

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

LES ANGRAGES, NOTAMMENT EN TERRAINS MEUBLES ANCHORAGES, ESPECIALLY IN SOFT GROUND

P. Habib
Ecole Polytechnique
17 rue Descartes
Paris 15ème, 75, France.

La Session Spéciale No. 15 s'est tenue le mercredi 27 Aout sous la présidence de J. C. OTT (Suisse) qui remplaçait DA COSTA NUNES, (Brezil), celui-ci n'ayant pu venir à Mexique.

Dix huit communications ont été présentées ainsi que des interventions orales. Près de deux cent cinquante congressistes étaient inscrits à cette Session et ont participé à la reunion qui a commencé par l'exposé d'un Rapport général présenté par P. HABIB (France).

RAPPORT:

La technique des ancrages en terrains meubles a fait des progrès spectaculaires au cours des 10 dernières années. Telle entreprise qui réalisait en 1961 des ancrages provisoires de 25 t dans des sables et graviers propose actuellement des tirants définitifs de 200 t dans les mêmes terrains. Cette amélioration n'est pas due à l'avancement de nos connaissances théoriques mais bien à l'audace raisonnée et progressive des constructeurs. Tout le monde est d'accord sur ce sujet: la théorie des tirants est encore à faire et il est frappant de constater que nous restons dans le domaine de l'empirisme pour ce problème.

C'est dire combien le reprochement tenté dans la Séance Spéciale No. 15 des études, réalisations et essais faits dans différents pays est particulièrement utile. Les dix-huit communications dont on trouvera la liste en annexe abordant des aspects très différents et elles sont suffisamment nombreuses pour qu'un classement puisse être fait et pour que les principales difficultés soient examinées d'une façon détaillée. L'ensemble de ces textes sera réuni sous forme d'une publication complète dont la parution est prévue au tout début 1970.

Le présent rapport donne l'état actuel de nos connaissances, moins en fonction des conceptions personnelles du rapporteur, que d'après ce qu'il a appris à la lecture des différentes communications, et il est ordonné de façon à répondre aux questions posées par les participants du 7ème Congrès International. Ces questions peuvent d'ailleurs être presque résumées en une seule, celle de la permanence de l'effort d'ancrage, en y voyant deux nuances, la permanence du scellement (c'est-à-dire le fluage du sol) et la pérennité du tirant (c'est-à-dire la corrosion). Il est indispensable pour traiter correctement ces problèmes d'aborder la technologie et l'on doit remercier les auteurs d'avoir écrit sans restriction leurs méthodes de travail.

On examinera donc successivement les techniques de mise en place, la charge limite des ancrages, les problèmes de protection en tentant, chemin faisant, une synthèse du mécanisme de résistance des tirants.

1) MISE EN PLACE DES TIRANTS

Dans la plupart des communications les auteurs ont indiqué avec précision la succession des opérations de mise en place d'un tirant. On ne s'attachera pas ici sur les procédés de forage, encore que dans certains cas (MÜLLER, WIDING -15-) l'association de l'outil de forage et du tubage soit directement liée à la mise en place l'ancrage. Le trou étant fait on peut distinguer deux catégories de tirants:

- ceux où les barres sont simplement placées dans un forage rempli de coulis (DA COSTA NUNES, CHIOSSI, MAGGI -2-) (ROBINSON -3-) (MAESTRE -4-), éventuellement avec des écarteurs et des brides si ce sont des câbles (BRILLANT, JORGE -6-) (JORGE -10-) ou des renforcements par hélices (ROBINSON -3-) ou par élargissements (HILTON -13-).

- ceux où un tube perdu reste dans le sol (MAESTRE -5-). A la limite (DUPEUBLE, BRULOIS -8-) séparément complètement le scellement au sol (assuré par un tubage très étudié et une succession stricte d'injections) et l'ancrage du câble dans le tube.

Les ancrages à tube perdu sont sans doute plus chers; il est certain par contre qu'on est beaucoup plus libre d'y organiser mise en place et protection du câble.

Quel que soit le type de tirant un serrage du sol par mise en pression améliore l'ancrage encore que (ROBINSON -3-) oite des essais non publiés de Manitoba Hydro qui n'auraient pas montré cette amélioration. Il serait sans doute utile de préciser la nature du sol, l'effet étant a priori plus important dans les sols à fort frottement interne et moindre dans les argiles. Les différents auteurs sont d'accord sur l'intérêt de l'injection. Ainsi (MORI, ADACHI -4-) qui réalisent l'ancrage selon le procédé Ménard, en gonflant une membrane dans un trou rempli de coulis, constatent que la mise en pression double la résistance de l'ancrage. Ces auteurs n'ont malheureusement pas indiqué la pression de gonflage. Les renseignements les plus précis sont fournis par (JORGE -10-) qui donne la charge limite en fonction de pressions d'injection variant de 5 à 30 bar pour des tirants dans des marnes, dans la

craie et dans des alluvions. La mise en pression se fait progressivement suivant des séquences bien établies, l'injection de serrage pour le scellement du pied de tirant est généralement faite en dernier, à l'abri d'un bouchon. (JORGE -10-) propose un dispositif permettant d'injecter en plusieurs passes et même ultérieurement de ré-injecter le tirant.

2) RESISTANCE A LA RUPTURE DES ANCRAGES

a) Théorie de la charge limite des ancrages.

Bien entendu lorsque le câble casse avant le scellement au sol, cas aisément calculable et heureusement fréquent, l'intérêt est faible au point de vue de la Mécanique des Sols.

Pour calculer la rupture de scellement dans le sol tous les auteurs utilisent la surface latérale de l'ancrage comme surface de glissement cinématiquement admissible (sauf (OTTA -18-) qui observe sur modèles réduits, puis calcule des ancrages par plaques enterrées, ce qui est un peu à la limite de notre sujet). Rappelons qu'un tel mode de calcul donne, par principe, une valeur supérieure ou égale à la charge de rupture réelle. La charge limite a alors pour valeur le produit de l'aire de glissement par la résistance au cisaillement, c'est-à-dire la cohésion pour les argiles purement cohérentes et, avec les notations évidentes, $K \cdot z \cdot \tan \varphi$ pour les sol pulvérulents ($1/2 < K < 1$).

Pour des matériaux à frottement interne élevé (MOLLER, WIDING -15-) indiquent que l'expérience donne des résistances plus élevées correspondant à un coefficient multiplicateur compris entre 4 et 9 (valeur moyenne 6).

La théorie n'est donc absolument pas adaptée à la réalité.

b) Modèles réduits.

Trois communications étudient les ancrages sur modèles réduits: (OTTA -18-) déjà cité (NUYENS, VERDEYEN, ROISIN -1-) et (HABIB, LUONG, ZELIKSON -9-). Les deux derniers groupes d'auteurs ont senti la nécessité d'une similitude élastoplastique; les premiers ont introduit une compressibilité dans des modèles à rouleaux à deux dimensions et ont étudié dans leur communication l'interaction tirants-structure. Ils ont mis en évidence une cinématique extrêmement complexe de l'ensemble Mur-Massif-Tirant. C'est pratiquement le seul travail où les relations entre tirant et paroi sont abordées.

Les auteurs de la communication 9 ont utilisé un écoulement laminaire vertical, de haut en bas, dans un massif homogène de sable pour simuler le poids des terres par les pertes de charge hydraulique et ont étudié l'interaction sol-tirant. Ils ont montré qu'en cas de scellement irrégulier il faut ajouter à la force de frottement latéral théorique une force de type $S \cdot D \cdot N$ où S est la somme des maîtres-couple des irrégularités et N un coefficient fonction de φ donnant un terme de résistance voisin de la résistance en pointe d'un pieu au même niveau. La résistance de l'ancrage est donc profondément liée aux irrégularités, c'est à dire au mode d'exécution et c'est finalement l'essai in-situ qui peut seul, donner la résistance réelle des tirants. Ceci est tellement vrai que le nombre d'essais de rupture qui ont été réalisés pour les ancrages paraît

relativement plus important que pour n'importe quel autre type de fondation.

c) Essais d'arrachage.

On ne disposait jusqu'à présent que d'un nombre tout à fait limité de descriptions d'arrachage de tirants, notamment dans les argiles. L'apport technologique du Congrès de Mexico sera donc extrêmement profitable car pratiquement tous les constructeurs ont donné des courbes efforts déformations d'essais d'arrachage. La description la plus complète est celle de (MORI, ADACHI -14-) qui ont mesuré le déplacement en tête en fonction de l'effort de traction, le fluage du sol, les déformations de surface autour du tirant, la répartition des forces dans l'axe du tirant et ceci pour 4 essais dans des sols sableux ou argileux. Il serait trop long d'analyser en détails et de comparer tous les essais. On peut dire cependant:

- que les déplacements au niveau de scellement sont faibles avant la rupture, généralement millimétriques, quelquefois de 1 à 2cm, exceptionnellement de 10cm. Ces déplacements si petits posent des problèmes de mesures, en particulier lorsqu'on utilise des aciers de précontrainte: la tête de l'ancrage peut alors se déplacer élastiquement de 10 ou 15cm. Des frottements de la partie libre du câble peuvent être gênants pour l'interprétation.

- que les pertes de tension par fluage du sol ou de l'acier sont faibles lorsque la charge est inférieure à 80% de la charge de rupture. Ainsi (DACA COSTA NUNES -2-) présente des essais de longue durée de tirants dans l'argile. Après trois mois, pour un chargement à peu près égal à la moitié de la charge de rupture, 3 tirants (sur 4) n'avaient pas montré la moindre perte de tension. Contrairement à ce qu'on pouvait craindre a priori le fluage du sol n'apparaît pas comme un danger très sérieux passé les premières heures de chargement.

d) Coefficients de sécurité.

Ayant essayé un tirant, comment choisir la charge de service? Si le tirant n'a pas cassé un projecteur de norme allemande conseille, dans certaines conditions, un coefficient de sécurité de 1,5 sur la plus grande charge atteinte. Cette règle est bonne si le tirant d'essai était chargé au voisinage de sa résistance; sinon on peut avoir une sécurité supérieure à 3,5 par rapport à la rupture (CRIVELLI -16-); il faut donc s'efforcer de rompre les tirants d'essai. Dans ces conditions (MAESTRE -4-) propose comme coefficient de sécurité 1,5 pour les tirants provisoires et 2 pour les tirants définitifs, par rapport à la résistance de rupture. (MAESTRE -5-) disposant d'un essai sans rupture, mais excellent, c'est-à-dire parfaitement élastique, propose 1,5 par rapport à la plus forte charge atteinte, pour un tirant définitif. (JORGE -10-) propose 1.5 pour un tirant définitif par rapport à la charge à partir de laquelle le fluage commence à apparaître. Ce critère de rupture est obtenu par des considérations expérimentales classiques sur les courbes (déformation, temps) en fonction de la charge.

Les coefficients de sécurité proposés apparaissent ainsi assez faibles. Cela provient certainement du fait que les tirants sont dans la grande majorité précontraints, c'est-à-dire en somme essayés

individuellement. Sinon il faudrait être plus prudent. Citons (ROBINSON -3-) qui mettant en place des tirants par vissage obtient une information sur le sol par la mesure du couple, qu'il relie ensuite statistiquement à la force d'ancrage.

Il importe de distinguer le coefficient de sécurité par rapport à la rupture du tirant, du coefficient de sécurité par rapport à la force calculée dont on a besoin pour rendre stable une structure; dans ce dernier cas pour l'équilibre d'un mur de soutènement (CRIVELLI -16-) propose un coefficient de sécurité de 1,5 par rapport à la force équilibrant le coin de Coulomb; mais le tirant, lui, doit être mis en place à la tension d'équilibre ou même un peu en-dessous, sauf si on est très exigeant pour les déformations tolérables, par exemple lors d'une reprise en sous-œuvre.

Dans une technique en pleine évolution, il faut, je crois, éviter de fixer des normes rigides susceptibles de condamner des méthodes pleines de promesses et notamment pour les questions de corrosion que nous allons étudier maintenant.

3) PROTECTION DES TIRANTS

La règle est simple: un tirant provisoire n'a besoin que d'une protection sommaire; un tirant définitif doit être protégé parfaitement. Malheureusement les limites entre provisoire, définitif, sommaire et parfait ne sont pas du tout nettes. Le tirant définitif commence certainement au-delà de 2 ans. Si l'on tient compte de la vitesse des phénomènes de corrosion sous tension un tirant peut être provisoire pendant 6 mois. Entre ces deux limites règne l'incertitude.

La protection des tirants enterrés est un souci majeur de tous les constructeurs. Le danger de corrosion est en effet fondamental. Rappelons que la corrosion sous tension se distingue de la corrosion ordinaire par sa rapidité, par son caractère localisé et par la dissolution d'une très faible quantité de métal. L'acier dans le sol se trouve à un certain potentiel électrique; et on est en présence de deux dangers, selon que l'électrolyse fait apparaître sur le métal l'ion H (corrosion fissurante) ou l'ion O (corrosion sous tension). La maintenance d'un équilibre électrique est difficile; en tous cas la protection cathodique classique n'a jamais été employée et il semble que, sous tension, elle doive être pratiquée avec une très grande prudence. Par bonheur le ciment assure une protection chimique et mécanique des aciers dans le sol contre la corrosion, mais on craint sa fissuration. En somme la protection d'un ancrage doit répondre aux exigences apparemment contradictoires suivantes:

- a) protéger chimiquement l'acier ou l'isoler électriquement
- b) être suffisamment déformable pour suivre les déformations du sol et de l'acier sans se fissurer
- c) être suffisamment résistante pour transmettre au sol les efforts mécaniques considérables appliqués aux tirants.

Il est évident que le tube perdu, dans la mesure où il travaille en compression (c'est-à-dire où il

ne risque que la corrosion ordinaire ou les courants vagabonds), permet de protéger très sérieusement les câbles; l'expérience semble montrer cependant que les autres types de tirants correctement réalisés ne sont pas sujets non plus à la corrosion.

Mais cette question en peut être résolue par l'empirisme seul. Les solutions excellentes (bitume, graisse, gaine plastique, enrobage de chaque câble élémentaire et, bien entendu, les injections de coulis de ciment) suggérées et employées par différents auteurs, dont (CARON, JORGE -7-), représentent une technologie extrêmement précieuse et valable, comme le montre l'exemple des tirants du barrage de Cheurfas qui n'ont subi que 9% de perte de tension due à la corrosion en 30 ans (KHAOUA, MONT-EL, CIVARD, LAUGA -12-). Mais il restera toujours une certaine inquiétude de moins tant qu'un recul suffisant n'aura pas été atteint.

Le contrôle de la qualité des tirants par reprise en tension périodique par vérin n'est praticable que pour des ouvrages exceptionnels. Ce problème doit être abordé par une autre voie. (CRIVELLI -16-) propose la règle suivante, à associer au choix du coefficient de sécurité: il faut s'assurer que la rupture d'un tirant n'entraîne pas la rupture de l'ensemble de la structure. Mais la meilleure solution reste encore le contrôle statistique de la tension résiduelle. Le dispositif d'alerte utilisant une cale dynamométrique insérée sous la tête d'ancrage, proposé par (DUPEUBLE, BRULOIS -8-) semble actuellement la méthode la plus économique pour y parvenir.

Nous venons de voir qu'il est difficile de s'assurer de la pérennité des ancrages. Paradoxalement il n'est pas commode non plus de supprimer et d'enlever du sol les ancrages provisoires devenus gênants. (JORGE -11-) passe en revue les différentes méthodes (entailles, acides, explosifs, etc...) et propose la destruction thermique par oxycoupage.

CONCLUSION

L'analyse succincte des différents problèmes posés par les ancrages en terrain meuble montre à la fois les difficultés rencontrées par les constructeurs et la qualité des solutions proposées. Cette technique s'est révélée en quelques années un procédé sûr et efficace; elle est venue à son heure pour simplifier l'exécution des fouilles protégées par des parois continues.

Les constructeurs de tirants envisagent dès maintenant des ancrages unitaires dépassant 200 t. Certes, de telles sollicitations ponctuelles restent encore exceptionnelles; d'ailleurs la répartition de telles forces conduit souvent à des structures suffisamment coûteuses pour que l'intérêt économique de telles solutions ne soit pas bien grand. C'est heureux dans la mesure où l'on peut penser que les charges par tirant atteignent actuellement une limite, et qu'elles vont sans doute plafonner. Capable de plus haute performance encore le tirant d'ancrage doit devenir dans les prochaines années d'un emploi aussi banal pour les problèmes courants que les autres procédés de fondations.

LISTE DES COMMUNICATIONS

- 1.- J. VERDEYEN, V. ROISIN, J. NUYENS
(Belgique)
Quelques aspects du comportement des murs
écrans à grande inertie en présence d'un ma-
ssif compressible.
- 2.- A. COSTA NUNES, N. J. CHIOSSI, J. C. MAGGI
(Brésil)
Anchorage Tests in Clays -for the Construc-
tion of Sao Paulo subway -(Brasil).
- 3.- K. E. ROBINSON
(Canada)
Grouted Rod and Multi-helix Anchors.
- 4.- M. MAESTRE
(Espagne)
Immeuble Medinaceli -Madrid.
- 5.- M. MAESTRE
(Espagne)
Ancrages d'essai pour ancrage du radier
d'une cale sèche à Carthagène (Espagne).
- 6.- J. BRILLANT, G. R. JORGE
(France)
Essai de deux tirants de 250 tonnes ancrés
dans les sables et graviers.
- 7.- C. CARON, G. R. JORGE
(France)
Protection des cables et tirants.
- 8.- P. DUPEUBLE, J. DRULOIS
(France)
Mesures et observations concernant le com-
portement de tirants d'ancrage en terrain
meuble.
- 9.- P. HABIB, M. P. LUONG, A. ZELIKSON
(France)
Etude de la résistance des ancrages dans
les sols pulvérulents par des modèles rédu-
its tenant compte du poids des terres.
- 10.- G. R. JORGE
(France)
Le tirant IRP réinjectable spécial pour ter-
rains meubles, karstiques ou à faibles ca-
ractéristiques géotechniques.
- 11.- G. R. JORGE
(France)
Dispositifs de destruction dans le sol des
tirants provisoires à barres, fils ou to-

cons.

- 12.- M. KHAOUA, B. MONTEL, A. CIVARD, R. LAUGA
(France)
Les tirants du barrage des Cheurfas: 30
ans de contrôle et renforcement récent.
- 13.- A. R. HILTON
(Grande-Bretagne)
The Construction of High Strength Under-rea-
med Anchorages in Soft Ground.
- 14.- H. MORI, K. ADACHI
(Japon)
Anchorage by an Inflated Cylinder in Soft
Ground.
- 15.- P. MÖLLER S. WIDING
(Suède)
Anchoring in Soil, Employing the Alvik Lin-
dö and J. B. Drilling Methods.
- 16.- G. CRIVELLI
(Suisse)
Application de la méthode de la reprise en
sous oeuvre à la construction de murs de
soutènement ancrés en terrain meuble.
- 17.- J. DESCOUDRES
(Suisse)
Ancrages permanents réalisés en rocher et
en terrains meubles.
- 18.- L. OTTA
(Suisse)
Contribution to the Behavior of Horizontal
Anchor Plate under Vertical Pull-out Load
in Cohesionless Soils.

Après l'exposé du rapport général de nombreux ora-
teurs ont pris la parole,

MM. NUYENS (Belgique)
MORI (Japon)
CAMBERFORT (France)
ROBINSON (Canada)
DUPEUBLE (France)
HILTON (Grande Bretagne),

ont résumé les principaux aspects de leurs travaux.

MM. BALDOVIN (Italie)
WACKERNAGEL (Suisse)
LEGRAND (France)
WHITE (U.S.A.)
SANDSTRÖM (Suède)

ont intervenus dans une discussion très animée.

L'ensemble de ces communications sera publié par
le Comité Français de Mécanique des Soils and tout
debut de l'année 1970.