acier, ce qui permet le raccordement entre les fils et le manchon (photo 4).

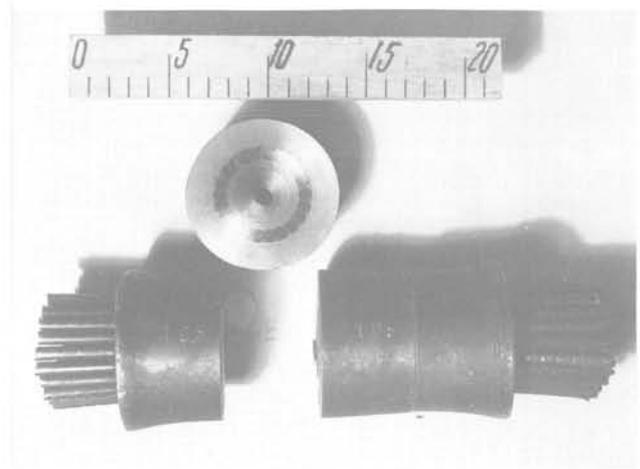


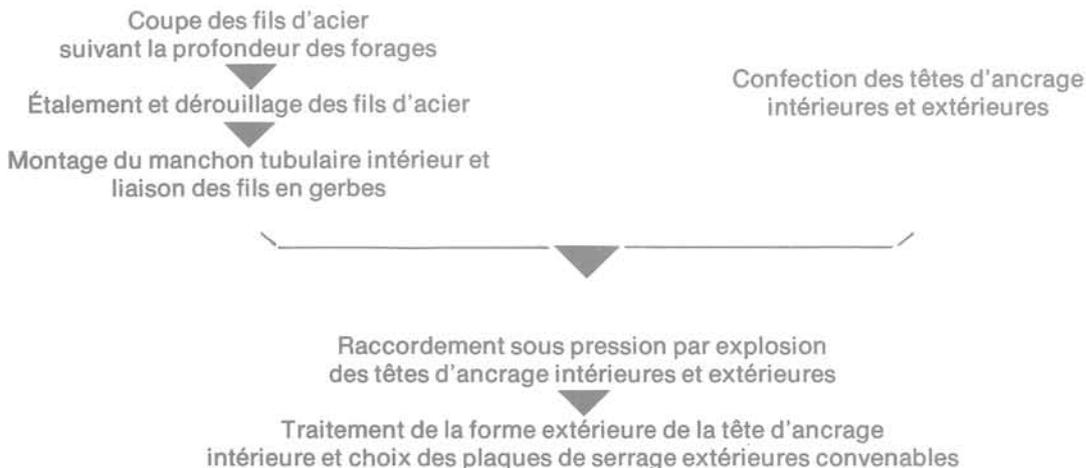
Photo 4 Analyse de la section après le raccordement sous pression par explosion

#### 4 Exécution des tirants précontraints

Le processus technologique d'exécution des tirants précontraints dans la centrale n° 310 est le suivant :



Le processus de confection des tirants est le suivant :



Le processus de confection des autres types de tirants est analogue à celui des tirants utilisés dans la centrale n° 310. Pour les tirants utilisés dans la fondation du barrage de Méchan, par exemple, il faut encore, après le scellement des tirants au terrain, effectuer le bétonnage de la tête d'ancrage extérieure et le traitement de protection provisoire contre la corrosion, puis faire la mise en tension.

#### 4.1 Forage

La qualité des forages a une influence directe sur l'effet d'ancrage. On impose généralement que la déviation de tout le forage soit inférieure à 2 à 4 degrés, et le débit d'imprégnation inférieur à 0,2 à 0,4 l/mn. Les forages doivent être nettoyés du fluide de perforation et des sédiments.

#### 4.2 Coulage du socle en béton

La plaque d'appui en acier en tête de forage doit être perpendiculaire à l'axe du forage. Dans la centrale n° 310, on a utilisé un béton de la classe 250, avec comme additif 0,04 % de trichanomine. La résistance est supérieure à 15 MPa après 7 à 10 jours et la mise en tension peut être alors effectuée.

#### 4.3 Confection des gerbes de fils d'acier

Cette phase comprend le déroulement, la coupure, le dérouillage, la protection contre l'oxydation et la confection des gerbes de fils d'acier.

#### 4.4 Technique du raccordement sous pression par explosion (4) des tirants de la centrale n° 310

Les gerbes des fils d'acier préparées sont disposées sur une plate-forme horizontale pour le dressage. Après le raccordement sous pression par explosion avec les têtes d'ancrage intérieures et extérieures, elles constituent des tirants prêts à l'emploi (photo 5).

Les paramètres considérés pour le raccordement sous pression par explosion sont la longueur de recouvrement, le diamètre et la forme du tube rempli d'explosif et la quantité d'explosif. Le remplissage d'explosif est effectué symétriquement en réalisant une densité compactée uniforme (photo 6). Pour éviter que la compression due à l'explosion ne réduise trop les trous d'injection dans les têtes d'ancrage, on dispose un sac rempli d'eau dans le manchon tubulaire, ce qui produit l'effet escompté.

#### 4.5 Transport et mise en place des tirants dans le forage et scellement de la tête d'ancrage intérieure

#### 4.6 Mise en précontrainte

La mise en précontrainte des tirants utilisés pour les barrages de Méchan et de Shuangpai a été réalisée en 3 phases successives afin d'augmenter la limite d'écoulement des fils d'acier et de réduire leur relaxation, de réduire la perte par frottement des tirants contre la paroi des forages, et la perte de précontrainte, et de permettre la correction de l'hétérogénéité du chargement des tirants due aux erreurs de longueur des fils d'acier. En dernière phase, une surtension est maintenue pendant une heure pour augmenter la limite d'écoulement du fil, puis on effectue un déchargement

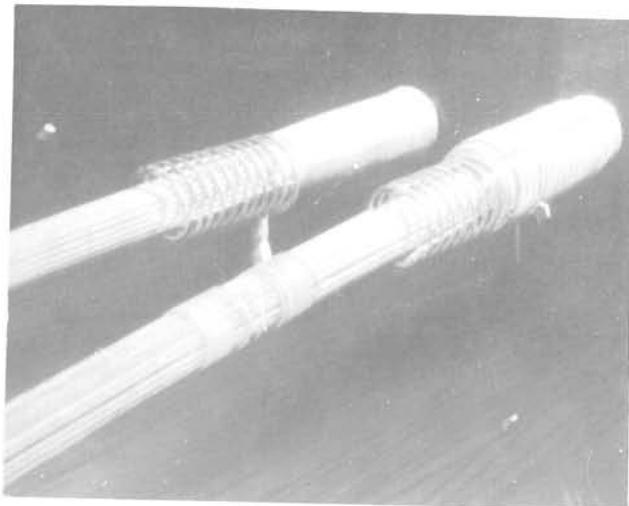


Photo 5 Tête d'ancrage intérieure après le raccordement sous pression par explosion



Photo 6 Raccordement sous pression par explosion de la tête d'ancrage intérieure

et on fixe le précontrainte à la valeur de projet.

Après la mise en tension des tirants, à cause de la Shuangpai des fils d'acier, du fluage du massif rocheux et du socle d'appui en béton armé, et de l'influence réciproque de la déformation du rocher encaissant au moment de la mise en tension des tirants voisins, il faut effectuer une nouvelle mise en tension jusqu'à la valeur de projet après l'arrêt des pertes de précontraintes. On l'appelle la mise en tension de compensation. D'après l'expérience des barrages de Méchan et Shuangpai, la majeure partie de la perte de précontrainte apparaît pendant le premier mois suivant la mise en précontrainte, c'est pourquoi il est acceptable d'effectuer la mise en tension de compensation un mois après la fin de la mise en tension initiale.

#### 4.7 Injection de remplissage des forages

L'injection de remplissage des forages contenant des tirants a pour but de réduire la perte de précontrainte des tirants, de protéger et d'assurer le renforcement de tout le massif rocheux le long de toute la longueur des tirants.

Le ciment utilisé dans la centrale n° 310 est de la classe 70, le rapport eau/ciment étant de 0,5 pour satisfaire les conditions imposées d'exécution des travaux en hiver, de prise rapide et de résistance initiale élevée. On a ajouté 0,03 % de trichanomine, 0,3 % de chlorure de sodium et 0,03 % de nitrate de sodium dans le but de diminuer l'effet d'érosion des tirants. La résistance à 11 jours atteint déjà 29 MPa, au moment de l'explosion. Pendant l'injection, il faut insérer le tuyau d'injection au bout du forage. Si le tuyau d'injection est plus bas que le niveau du mortier, on injecte du mortier de ciment en arrachant le tuyau d'injection. On arrête l'injection quand la densité de mortier de retour est la même que celle du mortier à l'entrée du forage.

## 5 Analyse sommaire et orientation du développement

### 5.1 Efficacité du renforcement et domaine étendu d'utilisation

L'expérience pratique de nombreux travaux a montré que le renforcement par tirants précontraints présente les avantages d'une technologie avancée : garantie de sécurité, coût raisonnable, exécution rapide, utilisation des matériaux et d'instruments ordinaires. L'utilisation de tirants précontraints, en même temps que celle du boulonnage et de la gunite, représente une mesure efficace pour résoudre les problèmes de soutènement et de protection de cavité à grande portée. On peut également les utiliser pour consolider un versant glissant, la fondation d'un bâtiment de grande hauteur, une pile de pont, un massif de butée de conduite forcée d'une centrale hydro-électrique, etc. L'utilisation des tirants s'est étendue de plus en plus largement au cours des dernières années.

### 5.2 Matériaux des tirants précontraints

Les tirants sont constitués de matériaux à haute résistance à la traction. Les matériaux utilisés le plus souvent sont : fils d'acier parallèles à haute résistance (diamètre de 5 à 9 mm), toron (diamètre de 2,5 à 4 mm), câble (diamètre de 5 à 9 mm) et barre (diamètre de 25 à 40 mm). Les fils parallèles sont les plus économiques. Les fils d'acier dans les câbles et les torons sont soumis à des contraintes de flexion, ce qui conduit à une plus grande perte de précontrainte et à une durée plus longue pour atteindre l'équilibre de contrainte interne des câbles. Du point de vue de la protection contre l'oxydation, il est préférable d'augmenter le diamètre des fils d'acier, mais la résistance limite à la traction des barres utilisées n'est souvent équivalente qu'à 1/2 à 1/3 de celle de la gerbe de fils à haute résistance.

Dans certains pays, on a commencé à utiliser des tôles d'acier à haute résistance ou des plaques plates de ressort de mise en précontrainte et des études sont faites sur des tirants en nylon et en fibres de verre.

### 5.3 Tête d'ancrage intérieure

Le scellement mécanique a les avantages suivants : longueur de scellement courte, domaine d'ancrage étendu, rythme d'exécution rapide, pas de problème dû à l'injection en plusieurs phases, mise en tension tout

de suite après le montage. Ses inconvénients sont : travail de confection mécanique important, prix élevé, force d'ancrage instable.

Dans la centrale n° 310, par exemple, on n'a scellé que 20 tirants en 19 jours et la précontrainte de 1/3 des tirants n'a pas atteint la valeur de projet de 90 t. Ce type de tête d'ancrage demande un scellement serré entre la tête d'ancrage et la paroi de forage et il faut éviter de les disposer dans une couche de rocher faible.

La tête d'ancrage intérieure réalisée par injection de mortier est plus longue. Le domaine de consolidation par les tirants est relativement petit. La mise en tension des tirants est effectuée un certain temps après l'injection du scellement. Les avantages de ce type de scellement sont : coût bas, force d'ancrage élevée et adaptation à des couches de rocher faibles. Dans certains pays, pour réduire la longueur de scellement, on a parfois adapté un obturateur à expansion dans le but d'augmenter la pression d'injection et la force de scellement. On a également employé la technique de « scellement de la racine », qui a l'avantage d'une capacité d'ancrage forte et stable. Un fluage de la tête d'ancrage flexible apparaît pendant la première phase de la mise en tension, ce qui peut aider à uniformiser la précontrainte des fils d'acier.

### 5.4 Perte de précontrainte des tirants

L'effet d'ancrage des tirants sur le massif rocheux dépend de la stabilité de la précontrainte. La perte de précontrainte comporte deux parties : la première est la perte pendant le début de la mise en tension, qui dépend de la technologie, de la déformation des équipements d'ancrage, du frottement sur la paroi des forages, de la friction des appareils utilisés pour la mise en tension, etc. La deuxième est la perte qui est entraînée par le fluage dans le temps du béton et du massif du rocher, la relaxation de la précontrainte des tirants, les vibrations dues aux explosions, etc.

Dans le cas des tirants utilisés dans la fondation du barrage de Méchan, d'après les observations de 1965 à 1972, la charge des gerbes de fils est uniforme, après trois phases de mise en surtension et la mise en tension de compensation. On a noté que la précontrainte a tendance à se stabiliser dans les 2 à 3 ans suivant la mise en précontrainte. La perte totale a été de 10 % environ.

Dans le cas de la centrale n° 310, on a noté que la première perte de précontrainte est généralement de 20 à 50 % de la perte totale à cause de la plaque d'appui rugueuse. En cas d'utilisation d'une plaque d'appui épaisse sans rugosité, la perte de précontrainte peut être limitée à 5 % au moment du scellement. La perte de la précontrainte après le scellement dépend de la qualité du rocher encaissant autour de la tête d'ancrage intérieure et du type de mise en tension : plus de 5 % pour un rocher de mauvaise qualité, 10 % environ pour un rocher de bonne qualité. L'observation de l'explosion du bouchon rocheux a montré que les tirants scellés par injection de ciment ont une meilleure résistance à la vibration, et une plus faible perte de précontrainte.

Les dispositions adoptées pendant les travaux de Méchan et de Shuangpai pour diminuer la perte de

précontrainte ont été efficaces, mais il a fallu trois mois entre le début du montage à la fin du scellement. Pour les travaux futurs, il semble que, pour la tête d'ancrage extérieure, on puisse adopter un ancrage en forme de rivet, ou en forme d'étoile. En ce qui concerne la tête d'ancrage intérieure, on peut utiliser un mortier de ciment à haute résistance et à prise rapide, qui permet une mise en tension dans les 7 à 10 jours.

Après une surtension (jusqu'à 2 fois) maintenue pendant 1 à 1,5 heures, on peut faire aussitôt le scellement à la tension de projet et l'injection de remplissage des forages. Il convient de majorer de 5 % environ la précontrainte par rapport à la valeur de projet pour compenser la perte de précontrainte. Cela permet d'accomplir le travail de montage d'un tirant en deux semaines environ et de simplifier les mesures de protection contre l'oxydation.

### 5.5 Technique du raccordement sous pression par explosion

La technique du raccordement sous pression par explosion pour le scellement de la gerbe de fils et la tête d'ancrage est une nouvelle technologie qui se révèle prometteuse : l'exécution est simple, la force d'ancrage est élevée, la qualité est excellente.

### 5.6 Protection des tirants contre l'oxydation

Actuellement les moyens utilisés pour la protection des tirants contre l'oxydation sont les suivants.

#### 5.6.1 Produits noirs plastiques

À titre expérimental, les forages des tirants de la fondation du barrage de Méchan ont été remplis de « gomme isolée » (5). Les fils du rang extérieur ont été enrobés par une toile de jute goudronnée. Quelques années après, on a observé que la protection était insuffisante pour empêcher la rouille.

#### 5.6.2 Mortier de ciment

Pour une couche de protection constituée de mortier de ciment de 15 à 20 mm d'épaisseur, on a un bon effet de protection contre l'oxydation, mais il faut bien répartir les fils de tirants pour avoir un enrobage uniforme par le mortier du ciment.

Il faut éviter également le phénomène de corrosion voltaïque produite par l'utilisation des tuyaux et de grilles. Nous recommandons que la précontrainte de projet soit égale à 65 % de la résistance limite.

#### 5.6.3 Résine synthétique

On a utilisé un vernis à base de résine synthétique, par exemple un vernis époxyque, et on a obtenu une bonne efficacité à court terme contre l'érosion. Mais la fragilité à l'hydrogène peut apparaître sous les contraintes élevées auxquelles sont soumis les tirants. L'oxydation se produit alors rapidement. Il convient donc d'imprimer les fils des tirants par une solution de ciment ayant un pH supérieur à 12.

### 5.7 Augmentation de la tension d'un tirant

L'augmentation de la tension nominale des tirants peut diminuer le nombre des forages et la quantité du travail

nécessaire à l'exécution des tirants, accélérer l'exécution et baisser le prix de revient.

L'utilisation des vérins de petit volume et de grande capacité va favoriser le développement des tirants. La valeur de tension de précontrainte la plus élevée atteinte actuellement est supérieure à 1 500 t. En Chine on peut fabriquer des machines permettant des mises en tension de 400 à 500 t.

Dans les dernières années, on a réussi à utiliser des têtes d'ancrage de type « rivet » de 120 t, pour le support en béton armé précontraint de la presse hydraulique de 5 000 t de Changhai. Le volume de la tête d'ancrage est petit. L'effet d'ancrage est efficace.

Dans la centrale hydro-électrique de Gezhouba sur le Yangzi, on a réalisé une tête d'ancrage de type « rivet » de 300 t avec un diamètre maximum de 220 mm et une hauteur de 95 mm.

### Remerciements

Cet article a été traduit, du chinois en français, par l'ingénieur Wang Cheng-Zi et révisé par Monsieur Pierre Londe. Je les remercie profondément ici.

### Notes

(1) La centrale n° 310 est la centrale souterraine du lac naturel de Jinpohu, sur le fleuve Mudanziang, dans la province de Heilongjiang. Elle a une capacité de production de 60 MW, et la cavité de l'usine principale a 62 m de longueur, 18 m de largeur et 27 m de hauteur.

On a utilisé l'explosif sous l'eau pour faire sauter le bouchon rocheux (8 m × 8 m × 9 m, en forme d'arc) à l'extrémité de la galerie de prise d'eau (6 à 8 m de diamètre, 3 000 m de longueur).

(2) Ce barrage renforcé par précontrainte est celui de Méchan, barrage en béton à voûtes multiples d'une hauteur de 88 m, situé sur le fleuve Shi, dans la province de Anhui. La capacité du réservoir est de  $22,75 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>. Le remplissage a commencé en 1958. Une forte fuite s'est produite brusquement en novembre 1962 dans la fondation en rive droite.

(3) La centrale n° 330 est la centrale de Gezhouba, sur le fleuve Yangzé, dans la province de Hupei.

(4) Le procédé de raccordement sous pression par explosion a d'abord été utilisé en Chine pour raccorder des câbles électriques à haute tension. Au moment de l'explosion, la température maximale instantanée est de 1 000 à 3 000 °C et la pression maximale atteinte est de l'ordre de  $10^3$  à  $10^4$  MPa. La durée d'action est de l'ordre de la microseconde. Sous l'action de l'onde instantanée de direction radiale, produite par la pression due à l'explosion, il se produit une déformation plastique et un écoulement du manchon tubulaire de raccordement, ce qui permet une liaison solide avec les fils d'acier. Ce procédé est utilisé pour raccorder les fils d'acier à haute résistance à la tête d'ancrage. Les avantages en sont une meilleure qualité du raccordement, la rapidité et la simplicité d'exécution, et le prix peu élevé.

(5) La « gomme isolée », produit de la raffinerie de pétrole de Wuxi, dans la province de Jian Shu, est consituée de bitume additionné de 15 % de poudre de talc.

5. Une troupe de l'Armée populaire de libération de Chine, « *Tirants précontraints et leur utilisation dans des travaux* ». Juin 1978.

6. Bureau d'Étude et de prospection hydro-électrique du Nord-Est, « *Principe de l'explosion avec surface lisse et du boulonnage-gunitage et choix des paramètres de conception* ». Mars 1979.

### Références bibliographiques

1. Bureau d'Étude et de Prospection hydro-électrique du Nord-Est, « *Utilisation de la technique d'explosion avec surface lisse et du boulonnage-gunitage dans la centrale n° 310* ». Janvier 1980.

2. Institut de Science hydraulique dépendant du B.E.P.N.E., « *Effet d'ancrage des tirants précontraints* ». Août 1978.

3. Bureau d'Étude et de Prospection hydro-électrique de la province de Anhui, « *Rupture et protection des tirants précontraints* ». Juillet 1976.

4. Société de construction hydro-électrique de la province de Hongnan, « *Bulletin d'essai concernant l'ancrage précontraint de la fondation du barrage de Shuangpai* ». Octobre 1977.