

Utilisation des tirants de précontrainte dans les barrages

Autor(en): **Lafitte, Raymond**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **77 (1985)**

Heft 1-2

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-940894>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

gezielten Untersuchungen zu quantifizieren. So sind die angegebenen Werte der einzelnen Fehler als Beispiel für die Größenordnung zu betrachten, welche bei der praktischen Anwendung für jede Messstelle zu verifizieren sind. Für die einzelnen Messungen muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen einer den Zielsetzungen entsprechenden Genauigkeit und der praktischen Durchführbarkeit im Felde.

Adresse der Verfasser: Dr. Manfred Spreafico, Dr. Bruno Schädler und Beat Sigrist, Landeshydrologie, 3001 Bern.

Literatur

Dickinson, W.T. 1967: Accuracy of discharge determinations. Hydrology Papers No. 20, Fort Collins, Colorado.

ISO/TC 113/WG-1 (Netherlands-17) 178, 1974: Investigation of the total error in measurement of flow by velocity-area methods, Part II, Description of method, International Organization for Standardization.

ISO 748-1979: Liquid flow in open channels. Part 3A, Velocity-area methods

Landeshydrologie, 1982: Handbuch für die Abflussmengenmessung, Mitteilung Nr. 4.

Unbehaven, W., 1970: Die universelle logarithmische Geschwindigkeitsverteilung in natürlichen Gerinnen. Schriftenreihe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, München, Heft 2.

Utilisation des tirants de précontrainte dans les barrages

Raymond Lafitte

1. Considérations générales

On ne peut, nous semble-t-il, traiter de l'utilisation des tirants de précontrainte dans les barrages sans rendre hommage à M. A. Coyne qui, à l'occasion du renforcement du barrage des Cheurfas en 1935, écrivait¹:

«De tout temps, les architectes ont cherché du poids pour lester leurs constructions. Ici, le poids est prélevé dans la fondation et transporté, à l'aide d'un artifice, en tels points du barrage où le besoin s'en fait sentir.»

Depuis cette époque, environ 40 barrages dans le monde, ou leurs ouvrages annexes, ont vu l'application de précontrainte, certains avec des tirants atteignant une force d'utilisation² de 13000 kN (approximativement 1300t). Il s'agit en majeure partie de barrages-poids, mais l'on trouve aussi des barrages à contreforts, des voûtes multiples et des voûtes (mais pour ces dernières, ce sont essentiellement les appuis qui ont été concernés).

A titre d'exemple, nous citerons les ouvrages étudiés par des ingénieurs suisses ces dernières années:

– Le barrage-poids de Lalla Takerkoust, au Maroc (figure 1) de 52 m de hauteur, construit en 1935 et surélevé en 1979 (date d'achèvement des travaux). 54 tirants d'une force d'utilisation comprise entre 5600 et 6800 kN ont été placés dans la partie centrale et 32 tirants de 2200 à 3200 kN dans les piles de l'évacuateur de crues. Le projet a été établi par Electrowatt Ingénieurs-conseils SA.

– Le barrage à voûtes multiples du Ksob, en Algérie (figure 2) de 31 m de hauteur, achevé de construire en 1940. La surélévation de 15 m (le barrage avait été conçu initialement dans une telle perspective) a été achevée en 1976 à l'aide de 228 câbles de précontrainte de 1800 kN de force d'utilisation. Relevons que les tirants ne sont pas ancrés dans le sol, mais dans des contrepoids au pied amont du barrage – Projet J.P. Stucky.

– Le barrage des Zardézas, en Algérie (figure 3), construit entre 1925 et 1936. Il s'agit d'un barrage-poids avec courbure, de 35,50 m de hauteur (hauteur initiale de 44,50 m, réduite de 9 m en cours de construction en raison de difficultés géologiques). La surélévation de 13 m a été achevée en 1973, à l'aide de 111 tirants de 5200 kN de force d'utilisation – Projet Bonnard et Gardel Ingénieurs-conseils SA.

¹ Le Génie civil – 23 août 1930.

² Force théorique d'utilisation de l'ordre de 0,5 à 0,6 fois la force de rupture de l'armature.

Signalons encore que, sur 57 rapports qui concernent les mesures pour renforcer la sécurité des barrages (Question no 59), au prochain Congrès International des Grands Barrages de Lausanne en 1985, 8 traitent des tirants d'ancrage. On peut rappeler brièvement les principales utilisations de la précontrainte pour ce type d'ouvrage:

a) *Renforcement de la stabilité* du barrage proprement dit, celle-ci étant jugée insuffisante, face à des efforts initialement sous-estimés, tels que les sous-pressions, les séismes, la poussée de la vase;

b) *Surélévation* du barrage, afin d'augmenter sa retenue pour satisfaire des besoins en eau accrus ou pour rétablir un volume utile diminué par les apports solides; surélévation aussi pour augmenter la capacité d'évacuation des crues (laminage et augmentation du débit), ou pour protéger l'aval contre les crues;

c) *Renforcement d'ouvrages annexes* tels que radiers de bassin amortisseur de vidange de fond ou d'évacuateur;

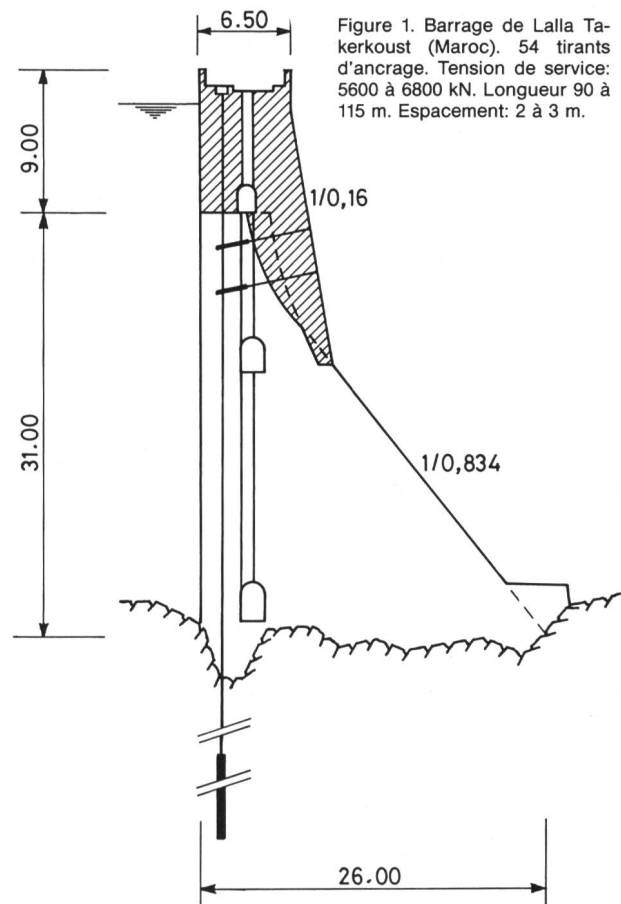
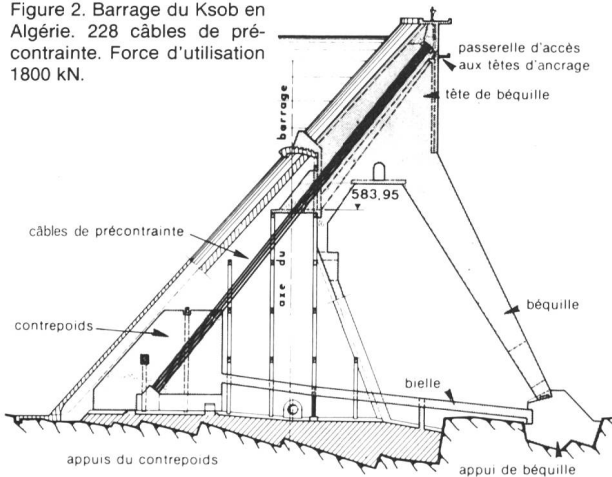


Figure 1. Barrage de Lalla Takerkoust (Maroc). 54 tirants d'ancrage. Tension de service: 5600 à 6800 kN. Longueur 90 à 115 m. Espacement: 2 à 3 m.

Figure 2. Barrage du Ksob en Algérie. 228 câbles de précontrainte. Force d'utilisation 1800 kN.



d) Renforcement de la stabilité des fondations du barrage et principalement de ses rives, ceci en général pour des barrages voûtes.

Cette dernière utilisation ressort de la technique, assez courante, de stabilisation des massifs rocheux; aussi, dans ce qui suit, nous attacherons-nous à développer des considérations sur les deux premiers points et plus particulièrement sur les barrages-poids qui ont été les plus nombreux à être munis de tirants d'ancrage.

Rappelons ici l'avantage important de la précontrainte, qui peut être appliquée sans vider la retenue, tandis que le recours à une solution d'épaississement du profil du barrage impose en général de supprimer la poussée de l'eau pendant la construction, afin que le nouveau béton puisse participer ensuite pleinement à la reprise des efforts.

Disons aussi que la précontrainte est avantageuse face aux sollicitations sismiques, car elle apporte une force stabilisatrice, sans augmentation de la masse de l'ouvrage.

2. Force de précontrainte nécessaire

Les conditions usuelles qui doivent être remplies pour le calcul d'un barrage-poids sont tout d'abord applicables à l'ouvrage précontraint:

1. Pas de traction sur le parement amont
2. Contraintes de traction limitées sur le parement aval
3. Contraintes maximales de compression inférieures aux contraintes admissibles
4. Sécurités au glissement et au cisaillement suffisantes.

En outre, la stabilité d'ensemble du barrage et de sa fondation doit être assurée; nous reviendrons plus loin sur ce problème important.

Le plus souvent, ce sont les conditions 1 et 2 qui déterminent la force de précontrainte et la position des tirants dans le corps du barrage: le plus près possible du parement amont, sans pour autant créer à lac vide des tractions trop grandes sur le parement aval. On s'assure ensuite que la condition 4 est satisfaite. Pour des barrages de relativement faible hauteur (de l'ordre de 50m comme ceux qui ont été surélevés), la condition 3 n'est pas, en général, déterminante.

A titre indicatif, sur la figure 4 est représentée la force de précontrainte nécessaire à la stabilisation d'un barrage-poids que l'on désire surélever.

Il est admis qu'avant la surélévation, la condition de non-traction sur le parement amont est satisfaite. La sous-pression est triangulaire avec, au pied amont, une valeur égale à la charge statique totale³. Par simplification, la ligne d'action de la précontrainte est placée le long du parement

³ Dans ces conditions, le fruit m du barrage initial est égal à 0,845.

amont. Il est clair que cette position, qui conduit à une précontrainte minimale, entraîne, à lac vide, des tractions importantes sur le parement aval et s'étendant sur le tiers de la section. En faisant passer la ligne d'action par le bord amont du noyau, on supprime les tractions mais la force de précontrainte doit alors être doublée.

Deux cas sont considérés sur la figure, selon que l'on admet de modifier ou non le profil triangulaire du barrage par adjonction de béton. La valeur de la précontrainte est rapportée au poids propre de l'ouvrage. En outre, les deux conditions suivantes sont prises en considération pour déterminer la force de précontrainte: non-traction sur le parement amont ou sécurité au glissement suffisante, identique à celle du barrage avant surélévation.

On constate que pour une surélévation assez importante, de 30% par exemple, la précontrainte nécessaire est de l'ordre de 20% du poids propre total pour le barrage dont le profil est engraisé; elle atteint 40 à 50% pour le barrage dont le profil reste inchangé. Ainsi, la stabilité d'un barrage d'une hauteur initiale de 50m surélevée de 15m, nécessite une précontrainte utile de l'ordre de 6500kN, respectivement 10000 à 13000kN par mètre linéaire de couronnement. Etant donné que l'on doit encore espacer les tirants pour des raisons constructives, leur puissance devient très élevée. C'est la première constatation: le plus souvent, les tirants utilisés dans le domaine des barrages sont beaucoup plus puissants⁴ que ceux que l'on trouve couramment sur le marché, dont la capacité maximale est d'environ 2500kN. Une deuxième remarque peut être faite si l'on examine la force de précontrainte nécessaire rapportée à la force totale de sous-pression (figure 5). Avec la surélévation de 30% précédemment envisagée, on note que la précontrainte re-

⁴ On utilise de tels tirants dans le domaine nucléaire pour la construction de caissons de réacteur en béton précontraint (centrale de Schmehausen en Allemagne: câbles de 10MN à la rupture – essais effectués à Stuttgart sur des câbles de 20MN).

Dans les ponts haubanés aussi, on recourt à des câbles atteignant 10 et même 20MN (mais, en général, il ne s'agit pas de tirants ancrés dans le sol).

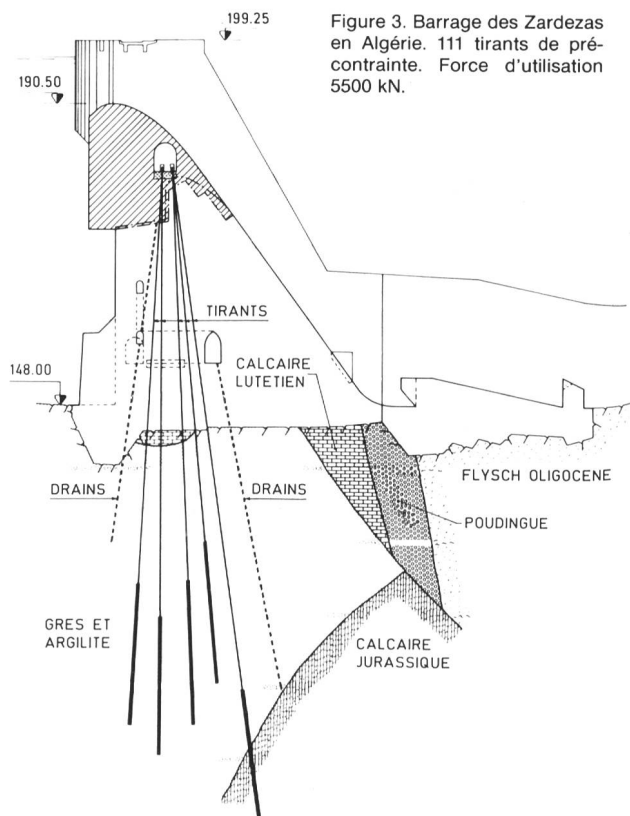


Figure 3. Barrage des Zardezas en Algérie. 111 tirants de précontrainte. Force d'utilisation 5500 kN.

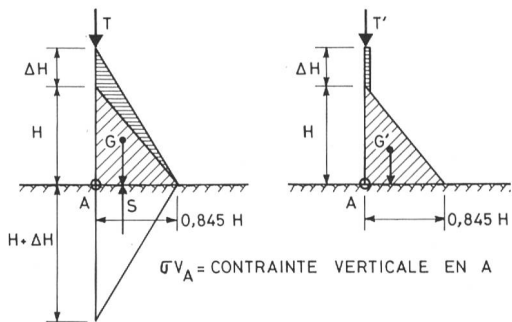
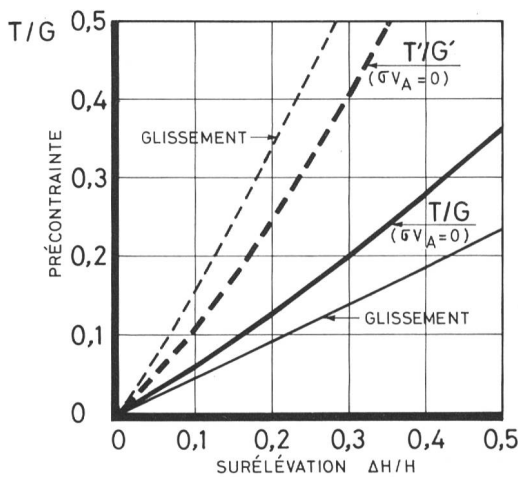


Figure 4. Précontrainte nécessaire à la stabilité d'un barrage-poids sur-élevé (rapportée au poids propre de l'ouvrage).

présente 50% à 100% de la valeur de la sous-pression⁵. Cette dernière joue donc, relativement, un rôle très important, ce qui est bien connu (mais mérite cependant d'être rappelé) et montre le grand intérêt, lors de l'établissement du projet de surélévation ou du renforcement d'un barrage à l'aide de précontrainte, qu'il y a à prévoir, aussi, un puissant renforcement du réseau de drainage. C'est une sécurité supplémentaire gagnée à bon compte, d'autant plus aisée à réaliser que l'on dispose déjà de foreuses sur le chantier.

3. Longueur et profondeur du scellement

La détermination de la *longueur de scellement*, en rocher ou en terrain meuble, permettant d'avoir une sécurité donnée, peut être approchée par le calcul, mais ce sont les essais in situ qui doivent apporter la preuve de la tenue du scellement. On demande que sa résistance soit supérieure à celle du tirant proprement dit. On peut aussi, dans certains cas, fixer la condition supplémentaire suivante: la sécurité à la rupture du scellement, rapportée à la force d'utilisation du tirant, doit être suffisamment élevée pour qu'en service normal la sollicitation de la zone de scellement soit en deçà du domaine où le fluage prendrait de l'importance.

La *profondeur* à laquelle le scellement doit être placé est une question essentielle et délicate. Alors que la longueur du scellement dont dépend sa résistance est un problème local⁶, sa profondeur dans le sol concerne la stabilité d'ensemble au glissement ou au renversement de l'ouvrage. Pour une profondeur donnée, on recherche le mode de rupture possible de l'ouvrage et de sa fondation et on s'assure, par le calcul, que la stabilité du système est satisfaisante. Si tel n'est pas le cas, le scellement doit être placé plus profondément.

⁵ Rappelons qu'il a été admis ici une forte sous-pression: triangulaire avec, à l'amont, la valeur de la charge statique complète.

⁶ La profondeur a aussi une certaine influence, limitée, sur la tenue du scellement.

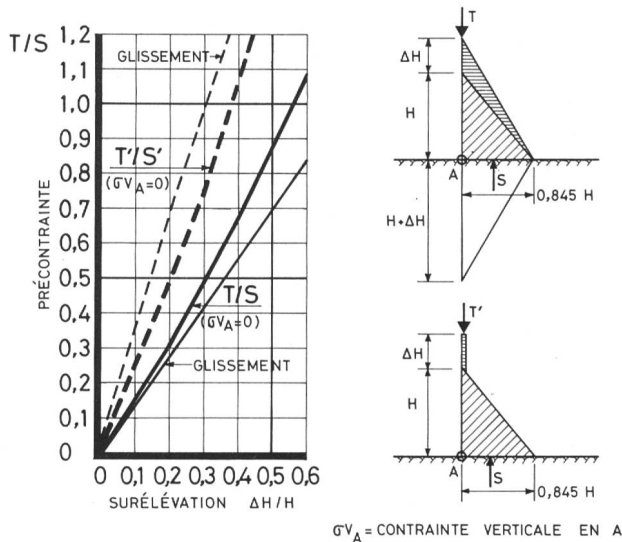
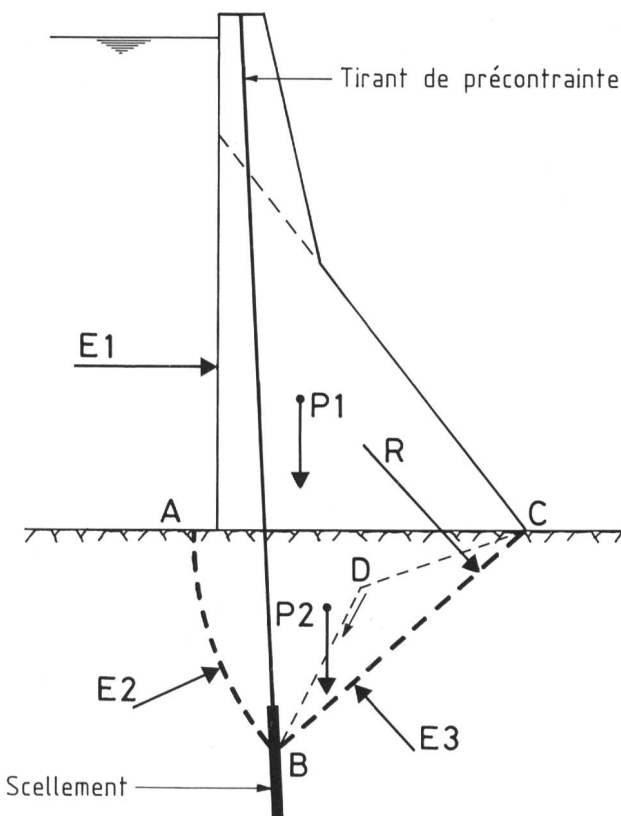


Figure 5. Précontrainte nécessaire à la stabilité d'un barrage-poids sur-élevé (rapportée à la sous-pression).

La difficulté réside dans la détermination du schéma de ruine⁷ qui, bien entendu, dépend fortement des qualités et de la structure du sol. De plus, sa fissuration, dans la zone au contact avec la retenue, favorise la manifestation de sous-pressions avec lesquelles il faut compter.

Des analyses par éléments finis et des essais sur modèle ont montré que l'on pouvait faire l'hypothèse d'un mode de rupture tel qu'il est représenté sur la figure 6: renversement du barrage et du massif de fondation délimité par la ligne ABC, B étant le point d'ancrage réel du tirant. Les sous-pressions E₂ et E₃ tendent à déstabiliser l'ouvrage. (On peut aussi imaginer la ligne de rupture ABDC qui serait plus défavo-

Figure 6. Barrage surélevé à l'aide de précontrainte, stabilité d'ensemble. Sol homogène et isotrope.



⁷ A cet égard, la condition que le tirant doive mobiliser un volume de rocher, approximativement conique, dont le poids soit au moins supérieur à la force de rupture de l'acier, apparaît comme quelque peu simpliste.

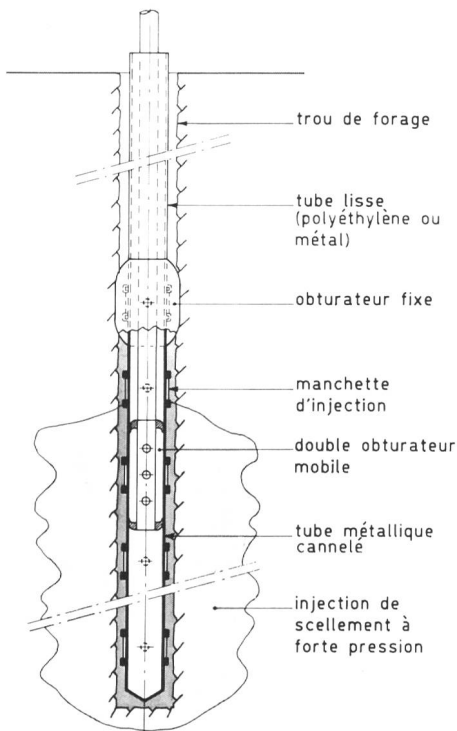


Figure 7, à gauche. Exemple de tirant d'ancrage (double protection contre la corrosion).

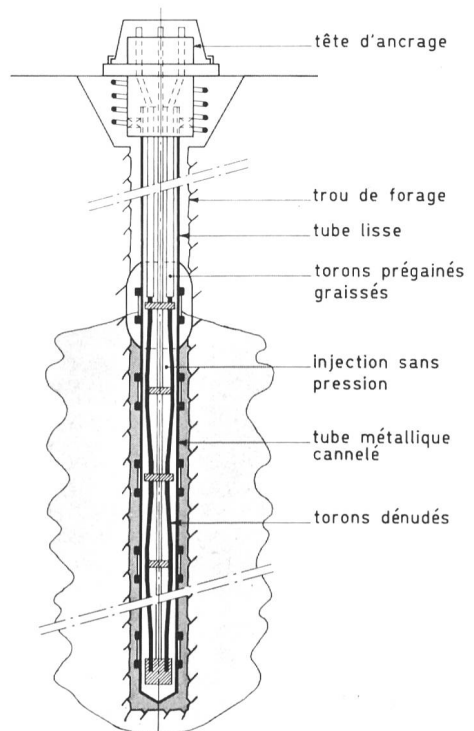
Phases d'exécution

1. Forage
2. Mise en place du tube et scellement primaire
3. Injection de l'obturateur
4. Injection sous pression de la zone d'ancrage

Figure 8, à droite. Exemple de tirant d'ancrage (double protection contre la corrosion).

Phases d'exécution

5. Mise en place du tirant
6. Remplissage au coulis de ciment de la zone de scellement et de la longueur libre
7. Pose de la tête d'ancrage et mise en tension



nable.) Evidemment, il s'agit là d'un schéma possible pour un sol isotrope et homogène. Dans le cas d'une fondation rocheuse fissurée, c'est le système des fractures qui devient déterminant et impose le mode de rupture, lequel doit être recherché.

4. Bref rappel sur la technique du tirant d'ancrage

La figure 7 montre, à titre d'exemple, un tirant assez perfectionné, qui comporte une double protection contre la corrosion. Après perforation du sol, on introduit un tube dans le forage, sur toute sa hauteur. Ce tube est lisse, en polyéthylène ou en métal, sur la longueur libre du tirant; il est en métal et cannelé, avec des manchettes d'injection dans la zone de scellement. Un obturateur est situé dans l'espace annulaire entre le tube et le rocher, à la partie supérieure de la zone de scellement. L'injection sous forte pression du terrain dans cette zone peut donc être effectuée en plusieurs phases en utilisant un obturateur double.

Dans une deuxième étape, représentée sur la figure 8, on met en place le tirant proprement dit dans le tube préalablement scellé au terrain. Les torons sont prégainés et graissés sur la longueur libre. On peut donc remplir le tube dans la zone de scellement (et en même temps dans la longueur libre) avec du coulis de ciment, de telle sorte que l'ancrage soit réalisé.

Ce dispositif type présente de nombreuses variantes. Par exemple, les torons peuvent être dénudés dans la longueur libre; l'opération de remplissage doit alors être différée au-delà de la mise en tension. Un obturateur à l'intérieur du tube ferme le bas de la longueur libre et permet l'injection séparée de la zone de scellement. Le remplissage du tube dans la longueur libre peut se faire, après la mise en tension, au moyen d'un produit visqueux de protection anticorrosion (la tension des tirants est alors contrôlable) ou de coulis de ciment.

Dans la zone de scellement, les variantes dépendent de la nature et du comportement du terrain encaissant. Dans le cas d'un rocher de bonne qualité, le tube métallique peut être soit remplacé par un tube en polyéthylène cannelé, soit supprimé. Dans les deux cas, il convient d'effectuer des essais d'eau dans le forage, de manière à s'assurer que la perméabilité est très faible (inférieure à 1 Lugeon), ou de traiter le rocher par injections pour respecter cette condition. Le scellement du câble se fait alors par remplissage (injections sans pression) dans un espace étanche confiné.

5. Mise en œuvre et contrôle des tirants

Une assez bonne *précision* doit être requise pour la *rectitude et la position des forages*, afin que les tirants exercent leur force à l'emplacement prévu et que les pertes par frottement soient minimales.

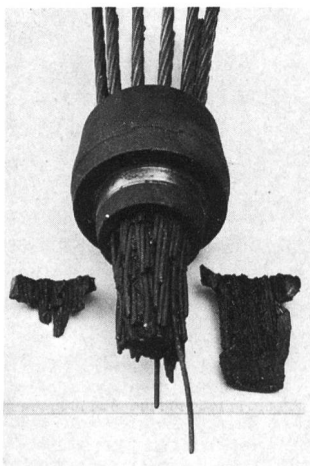


Figure 9, à gauche. Tirant de 1800 kN de force utile rompu par corrosion fissurante (avec morceaux du tampon de brai époxy).

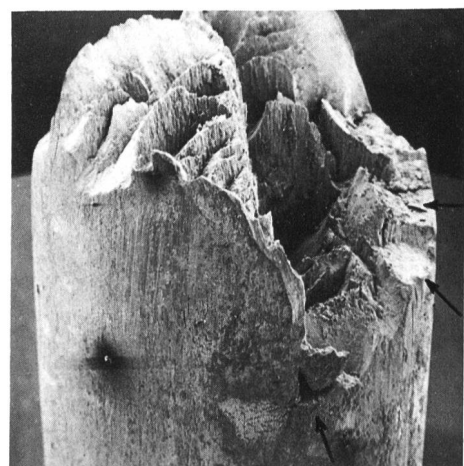


Figure 10, à droite. Surface de rupture sans striction d'un fil de précontrainte (agrandissement 12 fois).

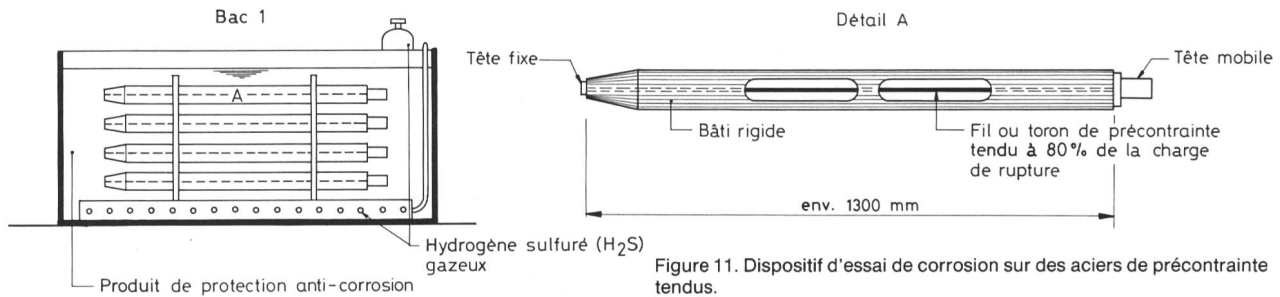


Figure 11. Dispositif d'essai de corrosion sur des aciers de précontrainte tendus.

La tolérance, que l'on peut exiger sans renchérir par trop le coût des forages, exprimée en pour cent de la longueur de forage, est de 1% en moyenne et de 2% au maximum dans les cas isolés.

Il est aussi indispensable de mesurer la position réelle des forages et en particulier de la zone de scellement, afin que l'on puisse, le cas échéant, poser ultérieurement de nouveaux tirants sans risquer de recouper ceux déjà en place. Notons que les forages pour les tirants, nombreux dans le sol de fondation du barrage, permettent d'avoir une très bonne connaissance de la géologie. Il est aisé aussi de renforcer le sol au moyen d'injections, si cela apparaît nécessaire.

La *mise en tension* des tirants doit être faite avec le plus grand soin car, par la sollicitation sévère qu'elle impose au tirant, elle fournit des informations essentielles sur sa sécurité. A cet égard, les prescriptions de la norme SIA 191 constituent une bonne base. Il apparaît judicieux de préconiser en général, pour ces tirants très puissants, une épreuve poussée de mise en tension.

La *protection contre la corrosion* constitue une préoccupation majeure. A titre d'exemple, on voit sur la figure 9 l'élément d'un tirant de 5500kN de force utile rompu à proximité de la tête d'ancrage. La rupture est survenue par corrosion fissurante sous tension (fragilisation à l'hydrogène). Cette corrosion est due à une protection défectueuse dans la partie supérieure du tirant et à la présence d'hydrogène sulfuré. Relevons qu'il n'est pas rare de trouver un tel gaz dans les dépôts vaseux des retenues. La figure 10 montre un fil du même tirant ayant subi une rupture fragile (sans striction).

Ce sont les points singuliers du tirant qui apparaissent comme les plus sensibles au risque de corrosion: tête d'ancrage, liaison entre longueur libre et scellement et enfin zone de scellement elle-même. Ces points doivent être particulièrement étudiés et leur protection réalisée avec le plus grand soin. L'étanchéité des gaines entourant le tirant et les câbles et celle du sol dans la zone de scellement, afin d'éviter toute circulation d'eau au contact de l'acier de précontrainte, apparaît comme une prescription essentielle. Des essais sur un tirant *vertical* doivent permettre de s'assurer que le mode d'injection est satisfaisant; en outre, les résultats d'essais sur les produits anticorrosion (et sur leur compatibilité entre eux s'il y en a plusieurs) doivent être analysés avec attention et entrepris s'ils n'existent pas. (A titre indicatif, la figure 11 montre un dispositif d'essai.)

On dispose maintenant de 15 ans environ d'expérience sur les graisses de protection et de plus de 50 ans sur les coulis de ciment. Ceux-ci présentent donc une fiabilité plus grande, mais ils ont l'inconvénient de sceller entièrement le tirant qui ne peut plus être retendu ou dont la tension ne peut être contrôlée.

Disons enfin un mot du *contrôle des tirants* en état de service. Il existe différents types de dynamomètres ou vérins qui, placés en tête du tirant, permettent de mesurer sa tension en permanence. De bonnes expériences ont été faites

avec ces appareils qui sont fiables et précis. (Encore faut-il que les pertes par frottement le long du tirant et en particulier à sa tête ne rendent pas les mesures incertaines.)

Il est nécessaire que la longueur libre des tirants sous contrôle soit injectée avec une résine souple et nous avons vu précédemment que la pérennité d'un tel produit était moins bien assurée que celle d'un coulis de ciment. Il semble donc que l'on ne devrait prévoir qu'un nombre limité de tirants non injectés au coulis de ciment dont la tension soit contrôlable (un appareil de mesure fiable de la tension d'un tirant injecté au coulis de ciment reste à inventer...).

Précisons aussi que l'inspection visuelle des tirants et les moyens d'auscultation habituels du barrage, concernant en particulier sa déformation (pendules, mesures géodésiques), revêtent une grande importance. Le comportement de l'ouvrage lors de la mise en précontrainte doit aussi être mesuré et examiné avec attention.

Conclusion

La technique de la précontrainte appliquée aux barrages a fait ses preuves; elle a donné lieu à des développements assez importants dans les années 1950 à 1970. Depuis 10 ans, elle ne nous paraît pas avoir beaucoup progressé.

La norme SIA 191 sur les tirants d'ancrage, parue en 1977, ne s'applique pas sans autre à la précontrainte des barrages, mais elle constitue, pour le moins, un très bon recensement des problèmes techniques qui se posent et qui doivent être résolus de cas en cas.

L'analyse économique intervient bien entendu dans le choix du dispositif de précontrainte et de son intensité, par comparaison avec une stabilisation du barrage qui recourrait à un épaississement de son profil.

Dans la conception et la mise en œuvre de cette technique délicate, la collaboration entre projeteurs et entrepreneurs, inspirée par la recherche de la plus grande sécurité, est essentielle.

Conférence lors des journées d'études «Transformation et assainissement des barrages» des 20 et 21 septembre 1984 à Engelberg. Ce symposium a été organisé par le groupe de travail pour l'observation des barrages au sein du Comité national suisse des grands barrages.

Adresse de l'auteur: *Raymond Lafitte*, Professeur, Bonnard et Gardel, Ingénieurs-conseils SA, Avenue de Cour 61, CH-1007 Lausanne.