

Tirants d'ancrage

Recommandations concernant la conception,
le calcul, l'exécution et le contrôle

RECOMMANDATIONS T.A. 95

Comité Français de la Mécanique des Sols
et des Travaux de Fondations



E Eyrolles



CFMS
Association régie par la loi
du 1.07.1901

INVENTAIRE
no A 383

TIRANTS d'ANCRAGE

Recommandations
concernant la conception, le calcul,
l'exécution et le contrôle
RECOMMANDATIONS T.A. 95

TIRANTS d'ANCRAGE

Recommandations
concernant la conception, le calcul,
l'exécution et le contrôle
RECOMMANDATIONS T.A. 95

Comité Français de la Mécanique des Sols
et des Travaux de Fondations


EYROLLES

AVANT-PROPOS

Après les éditions T.A. 1972, T.A. 1977, T.A. 1986 et l'édition anglaise parue chez Balkema en 1989, cette quatrième refonte des recommandations concernant le calcul, l'exécution et le contrôle des tirants d'ancrage (T.A. 95) est apparue nécessaire pour plusieurs raisons. Il y a eu d'abord la parution de la Norme NF-P-94.153 sur « L'essai statique de tirant d'ancrage » parue en décembre 1993, dont la mise au point a été faite conjointement par l'AFNOR et le groupe qui a élaboré les recommandations T.A. : le mode opératoire des essais statiques étant défini en France par un texte légal, susceptible d'une autre évolution que celle des T.A., il devenait indispensable de s'y référer, d'éliminer de nos recommandations la description de la réalisation des essais en renvoyant le lecteur au document officiel, tout en indiquant ici comment interpréter ces essais puisque cela ne figure pas dans la norme.

Il y a eu aussi tous les travaux faits en France dans le cadre du Comité Européen de Normalisation (CEN) et en particulier ceux de l'Eurocode 7, dont le chapitre 8 traite des tirants d'ancrage, d'une façon d'ailleurs moins complète que la présente édition T.A. 95 ; mais les Eurocodes imposaient au moins quelques changements de notations si l'on voulait continuer à s'entendre entre Européens.

Enfin, et ce n'est pas la moindre raison, il y a eu les progrès de la technologie avec l'apparition de nouveaux matériaux et il y a eu aussi neuf années supplémentaires d'observations permettant une appréciation meilleure et plus fine des limites empiriques recommandées pour la conception des tirants.

On peut dire actuellement que la technique des ancrages est très sûre et elle n'a pas une pathologie excessive. On peut penser que nos « recommandations » y sont pour quelque chose. D'une façon générale, les différentes éditions de T.A. ont été bien accueillies par le public des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre, des ingénieurs et des bureaux d'études des entreprises. Nos recommandations ont d'ailleurs été sinon abondamment plagiées, du moins de larges emprunts leur ont été faits, le plus souvent sans citations : c'est sans doute une règle coutumière, mais c'est aussi la meilleure preuve de la qualité de ces documents successifs et la technique des ancrages en sort renforcée.

En fait, les travaux qui ont abouti à la rédaction des présentes recommandations ont commencé il y a environ vingt-cinq ans pour la première édition T.A. 72. Trente-sept ingénieurs avertis ont participé aux cinq groupes de travail successifs qui ont été mis sur pied à chaque nouvelle version ou traduction et ils ont mis en commun leurs savoirs pour cette œuvre collective. Parmi eux je dois nommer les professeurs Cambefort et Graux, M. Lebellet et l'ingénieur général A. Mayer. Parmi les rédacteurs, quatre d'entre eux ont traversé sans discontinuité ce marathon normatif et je citerai Pierre Clément, Paul Dupeuble et Louis Logeais avec une mention toute particulière pour ce dernier. Non seulement il a apporté à nos séances une bonne humeur contagieuse, mais il a été la cheville ouvrière de l'ensemble des documents en assurant depuis le début le secrétariat des groupes de travail. Pour ce type de littérature, il est indispensable que la rédaction soit assurée par une seule main. Mais lorsque quatre éditions se succèdent, c'est une chance que la même main soit disponible chaque fois. Ces recommandations n'auraient pas été ce qu'elles sont si Louis Logeais n'avait pas su trouver le temps d'assurer cette tâche ingrate et il faut l'en remercier ici très vivement. Enfin c'est Marie-Claude Bellemère et Gérard Robin qui ont assuré la saisie des textes, graphiques et figures de cette édition : autre tâche ingrate et essentielle qu'ils ont faite avec beaucoup de soin et de précision.

P. Habib,
professeur à l'ENGREF
conseiller scientifique
du Laboratoire de Mécanique des Solides de l'École Polytechnique.

MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL

Président

M. Pierre Habib, président honoraire de la Société Internationale de Mécanique des Roches.

Président honoraire du Comité français de la Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations.

Président du Groupement d'Intérêt public pour l'étude des Structures Souterraines de Stockage.

Rapporteur

M. Louis Logeais, Ingénieur Conseil.

Membres

M. Berthelot	Bureau Veritas
M. Bigot	Laboratoire régional de l'Est parisien
M. Boucherie	Socotec
M. Brin	C.E.P. (Contrôle et Prévention)
M. Bustamante	Laboratoire central des Ponts et Chaussées
M. Clément	Bachy
M. Dupeuble	Bachy
M. Isnard	Bureau Veritas
M. Jaubertou	Bachy
M. Pignalet	Solétanche
M. Plumelle	Centre expérimental du Bâtiment et des Travaux publics
M. Schreiber	Solétanche

On peut dire actuellement que la technique des ancrages est très sûre et elle n'a pas une pathologie excessive. On peut penser que nos « recommandations » y sont pour quelque chose. D'une façon générale, les différentes éditions de T.A. ont été bien accueillies par le public des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre, des ingénieurs et des bureaux d'études des entreprises. Nos recommandations ont d'ailleurs été sinon abondamment plagiées, du moins de larges emprunts leur ont été faits, le plus souvent sans citations : c'est sans doute une règle coutumière, mais c'est aussi la meilleure preuve de la qualité de ces documents successifs et la technique des ancrages en sort renforcée.

En fait, les travaux qui ont abouti à la rédaction des présentes recommandations ont commencé il y a environ vingt-cinq ans pour la première édition T.A. 72. Trente-sept ingénieurs avertis ont participé aux cinq groupes de travail successifs qui ont été mis sur pied à chaque nouvelle version ou traduction et ils ont mis en commun leurs savoirs pour cette œuvre collective. Parmi eux je dois nommer les professeurs Cambefort et Graux, M. Lebelle et l'ingénieur général A. Mayer. Parmi les rédacteurs, quatre d'entre eux ont traversé sans discontinuité ce marathon normatif et je citerai Pierre Clément, Paul Dupeuble et Louis Logeais avec une mention toute particulière pour ce dernier. Non seulement il a apporté à nos séances une bonne humeur contagieuse, mais il a été la cheville ouvrière de l'ensemble des documents en assurant depuis le début le secrétariat des groupes de travail. Pour ce type de littérature, il est indispensable que la rédaction soit assurée par une seule main. Mais lorsque quatre éditions se succèdent, c'est une chance que la même main soit disponible chaque fois. Ces recommandations n'auraient pas été ce qu'elles sont si Louis Logeais n'avait pas su trouver le temps d'assurer cette tâche ingrate et il faut l'en remercier ici très vivement. Enfin c'est Marie-Claude Bellemère et Gérard Robin qui ont assuré la saisie des textes, graphiques et figures de cette édition : autre tâche ingrate et essentielle qu'ils ont faite avec beaucoup de soin et de précision.

P. Habib,
professeur à l'ENGREF
conseiller scientifique
du Laboratoire de Mécanique des Solides de l'École Polytechnique.

LES PRINCIPALES NOTATIONS

Les méthodes concernant les caractéristiques des terrains sont celles de la mécanique des sols.

Elles sont complétées par les définitions et notations ci-après qui concernent plus spécialement les tirants d'ancrage.

Majuscules latines

A	Section nominale de l'armature.
B	Écartement de deux tirants successifs d'une même nappe ou d'une même file.
C	Cohésion du terrain.
F_s	Coefficient de sécurité propre à l'étude de stabilité.
F_t	Coefficient de sécurité propre à la résistance du tirant.
I_p	Indice de plasticité du terrain.
L	Longueur totale du tirant.
L_e	Longueur extérieure de l'armature du tirant (comprise entre la face extérieure de la plaque d'appui et la fixation sur le vérin).
L_L	Longueur libre théorique de l'armature du tirant (cas général).
L_{LA}	Longueur libre théorique de l'armature du tirant (cas des armatures non scellées directement au sol).
L_{LT}	Longueur libre théorique du tirant.

Nota : lorsque $L_{LA} = L_{LT}$, on emploie, pour désigner cette longueur, le vocable unique L_L .

- L_S Longueur du scellement de l'armature du tirant (cas général).
 L_{SA} Longueur de scellement de l'armature (cas des armatures non scellées directement au sol).
 L_{ST} Longueur du scellement du tirant.

Nota : lorsque $L_{SA} = L_{ST}$, on emploie, pour désigner cette longueur, le vocable unique L_S .

- P_a Poussée sur le plan d'ancrage fictif (ec sur la fig. A1.07, p. 123).

Nota : P_a est calculée en pressions effectives dues au sol et éventuellement à la surcharge, à l'exclusion de la poussée hydrostatique due à la nappe d'eau.

- P_A Poussée sur le soutènement.

Nota : P_A est calculée en pressions effectives dues au sol et éventuellement à la surcharge, à l'exclusion de la poussée hydrostatique due à la nappe d'eau. Cette poussée ne représente donc qu'une fraction de la poussée qui est prise en compte dans le calcul mécanique du soutènement et de ses réactions d'ancrage et d'appui.

- P_0 P_1 P_2 Classes de protection des tirants contre la corrosion.

- Q_c Terme de cohésion de la réaction du massif d'appui.

- Q_f Terme de frottement maximal de la réaction du massif d'appui.

- R Réaction d'ancrage d'une structure ou d'un radier suivant l'axe du tirant = valeur minimale de traction du tirant nécessaire à la stabilité d'une tranche unitaire de la structure ou du radier.

- R' Effort maximal d'ancrage (supérieur à R) intervenant dans la vérification de la sécurité au glissement du massif de sol (stabilité d'ensemble).

- R_h Composante horizontale de la réaction d'ancrage R (dans le cas d'un soutènement).

- T Symbole général représentant une force de traction.

REMARQUE

Le mot « traction » et la notation T , affectée ou non d'indice, qui lui correspond, représentent toujours, dans ces recommandations, la force

de traction totale du câble ou de l'organe d'ancrage, réelle ou conventionnelle, et non une contrainte. Les diverses acceptions de T sont mentionnées ci-après (voir aussi fig. 2.01, p. 8).

- T_b Traction de blocage : traction initiale, majorée de toutes les pertes possibles, devant exister dans le tirant avant l'opération matérielle de blocage.
- T_c Traction critique de fluage : traction à partir de laquelle d'importants déplacements dus au fluage du terrain commencent à se produire au niveau du scellement.
- T_e Traction d'épreuve : traction à laquelle on soumet le tirant pendant l'essai.

Nota : La traction d'épreuve doit normalement être supérieure à la traction de service, mais elle ne constitue pas une vérification du coefficient de sécurité.

- T_i Traction initiale : traction minimale, définie par le calcul, qui doit exister dans le tirant pour assurer la stabilité de l'ouvrage dans les phases futures de construction.
- T_j Traction réelle dans le tirant au temps j , comptée à partir du blocage.
- T_o Traction préparatoire à l'essai.
- T_p Traction limite élastique : traction à laquelle serait soumis le tirant si la contrainte de son armature atteignait la limite d'élasticité conventionnelle de l'acier.

REMARQUES

- 1. Cette traction est une caractéristique du tirant seul.*
- 2. Le terme abrégé « limite élastique » désigne ici la limite d'élasticité à 0,1 % pour les armatures de précontrainte, et la limite d'élasticité à 0,2 % pour les aciers ordinaires.*

- T_r Traction réelle après blocage : traction réelle subsistant dans le tirant aussitôt après l'opération de blocage.

- T_s Traction maximale dans un tirant sous un état-limite de service : c'est la traction maximale, définie contractuellement, qui doit subsister dans le tirant pour assurer l'équilibre de la structure.
- T_u Traction limite conventionnelle par rupture du scellement.
- V Volume du cône d'influence.
- W Poids du massif M contenant les ancrages.

Minuscules latines

- a Écartement des tirants d'ancrage d'un radier.
- l_2 Hauteur du cône d'influence.
- n Porosité d'un sol.
- r Rayon de base du cône d'influence.
- s Surcharge unitaire du terrain.
- z Profondeur à partir de la surface du sol.
- z_0 Épaisseur de la couche sans frottement.
- z_1, z_2 Épaisseurs de couches partielles.
- z_i Épaisseur d'une couche partielle quelconque.

Majuscules grecques

- Δ_e Déplacement du repère lié à l'armature, au cours des opérations de mise en tension du tirant.
- Δl Allongement élastique de l'armature du tirant, au cours des opérations de mise en tension.
- ΔV Volume de la demi-partie commune à deux cônes d'influence voisins.
- ΔW Poids de la demi-partie commune à deux cônes d'influence voisins.
- $\Pi(T_i)$ Pression, lue au manomètre, correspondant à la traction de blocage.
- Φ Angle de cisaillement interne du terrain.
- ψ_i Frottements évalués ou mesurés pour obtenir la traction T_i .

Minuscules grecques

α	Pente des courbes de fluage.
β	Demi-angle au sommet du cône d'influence.
γ	Poids volumique du terrain.
γ_0	Poids volumique d'une couche de sol sans frottement.
γ_1, γ_2	Poids volumique de couches de sol.
γ_i	Poids volumique d'une couche partielle quelconque.
γ'	Poids volumique immergé : poids volumique apparent d'un sol saturé, compte tenu de la poussée d'Archimède.
ξ	Coefficient sans dimension intervenant dans le calcul du volume du cône d'influence en sol stratifié.
ψ'	Coefficient sans dimension intervenant dans le calcul de l'effort réduit (cônes d'influence voisins).

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	V
MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL.....	VII
LES PRINCIPALES NOTATIONS.....	IX

Chapitre 1 : PRÉAMBULE

1.1. Objet des recommandations.....	1
1.2. Importance et actualité du problème.....	2
1.3. Caractère des recommandations.....	3
1.4. Importance de la mise en œuvre des tirants d'ancrage.....	3
1.5. Obligations des entreprises.....	4
1.6. Méthodologie de l'étude des tirants d'ancrage.....	4

Chapitre 2 : DÉFINITIONS

2.1. Définitions relatives aux phases successives de la vie d'un tirant.....	7
2.2. Définitions relatives aux efforts sollicitant les tirants.....	10
2.21. <i>Traction limite conventionnelle</i>	10
2.22. <i>Traction de service</i>	11
2.3. Définitions relatives aux caractéristiques dimensionnelles des tirants.....	11

Chapitre 3 : SPÉCIFICATIONS CONCERNANT LES MATÉRIAUX

3.1.	Armatures.....	15	
	3.11. <i>Armatures métalliques (aciers)</i>	15	
	3.110. <i>Nature des aciers</i>	15	
	3.111. <i>Traction de service</i>	16	
	3.112. <i>Remarque importante</i>	17	
	3.12. <i>Armatures non métalliques</i>	17	
3.2.	Ciment de scellement.....	18	
	3.20. <i>Généralités</i>	18	4
	3.21. <i>Choix du ciment en fonction de l'agressivité du terrain environnant</i>	18	
	3.210. <i>Classification des terrains</i>	18	
	3.211. <i>Terrains très agressifs</i>	19	4
	3.212. <i>Terrains moyennement agressifs</i>	21	
	3.213. <i>Terrains peu agressifs</i>	21	
	3.22. <i>Choix du ciment en fonction de son agressivité vis-à-vis des armatures</i>	22	
	3.220. <i>Cas où l'armature du tirant est constituée par des aciers de précontrainte</i>	22	
	3.221. <i>Cas où l'armature est constituée par des aciers pour béton armé</i>	22	
	3.222. <i>Cas où l'armature est constituée par un matériau composite non métallique</i>	22	
	3.23. <i>Récapitulation du choix du ciment en fonction des deux critères précédents</i>	23	4
	3.24. <i>Additifs et adjuvants</i>	23	
3.3.	Résines de scellement et de protection contre la corrosion.....	24	
	3.31. <i>Résines de scellement</i>	24	
	3.32. <i>Résines de protection contre la corrosion</i>	24	

Chapitre 4 : PROTECTION DES TIRANTS CONTRE LA CORROSION

4.0.	Généralités.....	25
	4.01. <i>Généralités sur les armatures des tirants</i>	25
	4.02. <i>Aciers ordinaires</i>	26
	4.03. <i>Aciers pour armatures de précontrainte</i>	26
	4.04. <i>Nomenclature des protections à prévoir pour les diverses parties du tirant</i>	27
4.1.	Paramètres influant sur l'importance de la protection des tirants précontraints.....	27
	4.11. <i>Durée d'utilisation</i>	27
	4.12. <i>Nature du milieu ambiant</i>	28
4.2.	Généralités sur la protection contre la corrosion de la partie libre des tirants précontraints.....	29
	4.20. <i>Classification des protections</i>	29
	4.200. <i>Classification suivant la date de mise en place</i>	29
	4.201. <i>Classification selon le degré et la durabilité de protection apportée</i>	30
	4.21. <i>Définition de la classe P0</i>	31
	4.22. <i>Définition de la classe P1</i>	31
	4.23. <i>Définition de la classe P2</i>	31
4.3.	Choix de la protection à prévoir pour la partie libre.....	31
	4.31. <i>Choix de la classe de protection</i>	31
	4.32. <i>Choix de la nature de la protection</i>	33
	4.33. <i>Choix entre la protection antérieure et la protection postérieure</i>	34
	4.330. <i>Cas où une protection antérieure à la mise en tension est nécessaire</i>	34

4.4.	Critères de qualité auxquels doivent satisfaire les protections de la partie libre.....	35
4.41.	<i>Conditions générales</i>	35
4.42.	<i>1^{er} cas : la protection à assurer est de la classe P1</i>	35
	4.420. <i>Nature des produits utilisables</i>	35
	4.421. <i>Spécifications particulières aux produits utilisables</i>	36
4.43.	<i>2^e cas : la protection à assurer est de la classe P2</i>	37
	4.430. <i>Nature des produits ou procédés utilisables</i>	37
	4.431. <i>Spécifications concernant les produits ou procédés</i>	37
4.5.	Protection de la partie scellée des tirants d'ancrage.....	38
4.50.	<i>Énoncé des exigences</i>	38
4.51.	<i>Protection de la classe P1</i>	39
4.52.	<i>Protection de la classe P2</i>	39
4.6.	Protection de la tête d'ancrage et de la zone de raccordement du tirant à l'ouvrage.....	41
4.60.	<i>Généralités</i>	41
4.61.	<i>Principes de protection de la zone de raccordement communs aux classes P1 et P2</i>	41
4.62.	<i>Dispositions particulières supplémentaires pour une protection de la classe P2</i>	45
4.7.	Mise en œuvre de la protection	46
4.71.	<i>Délais de mise en œuvre de la protection</i>	46
4.72.	<i>Conditions de mise en œuvre</i>	46
	4.720. <i>Généralités</i>	46
	4.721. <i>Mise en œuvre des produits à base de bentonite-ciment</i>	47
	4.722. <i>Mise en œuvre des résines</i>	47
	4.723. <i>Mise en œuvre des torons gainés graissés ou cirés</i>	48

4.724. Mise en œuvre des protections rigides à base de coulis de ciment.....	48
4.8. Dispositions particulières à chaque système.....	49

Chapitre 5 : MISE EN ŒUVRE

5.0. Généralités.....	51
5.1. Forage.....	52
5.2. Mise en place de l'armature.....	52
5.3. Accrochage du tirant au sol.....	53
5.30. Généralités.....	53
5.31. Procédés n'utilisant ni les coulis ni les mortiers de scellement.....	53
5.32. Procédés utilisant les coulis et les mortiers de scellement.....	54
5.320. Généralités.....	54
5.321. Exécution des scellements.....	54
5.4. Mise en service du tirant.....	54
5.40. Généralités sur la mise en service.....	54
5.41. Tractions caractéristiques de mise en tension.....	56
5.410. Traction d'épreuve T_e	56
5.411. Traction de début de blocage et pertes.....	58
5.42. Matériel et appareillage de mise en tension.....	61
5.420. Remarques préliminaires.....	61
5.421. Spécification particulières.....	61
5.43. Application de la traction d'épreuve T_e	65
5.430. Remarques liminaires sur les caractéristiques mesurables.....	65
5.431. Fixation des pressions de mise en tension.....	66
5.432. Processus de montée en pression.....	69
5.433. Essai de réception du tirant.....	69

5.434. Durée de l'épreuve du tirant et intervalles de mesure	72
5.44. Blocage du tirant et détente du vérin	78
5.440. Mode opératoire	78
5.441. Détermination de la traction de fin de blocage..	79
5.442. Vérification de la traction de service T_s	80
5.5. Détente ou extraction des tirants provisoires.....	81

Chapitre 6 : LES ESSAIS DE TIRANTS

6.0. Définitions, objectifs et opportunité des différents essais.....	83
6.01. Les différents types d'essais.....	83
6.02. Objectifs des différents essais. Spécifications générales	83
6.020. Essais à la rupture.....	83
6.021. Essais de contrôle	84
6.022. Essais de réception	84
6.03. Opportunité des essais. Obligations des divers contractants.....	85
6.030. Domaine d'application	85
6.031. Essais préalables	85
6.032. Essais de conformité.....	86
6.033. Essais de contrôle	88
6.034. Essais de réception	88
6.035. Récapitulation.....	88
6.1. Essais préalables.....	89
6.11. Objet des essais préalables	89
6.12. Non-réutilisation des tirants d'essai.....	89
6.13. Nombre de tirants d'essai à prévoir.....	89
6.130. Considérations générales.....	89
6.131. Nombre minimal de tirants d'essai.....	90

6.14.	<i>Date de réalisation des essais</i>	91
6.15.	<i>Emplacements des tirants d'essai</i>	91
6.16.	<i>Exécution des tirants d'essai et des massifs d'appui éventuels</i>	92
	6.160. <i>Tirants d'essai</i>	92
	6.161. <i>Massifs d'appui</i>	94
6.17.	<i>Matériel et appareillage pour la réalisation des essais préalables</i>	94
	6.170. <i>Généralités</i>	94
	6.171. <i>Mesure des déplacements</i>	94
	6.172. <i>Mesure des charges</i>	95
	6.173. <i>Remarque concernant la mesure des déplacements et des charges</i>	95
	6.174. <i>Appareillage de mise en tension</i>	96
	6.175. <i>Remarque : mesure des efforts le long du scellement</i>	96
6.18	<i>Mode opératoire des essais préalables et interprétation des résultats</i>	96
	6.180. <i>Généralités</i>	96
	6.181. <i>Conduite des essais. Précautions à prendre</i>	97
	6.182. <i>Processus général des essais</i>	97
	6.183. <i>Mode opératoire des essais du premier tirant.</i>	97
	6.184. <i>Interprétation des résultats de l'essai du premier tirant</i>	98
	6.185. <i>Mode opératoire des essais du second tirant</i> ...	98
	6.186. <i>Interprétation des résultats des essais du second tirant</i>	98
	6.187. <i>Recherche de la traction de service</i>	99
6.2.	<i>Essais de conformité</i>	100
	6.20. <i>Généralités</i>	100
	6.21. <i>Nombre de tirants d'essai à prévoir</i>	100
	6.22. <i>Date de réalisation des essais</i>	101

6.23.	<i>Matériel et appareillage d'essais</i>	101
6.24.	<i>Mode opératoire des essais de conformité</i>	101
6.25.	<i>Interprétation des résultats, critères de réception des tirants</i>	101
6.3.	Essais de contrôle.....	102
6.30	<i>Généralités</i>	102
6.31	<i>Nombre de tirants d'essai</i>	102
6.32	<i>Matériel et appareillage d'essais</i>	102
6.33	<i>Mode opératoire des essais de contrôle</i>	102
6.34	<i>Critères de réception des tirants soumis aux essais de contrôle</i>	103

Chapitre 7 : CONTRÔLE PÉRIODIQUE DE LA TRACTION

7.1.	Opportunité de procéder à un tel contrôle.....	105
7.2.	Modalités de contrôle des tirants permanents.....	106
7.21.	<i>Prise en charge du contrôle</i>	106
7.22.	<i>Durée et fréquence du contrôle</i>	106
7.23.	<i>Dispositif de contrôle</i>	106
7.230.	<i>Définition du dispositif</i>	106
7.231.	<i>Distribution et nombre des appareils de contrôle</i>	107
7.232.	<i>Critères de choix des appareils de contrôle</i>	108
7.233.	<i>Nature des appareils de contrôle et mode opératoire</i>	109

Chapitre 8 : RECOMMANDATIONS À L'USAGE DES MAÎTRES D'OUVRAGES

8.1.	Préambule.....	111
8.2.	Technologie des tirants.....	111

8.3.	Protection contre la corrosion.....	112
8.4.	Essais.....	112
8.5.	Contrôles périodiques dans le temps.....	113
8.6.	Autorisations de pose, redevances.....	113
8.7.	Dispositions constructives particulières concernant les structures ancrées.....	114
8.8.	Pièces écrites et cahiers des clauses techniques.....	115

Annexe 1 : STABILITÉ DES SOUTÈNEMENTS

A1.1.	Conditions de stabilité.....	117
	A1.11 <i>Vérification de l'équilibre séparé de chacun des éléments constitutifs du soutènement</i>	117
	A1.12 <i>Vérification de la stabilité générale du terrain environnant la structure</i>	117
A1.2.	Équilibre de la paroi isolée.....	118
	A1.21 <i>Composantes horizontales des forces</i>	118
	A1.22 <i>Composantes verticales des forces</i>	119
A1.3.	Résistance de l'ancrage.....	121
A1.4.	Stabilité d'ensemble.....	121
	A1.41 <i>Équilibre du massif à nappe unique</i>	122
	A1.42 <i>Équilibre du massif sollicité par plusieurs nappes d'ancrages</i>	126
A1.5.	Stabilité générale du terrain environnant.....	127

Annexe 2 : VÉRIFICATION DE LA STABILITÉ D'ENSEMBLE DES TIRANTS VERTICAUX POUR RADIER

A2.1.	Méthode	129
	A2.11 <i>Principe</i>	129
	A2.12 <i>Méthode pratique</i>	129
A2.2.	Volume unitaire associé (cône d'influence)	130
	A2.21 <i>Forme réelle</i>	130
	A2.22 <i>Volume pratique, en sol homogène à frottement interne prédominant</i>	131
	A2.23 <i>Volume pratique, en sol stratifié à frottement interne prédominant</i>	133
	A2.24 <i>Volume pratique, dans un sol homogène surchargé par un sol sans frottement</i>	133
	A2.25 <i>Volume pratique, dans un sol homogène à frottement interne prédominant surchargé de façon uniforme</i>	134
	A2.26 <i>Valeur limite du demi-angle au sommet β</i>	134
	A2.27 <i>Volume pratique dans un sol homogène à cohésion prédominante</i>	134
	A2.28 <i>Volume pratique dans un sol à cohésion prédominante surmonté par des sols de nature différente</i>	135
	A2.29 <i>Volume pratique dans un sol homogène à cohésion prédominante surchargé de façon uniforme</i>	135
A2.3.	Réduction du volume d'influence	136
	A2.31 <i>Principe</i>	136
	A2.32 <i>Réduction de T_u dans le cas de volumes coniques voisins</i>	136
	A2.33 <i>Formule pratique dans le cas de volumes coniques</i>	137
	A2.34 <i>Cas de volumes associés cylindriques</i>	138

**Annexe 3 : GUIDE POUR
LE PRÉDIMENSIONNEMENT
DES TIRANTS**

A3.1. Rappel.....	139
A3.2. Dimensionnement de l'armature.....	140
A3.3. Dimensionnement de la longueur libre L_L	140
A3.4. Approche du prédimensionnement de la longueur de scellement L_s	141
A3.41 <i>Énoncé des exigences</i>	141
A3.42 <i>Condition de non-glissement des armatures</i>	142
A3.43 <i>Méthodes de prédimensionnement de la longueur de scellement (d'après M. Bustamante)</i>	142
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	151

CHAPITRE 1

PRÉAMBULE

1.1. OBJET DES RECOMMANDATIONS

Les présentes recommandations s'appliquent à tous les types de tirants d'ancrage, c'est-à-dire :

- aux tirants constitués par des armatures ordinaires, ancrées dans le terrain soit par une injection de scellement, soit par l'intermédiaire d'un organe mécanique, tirants qui ne sont mis en traction que du fait de l'application à l'ouvrage des actions auxquelles il est soumis ; toutefois, les procédés de clouage ne sont pas visés par le présent document.
- aux tirants constitués par des armatures de précontraintes scellées dans le terrain par injection et mises en tension en prenant appui sur l'ouvrage (voir fig. 2.02, p. 12). Ces tirants sont désignés dans la suite du texte sous le vocable « tirants précontraints » : ils sont les plus couramment employés et sont donc plus spécialement visés par les présentes recommandations.

Quant aux ouvrages à la stabilité desquels de tels tirants peuvent concourir, il s'agit, par exemple, de parois de soutènement verticales ou sensiblement verticales, de radiers, de massifs de fondation, etc.

Ces recommandations s'appliquent aussi bien aux scellements dans les sols qu'aux ancrages dans les terrains rocheux, sous les deux réserves ci-après :

- pour les sols, le comportement à terme des tirants dans les terrains susceptibles de fluer est mal connu. Bien que, depuis la première édition des présentes recommandations, des campagnes d'essais aient été réalisées sur des tirants scellés dans certaines argiles, les enseignements qui ont pu en être tirés ne permettent, en aucun cas, de se dispenser d'effectuer des essais préalables pour les tirants permanents ancrés dans les terrains cohérents.
- pour les terrains rocheux, certaines dispositions des présentes recommandations sont sans objet.

Enfin, bien que ces recommandations concernent tous les tirants d'ancrage, ces derniers seront, dans la suite du texte, classés en deux catégories, en fonction de leur destination finale.

Les tirants d'ancrage provisoires sont, par définition, ceux qui n'ont qu'un rôle temporaire et deviennent inutiles au-delà d'un certain degré d'avancement des travaux, quel que soit le laps de temps devant s'écouler entre leur mise en tension et le moment où ils deviennent inutiles.

Les tirants d'ancrage permanents sont, par définition, ceux qui assurent dans le temps la stabilité d'un ouvrage, pendant toute la durée de vie de celui-ci.

1.2. IMPORTANCE ET ACTUALITÉ DU PROBLÈME

De nombreux projets de bâtiment, notamment dans les villes importantes, comportent plusieurs étages de sous-sols impliquant l'exécution de fouilles de grande profondeur.

Les parois de ces fouilles sont exécutées le plus souvent :

- soit sous forme de parois moulées dans le sol avec emploi de boues thixotropiques,
- soit selon la méthode dite berlinoise, qui comporte des raidisseurs incorporés (profilés métalliques, etc.).

Leur stabilité impose la mise en œuvre de tirants d'ancrage à différents niveaux, notamment en phase provisoire.

En cas de fouilles descendues en dessous du niveau de la nappe phréatique, les radiers destinés à résister aux sous-pressions doivent souvent être ancrés à l'aide de tirants, en général permanents, afin d'équilibrer les efforts de soulèvement.

Tous ces tirants sont, la plupart du temps, précontraints, afin de réduire les déformations ultérieures.

1.3. CARACTÈRE DES RECOMMANDATIONS

Les présentes recommandations ne peuvent avoir qu'un caractère évolutif ; il importe en effet de ne pas « figer » dans des règles trop strictes des techniques qui sont en progression constante.

Elles ont pour but de définir certains principes qui peuvent être considérés comme acquis et qui sont observés par la majorité des entreprises spécialisées, et d'indiquer certaines méthodes pratiques de vérification qui peuvent être adoptées par les ingénieurs chargés de l'établissement des projets ou de leur contrôle.

Enfin, les présentes recommandations ne peuvent couvrir tous les cas d'espèces et ne peuvent, de toute évidence, remplacer l'intervention de l'ingénieur spécialiste qualifié.

1.4. IMPORTANCE DE LA MISE EN ŒUVRE DES TIRANTS D'ANCRAGE

Les travaux de mise en tension et d'injection des tirants d'ancrage précontraints, constituant l'essentiel des présentes recommandations, sont délicats et nécessitent une main-d'œuvre particulièrement qualifiée. Aucune prescription technique ne peut remplacer l'expérience et la conscience professionnelle du personnel de l'entreprise à tous les échelons. La plupart des incidents ou accidents qui se sont produits dans la mise en œuvre des tirants d'ancrage sont dus à l'intervention d'entreprises n'ayant pas la maîtrise de ces techniques, au manque d'expérience

du projeteur, ou à l'insuffisance de surveillance du personnel de chantier de certaines entreprises spécialisées, dont les cadres techniques ont cependant une compétence incontestée.

1.5. OBLIGATIONS DES ENTREPRISES

Les modalités particulières aux procédés de mise en œuvre ne sont pas traitées dans le présent document.

Cependant, les entreprises sont tenues de fournir au maître de l'ouvrage ou à son représentant une notice technique illustrée qui mentionne les principales caractéristiques du procédé utilisé, ainsi que les modalités essentielles de mise en œuvre.

1.6. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE DES TIRANTS D'ANCRAGE

Il est rappelé que l'étude du soutènement doit précéder l'étude des tirants proprement dits. Souvent, en effet, cette seconde partie de l'étude ne peut être effectuée qu'une fois levée l'hypothèque de l'opportunité d'essais préalables (se reporter à l'article 6.1., p. 89).

L'étude des tirants doit tenir compte des résultats de la campagne de reconnaissance de sols et des essais préalables, quand il en est fait. L'entreprise peut aussi s'appuyer sur sa connaissance du terrain, résultant, soit de réalisations antérieures, soit d'une campagne d'investigations préliminaires.

COMMENTAIRE

Dans ce dernier cas, bien entendu, l'entreprise doit être en mesure de fournir les documents sur lesquels elle s'appuie.

L'attention des maîtres d'ouvrage est attirée sur le fait que, dans tous les cas, une campagne de reconnaissance est hautement souhaitable.

Bien que toute latitude soit laissée au projeteur, le processus d'ensemble de l'étude pourra s'inspirer du plan suivant :

1. Étude du soutènement

- Détermination des efforts sur le soutènement,
- Choix des niveaux d'ancrage et des phases successives de réalisation,
- Détermination de la réaction que doivent fournir les tirants au cours des différentes phases d'exécution,
- Vérification de la capacité de résistance des tirants,
- Vérification de la stabilité d'ensemble.

2. Étude des tirants

- Choix du type de tirant en fonction :
 - de la durée de vie du tirant,
 - de la nature et de l'agressivité du terrain,
 - de la capacité requise,
 - du mode de perforation envisagé, etc.
- Détermination de l'armature en fonction de la traction de service,
- Choix du mode opératoire et de la protection envisagée.

CHAPITRE 2

DÉFINITIONS

2.1. DÉFINITIONS RELATIVES AUX PHASES SUCCESSIVES DE LA VIE D'UN TIRANT

Les différentes phases de la vie d'un tirant précontraint sont illustrées par la figure 2.01 ci-après, limitée à un diagramme représentant qualitativement la traction totale en fonction du temps.

Les premières phases sont purement technologiques et relativement bien connues ; elles sont d'ailleurs variables suivant le procédé, et ne sont pas représentées sur la figure.

Ces phases techniques sont :

- le forage du trou (voir article 5.1, p. 52),
- la mise en place de l'armature (voir article 5.2, p. 52),
- l'accrochage du tirant au sol, qui peut se faire par ancrage mécanique ou par scellement au moyen d'un coulis ou d'un mortier (voir article 5.3, p. 53).

Ces phases initiales correspondent à la partie 0-T_i de la figure 2.01 ci-après.

La phase qui suit est la mise en tension du tirant ; c'est la plus importante ; elle peut elle-même se découper en un certain nombre de phases élémentaires.

- d'abord on porte la traction du tirant à une valeur qui ne sera ensuite plus dépassée dans tout le processus de mise en service. Cette première

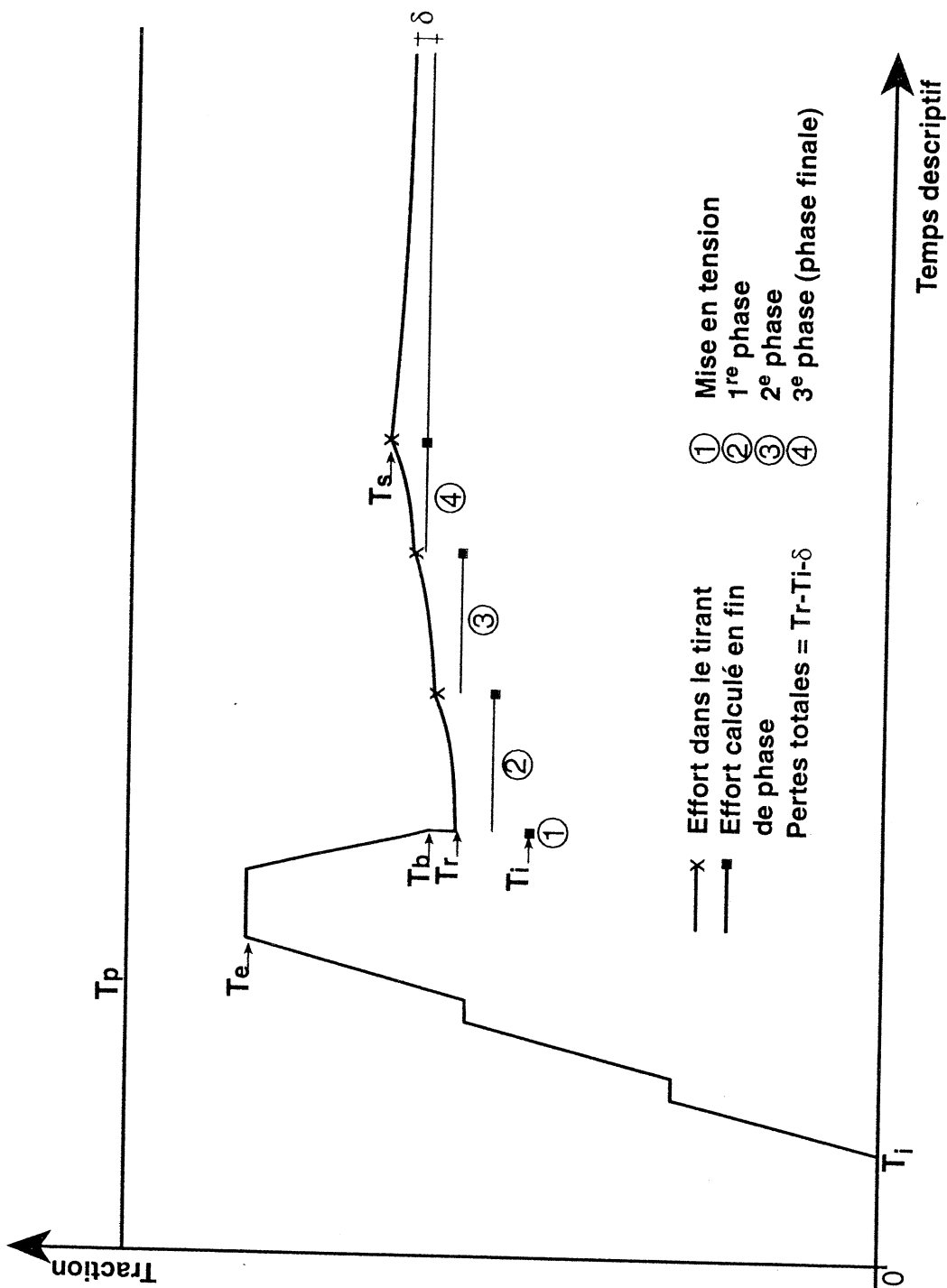


Fig. 2.01.

La
su
ex
no
Or
qu
dé
Le
int
(vo
Ap
dé
flu
len

valeur est appelée la traction d'épreuve T_e du tirant ; on la laisse subsister un certain temps, fixé, suivant la nature du terrain dans lequel est effectué le scellement, à l'article 5.433.2.2 (p. 66) des présentes recommandations (c'est le palier à T_e de la figure 2.01, ci-avant). La valeur de la traction d'épreuve est indiquée à l'article 5.411 (p. 58).

- ensuite on laisse descendre la tension jusqu'à une certaine traction de blocage T_b . Cette traction de blocage peut être éventuellement égale à la traction d'épreuve, elle peut aussi être inférieure (c'est le cas de la figure 2.01, ci-avant).
- puis intervient, après la phase correspondant à la préparation du blocage, le blocage proprement dit qui, suivant le dispositif opératoire, peut entraîner une perte plus ou moins importante au calage (figure 2.01, ci-avant). Cette perte est, en général, mal connue, sauf sur les tirants contrôlés par un appareil de mesure. La traction qui subsiste alors dans le tirant est appelée traction réelle après blocage T_r .

COMMENTAIRE

Dans certains procédés de précontrainte utilisant des têtes autobloquantes, les opérations indiquées ci-dessus se déroulent selon un ordre différent.

La suite du diagramme indique la traction dans le tirant lors des phases successives de travaux (réalisation d'autres tirants de la même nappe, excavation pour atteindre la nappe suivante, réalisation des tirants sur la nouvelle nappe, etc.) jusqu'à la phase finale.

On procède alors à la protection du tirant (voir chapitre 4, p. 25) à moins que cette opération n'ait déjà eu lieu avant la mise en tension. Ceci dépend du dispositif opératoire choisi suivant les différentes techniques.

Le tirant est alors mécaniquement terminé et ne donne plus lieu à aucune intervention, à moins qu'il ne fasse l'objet d'un contrôle systématique (voir chapitre 7, p. 105).

Après la mise en charge définitive, le tirant subit un processus naturel de détente partielle dû aux pertes de toute nature : relaxation des armatures, fluage éventuel du scellement dans certains terrains cohérents et naturellement déformables.

Ce processus doit pratiquement conduire à une limite de la traction supérieure ou égale à celle que l'on a calculée pour la phase finale.

REMARQUE

Il ne faut jamais, au moment du calcul, sous prétexte d'introduire une sécurité supplémentaire, surévaluer exagérément les pertes, car cela conduit ensuite à un excès de tension permanent du tirant et de son ancrage ; cet excès de tension risque d'être nuisible ; au mieux, il est inutile.

2.2. DÉFINITIONS RELATIVES AUX EFFORTS SOLLICITANT LES TIRANTS

2.21. Traction limite conventionnelle

La force de traction limite conventionnelle du tirant, appelée en abrégé traction limite conventionnelle¹ est définie comme suit :

En cas de scellement dans les terrains non susceptibles de fluer, elle correspond à la plus petite des deux valeurs suivantes :

- rupture de l'armature du tirant,
- rupture du scellement (traction limite T_u).

Dans les terrains susceptibles de fluer, la traction limite est la traction à partir de laquelle des déformations de fluage inacceptables se produisent au niveau du scellement ; elle est en général inférieure aux valeurs précédentes.

COMMENTAIRE

Le chapitre 6 (p. 83) précise à partir de quelles valeurs enregistrées au cours des essais préalables les déformations du scellement sont considérées comme inacceptables.

1. Voir, dans les Principales notations, la remarque qui suit le symbole T.

2.22. Traction de service

La traction maximale dans un tirant sous un état limite de service, traction de service T_s , se déduit de la traction limite conventionnelle à partir de la relation :

$$\text{Traction limite de service} \leq \frac{\text{Traction limite conventionnelle}}{F_t}$$

où F_t est le coefficient de sécurité propre au tirant.

REMARQUE

La traction limite de service T_s est celle qui doit subsister dans le tirant pour assurer l'équilibre de la structure, tel qu'il résulte du calcul, sous les sollicitations les plus défavorables pouvant se produire pendant toute la durée de vie de l'ouvrage.

COMMENTAIRE

La traction de service résulte de limitations imposées :

- soit par les contraintes dans l'armature,
- soit par la rupture du scellement (court terme),
- soit par les phénomènes de fluage (long terme).

De ce fait, le coefficient F_t peut prendre des valeurs différentes, qui seront précisées à l'article 3.1 (p. 15), et au chapitre 6 (p. 83).

2.3. DÉFINITIONS RELATIVES AUX CARACTÉRISTIQUES DIMENSIONNELLES DES TIRANTS

2.31. On désigne par (fig. 2.02 a et b, ci-après) :

L la longueur totale du tirant comptée à partir de la face supérieure de la plaque d'appui.

L_{LT} la longueur libre du tirant.

L_{LA} la longueur libre de l'armature.

L_{ST} la longueur de scellement du tirant.

L_{SA} la longueur de scellement de l'armature.

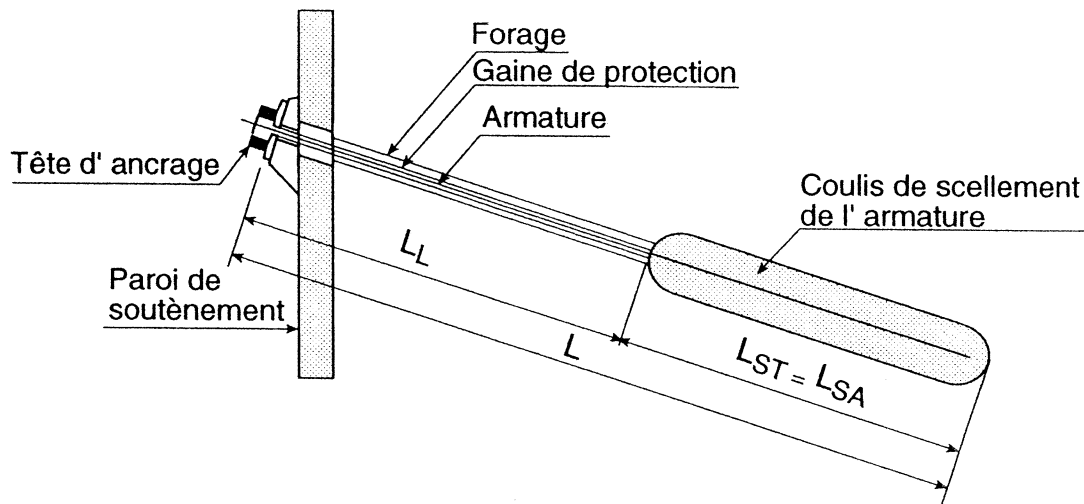


Fig. 2.02a. — Tirant dont l'armature est scellée directement dans le sol

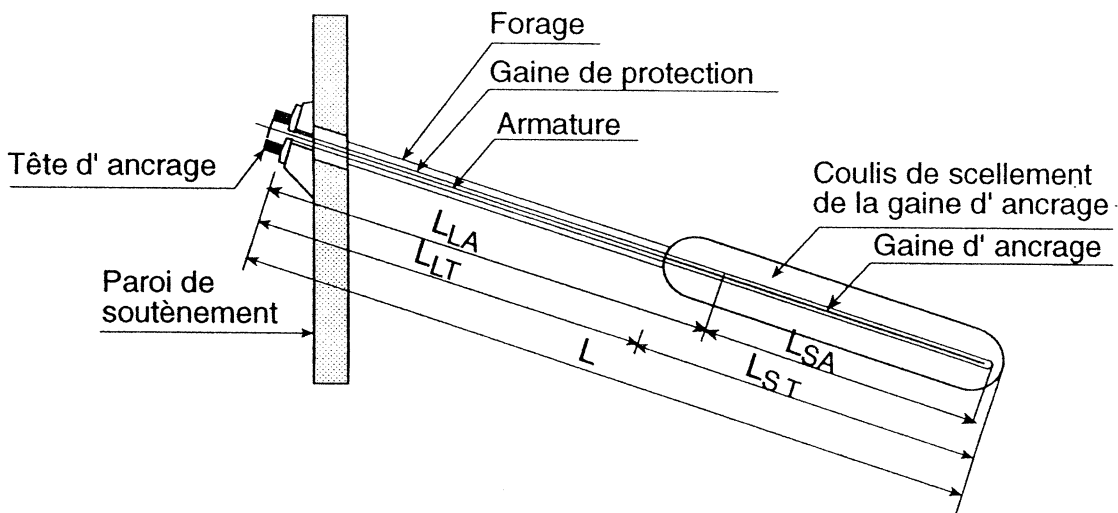


Fig. 2.02b. — Tirant précontraint dont l'armature est scellée dans une gaine elle-même scellée dans le sol

COMMENTAIRE

Dans le cas où l'armature est scellée directement dans le sol, on a $L_{LT} = L_{LA} = L$ (fig 2.02 a)

Dans le cas où l'armature est scellée dans une gaine d'ancrage, elle-même scellée directement dans le sol (voir article 3.23, 2^e alinéa, p. 23), on a $L_{LT} < L_{LA}$ (fig. 2.02 b).

COMMENTAIRE

Dans le cas où l'armature est scellée directement dans le sol, on a $L_{ST} = L_{SA}$ (fig. 2.02 a).

Dans le cas où l'armature est scellée dans une gaine d'ancrage elle-même scellée directement dans le sol, on a $L_{ST} > L_{SA}$ (fig. 2.02 b).

NOTA

Dans un souci de simplification, on peut utiliser L_L pour désigner indifféremment la longueur libre du tirant ou de l'armature, chaque fois que ces deux longueurs sont identiques.

De même, on peut utiliser L_S pour désigner indifféremment la longueur de scellement du tirant ou de l'armature, chaque fois que ces deux longueurs sont identiques.

2.32. On désigne par B l'écartement des tirants consécutifs d'une même nappe ou file (fig. 2.03).

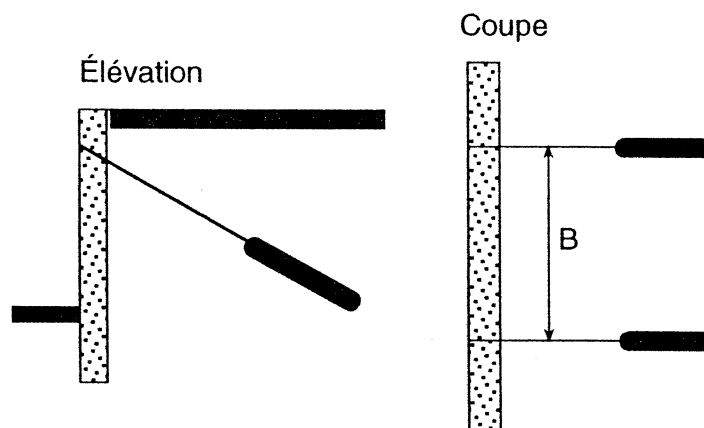


Fig. 2.03.

CHAPITRE 3

SPÉCIFICATIONS CONCERNANT LES MATÉRIAUX

3.1. ARMATURES

Les armatures peuvent être :

- métalliques (aciers), faisant l'objet de l'article 3.11 (ci-après),
- non métalliques, faisant l'objet de l'article 3.12 (p. 17),

3.11. Armatures métalliques (aciers)

3.110. Nature des aciers

1. Dans le cas où les aciers utilisés sont :

- des aciers à haute adhérence pour béton armé,
- des aciers à haute résistance pour précontrainte.

Ils doivent être agréés par la Commission interministérielle de la précontrainte.

La limite élastique à prendre en compte (article 3.111, ci-après) est celle qui est indiquée sur les fiches d'identification de ces aciers.

2. Dans le cas exceptionnel où l'on utilise une armature appartenant à une catégorie non agréée (par exemple, profilé du commerce, barre refoullée...), la limite élastique à prendre en compte est celle qui est garantie

par le fournisseur, sous réserve que cette garantie soit équivalente à celle des aciers agréés.

COMMENTAIRE

Il ne suffit donc pas dans ce cas de montrer par quelques essais que la moyenne des résultats est supérieure à la valeur garantie, il convient de faire une véritable interprétation statistique de résultats d'essais en nombre suffisant.

3.111. Traction de service

1. Aciers pour précontrainte

Si T_p désigne la force de traction correspondant à la limite d'élasticité conventionnelle de l'armature du tirant, la traction de service T_S doit être au plus égale aux valeurs suivantes :

- $T_S < 0,75 T_p$ pour les tirants provisoires d'une durée d'utilisation ne dépassant pas dix-huit mois.
- $T_S < 0,60 T_p$ pour les tirants permanents et les tirants provisoires devant jouer leur rôle pendant plus de dix-huit mois.

COMMENTAIRE

Ces valeurs sont fixées en fonction des risques de corrosion sous tension (voir article 4.03, p. 26).

2. Aciers pour tirants non précontraints (tirants passifs)

Pour la partie non spécialement protégée des tirants, la section des aciers à prendre dans les calculs est non la section nominale, mais une section réduite tenant compte des pertes de matière par corrosion, et calculée sur la durée de vie de l'ouvrage. La traction de service est égale au produit de cette section réduite par les contraintes résultant des règlements du béton armé.

COMMENTAIRE

On peut se référer à la norme NFP 11-212 (référence DTU 13.2) qui indique, pour les pieux métalliques battus, la perte annuelle de matière en fonction de l'agressivité du terrain (0,01 à 0,1 mm/an).

Dans le cas de barres filetées, la section à prendre en compte dans les calculs est la section mesurée à fond de filet.

Pour les barres dont la limite élastique est supérieure à 300 MPa, il convient, pour se prémunir contre l'effet d'entaille, d'utiliser des barres à filets refoulés, ou d'adopter des contraintes réduites.

3. Les valeurs de la traction de service indiquée aux paragraphes 311.1 et 311.2 constituent un maximum à ne pas dépasser.

En particulier :

- pour les tirants provisoires, le cahier des charges particulières peut, suivant le cas, fixer des valeurs inférieures,
- pour les tirants permanents, dans certains cas (par exemple en présence de milieux agressifs ou de travaux à la mer), le cahier des charges particulières doit imposer des valeurs inférieures.

3.112. Remarque importante

Il est impossible de réaliser des précontraintes vraiment efficaces avec les aciers pour béton armé. Les tirants ainsi constitués sont donc en général scellés sur toute leur longueur, et leur mise en charge occasionne des déformations importantes inacceptables pour certains ouvrages.

3.12. Armatures non métalliques

L'existence, sur le marché, d'armatures non métalliques en matériaux composites (fibres de verre, d'aramide, de carbone, de bore, etc.) ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine des tirants provisoires destructibles et dans celui des tirants permanents.

Ces armatures non métalliques en cours de développement nécessitent encore un approfondissement des lois de comportement de ces matériaux composites et une investigation de leur pérennité effective sous tension lorsqu'elles sont exposées à des environnements potentiellement agressifs, pouvant être différents de ceux qui sont considérés comme agressifs pour l'acier.

En l'absence actuelle de normalisation et de spécifications quant à l'utilisation de telles armatures non métalliques en tirants d'ancrage, chaque cas d'application potentielle devra faire l'objet d'une étude spécifique.

3.2. CIMENT DE SCCELLEMENT

3.20. Généralités

Le présent paragraphe concerne les ciments utilisables dans les mortiers ou coulis destinés à constituer le scellement du tirant au terrain.

Ces ciments sont à choisir en fonction du double critère ci-après :

- l'agressivité du terrain vis-à-vis du ciment,
- l'agressivité du ciment vis-à-vis de l'armature du tirant.

3.21. Choix du ciment en fonction de l'agressivité du terrain environnant

3.210. Classification des terrains

Les terrains dans lesquels seront exécutés les tirants peuvent être classés en deux catégories :

- ceux qui ne présentent pas de risque d'agressivité,
- ceux qui possèdent une agressivité particulière.

Dans cette seconde catégorie, figurent notamment :

- les terrains qui contiennent des éléments agressifs (par exemple produits chimiques, sulfates naturels...),
- les terrains baignés par des eaux agressives.

Parmi les terrains possédant une agressivité particulière, on distingue, en fonction du degré de nocivité des eaux ou des produits contenus dans le sol :

- les terrains moyennement agressifs,
- les terrains très agressifs.

Les paragraphes suivants ont pour but de définir :

- la classification des terrains en fonction de leur agressivité,
- les qualités que doivent posséder les ciments pour résister à cette agressivité.

3.211. Terrains très agressifs

1. Nomenclature des terrains très agressifs

Sont considérés comme très agressifs :

- les terrains situés en ambiance très agressive (par exemple au voisinage d'usines de produits chimiques corrosifs, au voisinage ou en bordure de la mer),
- les terrains contenant, même en très faible quantité, des produits très agressifs, tels que certains produits chimiques ou des sulfates naturels,
- les terrains baignés par une nappe d'eaux très agressives.

Parmi les eaux très agressives, on peut citer :

- les eaux très pures (de degré hydrotimétrique inférieur à 6) qui dissolvent la chaux libre et hydrolysent les silicates et aluminates contenus dans le ciment,
- les eaux acides, qui attaquent la chaux des ciments. Parmi ces eaux, figurent notamment :
 - les eaux industrielles,
 - les eaux contenant du gaz carbonique dissous,
 - les eaux contenant des acides humiques (eaux des tourbières, etc.),
- les eaux à haute teneur en sulfates qui se combinent à l'aluminate tricalcique du ciment pour former le sel de Candlot qui désorganise le mortier en gonflant. Parmi ces eaux figurent :
 - les eaux séléniteuses, contenant une forte teneur en sulfate de chaux dissous,
 - les eaux magnésiennes, contenant une forte teneur en sulfate de magnésie.

COMMENTAIRE

Bien que les conditions d'agressivité diffèrent suivant que la nappe d'eaux séléniteuses est ou non en mouvement, on considère généralement que ces

eaux sont très agressives dès que leur teneur en anhydride sulfurique SO_3 , dépasse :

- 0,2 g/l pour les eaux renouvelées,
- 0,5 g/l pour les eaux stagnantes.

On considère généralement que les eaux magnésiennes sont très agressives dès que leur teneur en anhydride sulfurique SO_3 dépasse :

- 0,1 g/l pour les eaux renouvelées,
- 0,25 g/l pour les eaux stagnantes.

Toutes les fois que le terrain et les eaux qui le baignent éventuellement peuvent être considérés comme douteux, il convient d'en faire effectuer une analyse et de consulter un laboratoire spécialisé, ainsi que le fabricant de ciment.

2. Choix du ciment

Les ciments courants sont conformes à la norme NF P 15-301.

Ceux présentant des caractéristiques complémentaires sont (au sens de l'article 8 de la norme) :

- pour les travaux au voisinage ou en bordure de mer, les « ciments pour travaux à la mer » (PM) NF P 15-317.
- dans le cas d'eaux à haute teneur en sulfates, les « ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates » (ES) P 15-319.

COMMENTAIRE

Pour ces deux catégories, les ciments présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfates (en présence ou non d'ions chlorures) au cours de la prise et ultérieurement.

- pour les eaux très pures et les eaux légèrement acides, les ciments qui conviennent sont ceux qui sont pauvres en chaux libre ou qui sont susceptibles de fixer la chaux mise en liberté.

Ce sont entre autres les ciments pouzzolaniques (CPZ) et les ciments de hauts fourneaux (CLK, CHF).

- en présence d'eaux industrielles, ou en atmosphère agressive, chaque problème doit être examiné spécialement.

3.212. Terrains moyennement agressifs

1. Nomenclature des terrains moyennement agressifs

Sont considérés comme moyennement agressifs :

- les terrains situés en ambiance modérément agressive,
- les terrains baignés par une nappe d'eaux moyennement agressives.

Parmi les eaux moyennement agressives, celles que l'on rencontre le plus couramment sont les eaux à teneur modérée en sulfates.

COMMENTAIRE

On considère généralement qu'une eau séléniteuse est moyennement agressive lorsque sa teneur en anhydride sulfurique est inférieure aux valeurs indiquées à l'article 3.211.1 (ci-avant).

En ce qui concerne les teneurs au-dessous desquelles une eau contenant des sulfates peut être considérée comme non agressive, il est impossible de fixer des valeurs précises, de nombreux facteurs intervenant dans le processus d'attaque du ciment. Toutefois, il est généralement admis que ce seuil se situe entre le tiers et la moitié des valeurs indiquées à l'article 3.211.1 (ci-avant).

En cas de doute sur l'agressivité d'une eau, il est prudent de consulter un laboratoire spécialisé, ainsi que le fabricant de ciment.

2. Choix du ciment

Les ciments qui résistent à l'action des eaux à teneur modérée en sulfates sont ceux qui sont classés « ciments pour travaux à la mer » (PM) NF P 15-317.

3.213. Terrains peu agressifs

1. Nomenclature des terrains peu agressifs

Sont considérés comme peu agressifs les terrains qui, situés en ambiance peu agressive, sont baignés par une nappe d'eau peu agressive ou qui, en l'absence de nappe, ne contiennent pas d'éléments agressifs.

2. Choix du ciment

La plupart des ciments actuellement fabriqués peuvent être utilisés dans ce cas.

3.22. Choix du ciment en fonction de son agressivité vis-à-vis des armatures

3.220. Cas où l'armature du tirant est constituée par des aciers de précontrainte

Afin d'éviter la corrosion sous tension des armatures du tirant par les agents agressifs contenus dans le ciment, ce dernier doit avoir des teneurs en chlore total (provenant des chlorures et des chloroaluminates) et en soufre (provenant des sulfures) au plus égales aux valeurs ci-après :

- chlore total.....0,05 % du poids du ciment,
- soufre des sulfures.....0,15 % du poids du ciment.

COMMENTAIRE

Les valeurs ci-dessus sont données à titre transitoire et pourront être modifiées en fonction de la réglementation ultérieure.

3.221. Cas où l'armature est constituée par des aciers pour béton armé

Tous les ciments actuels conviennent.

3.222. Cas où l'armature est constituée par un matériau composite non métallique

Il est indispensable de vérifier dans chaque cas la compatibilité entre le matériau de scellement et celui de l'armature.

COMMENTAIRE

Par exemple, dans le cas d'un matériau composite à base de fibres de verre, on choisira, de façon à éviter tout phénomène d'alcali-réaction, soit un ciment de scellement non alcalin, soit un verre spécial inerte en milieu alcalin.

3.23. Récapitulation du choix du ciment en fonction des deux critères précédents

Quand la protection de l'armature est réalisée à partir de produits à base de ciment, il convient d'utiliser un ciment de même nature et de même provenance pour le scellement au terrain et pour l'injection de protection, en raison des risques d'effet de pile sur les armatures.

COMMENTAIRE

Ce cas n'est pas fréquent actuellement et ne correspond plus guère qu'aux protections à l'aide de mélanges bentonite-ciment. Si tel était le cas, il conviendrait d'utiliser des ciments répondant à la fois aux spécifications des articles 3.22 (ci-avant) d'une part, et, selon le cas, 3.211.2, p. 20 ou 3.212.2, p. 21 ou 3.213.2, p. 22 d'autre part.

Toutefois, lorsqu'il existe une gaine continue et étanche, fermée à la partie inférieure, isolant sur toute la longueur (partie scellée et partie libre) l'armature du terrain environnant, on peut utiliser deux ciments différents :

- pour le scellement au terrain : un ciment choisi, en fonction de l'agressivité du terrain, parmi ceux qui répondent aux spécifications d'un des articles 3.211.2, p. 20, 3.212.2, p. 21 ou 3.213.2, p. 22, selon le cas.
- pour le scellement de l'armature dans sa gaine et pour l'injection de protection : un ciment répondant aux spécifications de l'article 3.220 ou 3.221 (ci-avant), selon le cas.

3.24. Additifs et adjuvants

Les additifs utilisés doivent être conformes à la norme NF P 18-103.

COMMENTAIRE

L'emploi du chlorure de calcium est interdit.

3.3. RÉSINES DE SCELLEMENT ET DE PROTECTION CONTRE LA CORROSION

3.31. Résines de scellement

Les résines utilisées doivent conserver dans le temps l'intégralité de leurs caractéristiques mécaniques.

Elles ne doivent pas donner lieu à une fissuration dans leur masse.

3.32. Résines de protection contre la corrosion

Leurs caractéristiques sont indiquées au chapitre 4 (p. 25).

CHAPITRE 4

PROTECTION DES TIRANTS CONTRE LA CORROSION

4.0. GÉNÉRALITÉS

4.01. Généralités sur les armatures des tirants

En plus des autres paramètres énumérés à l'article 4.1 ci-après, le risque de corrosion de l'armature du tirant varie fortement avec les caractéristiques physiques et les contraintes en service de cette armature.

Étant donné le stade actuel de développement des armatures non métalliques, le problème général de leur protection éventuelle contre la corrosion ne sera pas abordé, leur pérennité effective sous tension du fait que ces armatures peuvent être exposées à des environnements potentiellement agressifs différents de ceux qui sont considérés comme agressifs pour l'acier devra être étudiée cas par cas.

Dans le cas général des armatures métalliques, il est nécessaire de faire une distinction entre les divers types d'aciers utilisables.

L'armature des tirants peut être constituée (voir article 3.110, p. 15) :

- par des aciers ordinaires,
- par des aciers pour armatures de précontrainte.

COMMENTAIRE

Parmi les aciers ordinaires figurent entre autres :

- les ronds à béton,
- certains profilés du commerce.

Par extension, on désigne sous le même vocable certains aciers ayant des caractéristiques physiques et mécaniques voisines des précédents, mais contenant en outre, en faible quantité, des métaux alliés destinés à améliorer leur résistance à la corrosion.

4.02. Aciers ordinaires

Ces aciers, qu'ils soient constitués par des ronds à béton ou par des profilés du commerce, sont en général soumis à des contraintes de service suffisamment faibles pour exclure tout risque de corrosion sous tension.

Quand ces aciers sont en contact direct avec le sol, il suffit, en général, pour leur permettre d'assumer leur rôle pendant toute la durée de vie du tirant :

- de choisir des barres de section surabondante (voir article 3.111.2, p. 16),
- de les revêtir d'une peinture bitumineuse épaisse ou, dans les cas d'ambiances agressives (voir article 4.12, p. 28), d'une peinture anti-corrosion.

Il est indispensable d'utiliser, dans le corps d'un même tirant, des aciers de même composition pour éviter les effets de pile.

4.03. Aciers pour armatures de précontrainte

Ces aciers sont soumis à des contraintes élevées et permanentes. Il en résulte, en l'absence de protection efficace, des risques de corrosion sous tension, contre lesquels une simple augmentation de la section unitaire des armatures ne constitue pas une précaution.

Les protections à prévoir sont déterminées en fonction des articles 4.1, 4.2 et 4.3 ci-après.

Les prescriptions de ces trois articles s'appliquent exclusivement aux tirants précontraints.

4.04. Nomenclature des protections à prévoir pour les diverses parties du tirant

La protection du tirant contre la corrosion comporte obligatoirement :

- la protection de la partie scellée au terrain, qui fait l'objet de l'article 4.5 (p. 38),
- la protection de la partie libre, qui fait l'objet des articles 4.2 (p. 29), 4.3 (p. 31) et 4.4 (p. 35),
- la protection de la tête d'ancrage, qui fait l'objet de l'article 4.6 (p. 41).

4.1. PARAMÈTRES INFLUANT SUR L'IMPORTANCE DE LA PROTECTION DES TIRANTS PRÉCONTRAINS

L'importance de la protection est déterminée en fonction de deux paramètres :

- la durée de l'utilisation du tirant,
- la nature du terrain qui l'enrobe ou, d'une façon plus générale, le milieu ambiant.

4.11. Durée d'utilisation

En fonction de leur durée d'utilisation, les tirants sont classés en trois catégories :

- tirants provisoires devant servir neuf mois au plus ;
- tirants provisoires devant jouer leur rôle pendant dix-huit mois au plus ;
- tirants provisoires devant servir pendant plus de dix-huit mois et tirants permanents.

La durée d'utilisation est comptée à partir de la mise en tension. Elle doit être indiquée dans les pièces contractuelles.

COMMENTAIRE

Dans le cas où il y a, *a priori*, de sérieuses raisons de penser que la durée d'utilisation indiquée par les pièces contractuelles risque d'être dépassée, il convient de se reporter aux indications de l'article 4.313 ci-après.

4.12. Nature du milieu ambiant

Comme pour le scellement de l'ancrage au terrain (article 3.210, p. 18), il est défini par trois catégories :

- les ambiances peu agressives,
- les ambiances moyennement agressives,
- les ambiances très agressives.

Toutefois, comme les agents qui provoquent la corrosion des armatures du tirant peuvent être différents de ceux qui conduisent à la décomposition du coulis de scellement, la classification ci-après n'est pas identique à celle qui figure à l'article 3.210, p. 18.

Ambiances peu agressives

Pour être considérée comme peu agressive, une ambiance doit répondre à la fois aux deux critères ci-après :

- le site est en atmosphère peu agressive,
- le terrain est :
 - soit baigné par une nappe peu agressive dont le niveau varie peu,
 - soit, en l'absence de nappe, exempt d'éléments agressifs (par exemple produits chimiques).

Ambiances moyennement agressives

Une ambiance est considérée comme moyennement agressive si elle correspond à l'un des trois cas ci-après :

- le site est en atmosphère modérément agressive,
- le terrain est baigné par une nappe dont les eaux ont un pH acide,
- le terrain est baigné par une nappe d'eau douce dont le renouvellement est rapide ou dont le niveau varie rapidement.

Ambiances très agressives

Une ambiance est considérée comme très agressive si elle correspond à l'un des quatre cas ci-après :

- le site est en atmosphère très agressive,

- le terrain est au voisinage ou en bordure de la mer,
- le terrain est situé au voisinage d'usines de produits chimiques corrosifs,
- le terrain est baigné par une nappe très agressive.

4.2. GÉNÉRALITÉS SUR LA PROTECTION CONTRE LA CORROSION DE LA PARTIE LIBRE DES TIRANTS PRÉCONTRAINS

4.20. Classification des protections

4.200. Classification suivant la date de mise en place

Suivant la date de leur mise en place par rapport à la mise en tension, les protections sont classées en deux types :

1. Protections antérieures à la mise en tension

Celles-ci peuvent être réalisées en usine ou sur le chantier.

11. Protections réalisées en usine

Ces protections, effectuées en usine avant la livraison sur le chantier, sont conçues pour continuer à assumer leur rôle après la mise en tension.

À cette catégorie appartiennent notamment les torons gainés graissés ou cirés, qui font l'objet de l'article 4.431.2 (p. 31).

COMMENTAIRE

Certains fabricants proposent également, pour les armatures des tirants précontraints, des protections par galvanisation ou par peinture, mais celles-ci ne sont pas admises par le présent document (voir ci-après article 4.322.3, p. 31).

12. Protections réalisées sur le chantier

Leur rôle est double :

- empêcher la corrosion du tirant pendant le laps de temps qui s'écoule entre sa mise en place dans le sol et sa mise en tension (ou sa der-

nière mise en tension dans le cas de mises en tension échelonnées dans le temps),

- continuer à assumer son rôle après la mise en tension et devenir, de ce fait, la protection permanente du tirant.

À cette catégorie de protection appartiennent les protections de l'armature par enrobage à l'aide de produits souples. Elles sont décrites aux articles 4.42 (p. 35) et 4.43 (p. 37).

COMMENTAIRE

Certains préconisent également, pour cet usage, les protections cathodiques, mais celles-ci ne sont pas admises par le présent document (voir ci-après article 4.322.21, p. 33).

2. Protections postérieures à la mise en tension

Elles ont pour but d'empêcher la corrosion sous tension du tirant pendant toute sa durée d'utilisation.

Appartiennent notamment à cette catégorie les protections de l'armature par enrobage à l'aide de produits souples, et, éventuellement, pour les tirants provisoires, à l'aide de produits rigides.

COMMENTAIRES

1. Voir l'article 4.322.1 (p. 33) en ce qui concerne les protections rigides.
2. Certains préconisent également, pour cet usage, les protections cathodiques, mais celles-ci ne sont pas admises par le présent document (voir ci-après article 4.322.21, p. 33).

4.201. Classification selon le degré et la durabilité de protection apportée

Les protections sont rangées en trois classes, désignées, par ordre de durabilité croissante, par les symboles P0, P1 et P2.

La définition de ces trois classes figure aux articles 4.21, 4.22 et 4.23 (p. 31).

Les critères auxquels elles doivent satisfaire sont mentionnés à l'article 4.4 (p. 35).

4.21. Définition de la classe P0

La classe P0 ne comporte aucune protection particulière.

COMMENTAIRE

Toutefois, l'armature est isolée du terrain par sa gaine.

4.22. Définition de la classe P1

La protection P1, qui peut être réalisée, suivant la nature du produit utilisé et les exigences résultant de l'agressivité du milieu ambiant, avant ou après la mise en tension, est assurée par le remplissage continu de l'espace annulaire dans une gaine étanche, à l'aide d'un produit répondant aux critères de l'article 4.421, ci-dessus.

4.23. Définition de la classe P2

La protection P2, qui peut être réalisée, suivant la nature du produit utilisé et les exigences résultant de l'agressivité du milieu ambiant, avant ou après la mise en tension, correspond à une protection continue de l'armature du tirant, avec des produits répondant aux spécifications de l'article 4.431, ci-dessus.

4.3. CHOIX DE LA PROTECTION À PRÉVOIR POUR LA PARTIE LIBRE

4.31. Choix de la classe de protection

4.310. En fonction des paramètres définis à l'article 4.1 (p. 27), la protection imposée à la partie libre des tirants est précisée dans le tableau ci-dessous :

Nature de l'ambiance	Durée d'utilisation du tirant		
	Moins de 9 mois	9 à 18 mois	Plus de 18 mois
Non agressive	P0	P1	P2
Moyennement agressive	P1	P2	P2
Très agressive	P2	P2	P2

4.311. Il appartient au Cahier des clauses particulières de fixer la classe de la protection à prévoir ou, à défaut, d'indiquer la nature du milieu ambiant (caractéristiques du terrain, niveau de la nappe, analyse des eaux de la nappe, etc.).

4.312. Si aucune indication ne figure dans les pièces contractuelles, l'entrepreneur doit préciser la qualité de la protection proposée et indiquer ses conditions de validité en fonction du tableau ci-dessus. Cette proposition doit obtenir l'accord du maître d'œuvre.

4.313. Pour la détermination de la protection en fonction de la durée d'utilisation du tirant, l'attention est attirée sur les deux points suivants :

1. Aucune dérogation n'est admise pour le dépassement de la durée d'utilisation de neuf mois ; en revanche, il est possible, sur justification, d'accorder une prolongation n'excédant pas deux mois sur la durée prévue de dix-huit mois.

2. Étant donné qu'il n'est pas admissible de venir injecter après coup un tirant non protégé (P0) dont la durée d'utilisation serait supérieure à celle qui était initialement prévue, le maître d'œuvre doit tenir compte des aléas possibles dans l'exécution du planning et déterminer la classe de protection en conséquence.

COMMENTAIRE

Cette dernière prescription concerne surtout les tirants provisoires devant servir neuf mois au plus ; s'il y a, dès le départ du chantier, de fortes probabilités pour que cette durée d'utilisation soit dépassée, le maître d'œuvre doit, même quand les travaux ont lieu en milieu peu agressif, prévoir une protection supérieure à celle qui était initialement envisagée.

4.32. Choix de la nature de la protection

4.320. Tous les tirants qui assument la même fonction dans la stabilité d'un ouvrage doivent recevoir une protection de même nature.

COMMENTAIRE

Par exemple, la protection doit être la même pour les tirants devant être soumis aux essais de contrôle (article 6.3, p. 102) que pour les autres tirants de la même opération.

4.321. Suivant la classe de protection requise, les protections doivent être choisies parmi celles qui figurent à l'article 4.4 (p. 35).

L'article 4.322 ci-après mentionne les protections non admises par les présentes recommandations.

4.322. Protections non admises

1. Les protections rigides

Les protections rigides (par exemple : coulis de ciment ou bentonite-ciment) ne sont pas admises pour les catégories de tirants ci-après :

- tirants situés en zone sismique,
- tirants visés à l'article 7.230 (p. 106),
- tirants susceptibles d'être remis en tension.

2. Les protections cathodiques

21. Protections cathodiques de l'armature du tirant

Dans l'état actuel de nos connaissances, la protection cathodique de l'armature du tirant contre la corrosion ne paraît pas constituer une solution de protection fiable.

COMMENTAIRE

La constatation précédente concerne aussi bien les protections cathodiques par anode soluble que celles par courant imposé. Ce dernier procédé peut même être dangereux, par suite du risque de fragilisation de l'armature par l'hydrogène de polarisation cathodique.

22. Influence d'une protection cathodique extérieure

Si l'ouvrage ancré par tirants est lui-même protégé cathodiquement (par exemple : rideau de palplanches), la partie tendue des tirants doit être isolée électriquement du sol.

3. Les protections des armatures par galvanisation ou par peinture

La protection de l'armature du tirant par galvanisation ou par peinture n'est pas admise.

COMMENTAIRE

Il est impossible de garantir l'intégrité de cette protection lors de la mise en œuvre sur chantier.

4.33. Choix entre la protection antérieure et la protection postérieure

4.330. Cas où une protection antérieure à la mise en tension est nécessaire

Indépendamment des considérations économiques ou autres, qui peuvent amener à choisir la protection antérieure à la mise en tension, celle-ci est obligatoire dans les cas ci-après :

- en ambiance agressive, chaque fois que la mise en tension du tirant ne suit pas immédiatement sa mise en place dans le sol (voir article 4.710, p. 46),
- dans les ambiances autres que les ambiances agressives, chaque fois que les délais mentionnés à l'article 4.711 (p. 46) ne peuvent être respectés.

COMMENTAIRE

Cette prescription ne s'applique évidemment pas à la classe P0.

4.331. Par dérogation à l'article 4.330 (ci-dessus), si les travaux ont lieu en atmosphère non agressive, mais en terrain agressif, la protection antérieure n'est pas obligatoire si toutes dispositions ont été prises pour éviter que le tirant ne soit mis en contact avec le milieu ambiant : en particulier, il convient de s'assurer de l'étanchéité non seulement de la gaine, mais encore de son raccordement avec l'ouvrage.

COMMENTAIRE

Les gaines agrafées (par exemple en clinquant) ne sont pas considérées comme étanches.

4.4. CRITÈRES DE QUALITÉ AUXQUELS DOIVENT SATISFAIRE LES PROTECTIONS DE LA PARTIE LIBRE

4.41. Conditions générales

La notice technique descriptive du procédé doit nommément désigner les produits de protection que l'entreprise envisage d'utiliser. Suivant la classe de protection requise, ces produits doivent répondre aux spécifications des articles 4.421 (p. 36) et 4.431 (p. 37).

4.42. 1^{er} cas : la protection à assurer est de la classe P1

4.420. Nature des produits utilisables

Les produits utilisables pour assurer une protection de la classe P1 appartiennent, dans l'état actuel de nos connaissances, à l'une des catégories ci-après :

- les graisses anticorrosives et les cires pétrolières, utilisées avec une gaine de protection simplement enfilée,
- les bitumes,
- les ciments ou mélanges bentonite-ciment.

COMMENTAIRE

Il est parfois proposé également, pour cet usage, certains revêtements adhérents par peinture ou par galvanisation, mais il est rappelé que ceux-ci ne sont pas admis par les présentes recommandations (article 4.322.3, p. 33).

Tous ces produits ne sont admis que si :

- leur composition satisfait aux conditions énoncées à l'article 4.421 ci-après,

- pour certains d'entre eux, des précautions sont prises lors de leur mise en œuvre (voir article 4.721, p. 47).

4.421. Spécifications particulières aux produits utilisables

1. Produits non ioniques

11. Graisses anticorrosives et cires pétrolières

Les graisses et cires doivent avoir une composition conforme aux spécifications de la Commission interministérielle de la précontrainte.

12. Bitumes

Les bitumes doivent avoir une teneur en soufre total ne dépassant pas 0,5 % en poids.

COMMENTAIRE

1. Il n'est pas possible actuellement de mesurer la teneur en soufre des seuls sulfures.
2. La mesure du soufre total peut être effectuée, par exemple, par la méthode de Schöninger.

Les bitumes dont la température de fluidification est supérieure à 110°C ne sont pas admis.

2. Produits ioniques

Les produits ioniques doivent satisfaire aux deux conditions ci-après :

- être basiques, avec un pH compris entre 9 et 12 ; un contrôle préalable du pH doit être effectué,
- ne contenir que des teneurs acceptables en chlorures et sulfures. En ce qui concerne les ciments, seuls sont utilisables ceux dont la composition chimique satisfait aux conditions de l'article 3.220 (p. 22), et dont le choix est effectué conformément à l'article 3.23 (p. 23).

COMMENTAIRE

Sous réserve de prendre, lors de la mise en œuvre, les précautions mentionnées à l'article 4.721.1 (p. 47), certains mélanges bentonite-ciment sont susceptibles de satisfaire aux deux conditions précédentes.

4.43. 2^e cas : la protection à assurer est de la classe P2

4.430. Nature des produits ou procédés utilisables

Dans l'état actuel de nos connaissances, une protection de la classe P2 peut être obtenue à l'aide des produits ou procédés ci-après :

- certaines résines souples,
- les graisses anticorrosives,
- les cires pétrolières,
- les torons gainés graissés ou cirés,
- sauf pour les tirants visés à l'article 4.322 (p. 33), des coulis de ciment sous réserve que ces produits ou procédés répondent aux spécifications de l'article 4.431 ci-après.

4.431. Spécifications concernant les produits ou procédés

1. Les résines

Les résines doivent :

- avoir une capacité d'élongation suffisante pour pouvoir subir sans désordres la mise en tension, ainsi que les mouvements relatifs éventuels susceptibles de se produire, au cours de la vie de l'ouvrage, sur la longueur du tirant,
- assurer et maintenir une étanchéité parfaite,
- assurer, sans solution de continuité, le contact avec l'acier,
- ne pas se fissurer par retrait et être insensibles à la dessiccation,
- être stables dans le temps,
- ne contenir ni ajout ni impureté susceptibles de provoquer la corrosion du tirant.

En outre, lorsqu'elles sont utilisées en protection antérieure, elles doivent pouvoir supporter sans dommages les opérations de mise en place.

Dans le cas où ces résines contiennent des impuretés de soufre, la teneur en soufre ne doit pas dépasser 0,5 % en poids de l'ensemble.

COMMENTAIRE

Les commentaires de l'article 4.421.12 (p. 36) s'appliquent.

Les emballages des composants du mélange doivent porter une étiquette indiquant la date limite d'utilisation.

2. Les torons gainés graissés ou cirés

Seuls sont utilisables les torons gainés graissés ou cirés ayant fait l'objet d'un agrément de la Commission interministérielle de la précontrainte.

3. Les coulis de ciment (protection rigide)

31. Il est rappelé que les protections rigides de la classe P2 ne sont pas admises pour les catégories de tirants visées à l'article 4.322.1 (p. 33).

32. Les coulis envisagés pour la protection P2 sont des coulis de ciment additionné de plastifiant et éventuellement d'adjuvants expansifs.

Les ciments utilisés doivent avoir des teneurs en chlorures et sulfures inférieures aux valeurs mentionnées à l'article 3.220 (p. 22), et le choix du ciment doit être conforme aux spécifications de l'articles 3.23 (p. 23).

**4.5. PROTECTION DE LA PARTIE SCELLÉE
DES TIRANTS D'ANCRAGE****4.50. Énoncé des exigences**

4.500. La partie scellée d'un tirant d'ancrage exige le même degré de protection que la partie libre.

4.501. La protection de la partie scellée doit tenir compte des deux éléments fondamentaux suivants :

- dans le cas de sols meubles, lors de la mise en tension, des fissures fines affectent le coulis de scellement à intervalles plus ou moins réguliers,
- les dispositifs et produits de protection utilisés doivent permettre la transmission au terrain des efforts très élevés imposés par l'armature.

4.502. En l'état actuel des connaissances, les seuls produits utilisables permettant d'assurer, sous certaines conditions, la double fonction de scellement et de protection contre la corrosion sont :

- les ciments pour autant que leur composition chimique satisfasse aux conditions des articles 3.21 (p. 18), 3.22 (p. 22), et 3.23 (p. 23),
- les résines pour autant qu'elles satisfassent aux conditions de l'article 3.31 (p. 24).

4.51. Protection de la classe P1

La faible épaisseur des fissures affectant le scellement, conjuguée au pH élevé régnant au voisinage immédiat de l'armature, permet de considérer la protection assurée par le seul coulis de scellement comme suffisante, pour autant que les modalités suivantes de mise en œuvre soient respectées :

- mise en place de l'armature du tirant, équipée de centreurs, dans un forage rempli au préalable de coulis de ciment sur la hauteur du scellement, de façon à garantir la continuité de l'enrobage,
- injection du scellement sous haute pression (supérieure à 1 MPa).

COMMENTAIRE

Dans le cas particulier de terrains très ouverts, comme certains éboulis de pente, il est parfois impossible de réaliser effectivement un tel remplissage préalable. On pourra alors : soit procéder à une préinjection du terrain encaissant le forage sur la hauteur du scellement, soit adopter un système permettant de contenir le produit de scellement autour de l'armature et d'assurer l'ancrage au tirant.

4.52. Protection de la classe P2

4.520. La protection de la classe P2 exige la présence, sur toute la hauteur du scellement, d'une gaine continue.

COMMENTAIRE

Le rôle de cette gaine est de s'opposer à toute communication entre l'armature et le terrain environnant à travers le coulis de scellement, à la faveur de la fissuration fine induite par la mise en tension.

4.521. Les manchettes ou clapets équipant éventuellement la gaine pour permettre la réalisation de l'injection de scellement doivent être conçus de façon à assurer le rétablissement de la continuité de cette dernière dans sa fonction de barrière vis-à-vis des fissurations.

4.522. Le remplissage de l'espace annulaire entre la gaine et l'armature, c'est-à-dire le scellement de l'armature dans la gaine, peut être réalisé :

- soit au préalable en atelier ou même sur un chantier équipé,
- soit dans une opération unique au moment du scellement de l'armature au terrain,
- soit après scellement de la gaine au terrain.

4.523. Caractéristiques de la gaine

La gaine peut être soit souple, soit rigide.

1. Gaine souple

La gaine souple doit présenter des ondulations de hauteur et de fréquence suffisantes pour permettre la transmission des efforts au terrain environnant par le coulis de scellement.

Les matériaux utilisés doivent être physiquement et chimiquement stables sous contrainte, imperméables et non fragiles.

COMMENTAIRE

Le polyéthylène, le polypropylène et le PVC haute densité sont les matériaux le plus couramment utilisés.

2. Gaine rigide

La gaine métallique dans un acier de caractéristiques compatibles avec les armatures de façon à ne pas provoquer d'effet de pile est, dans l'état actuel des connaissances, le plus couramment utilisée. L'emploi de gaine agrafée (du type clinquant) n'est pas autorisé.

4.6. PROTECTION DE LA TÊTE D'ANCRAGE ET DE LA ZONE DE RACCORDEMENT DU TIRANT À L'OUVRAGE

4.60. Généralités

Le raccordement à l'ouvrage constitue la zone la plus critique dans la protection d'un tirant contre la corrosion. Les armatures et organes de tête doivent y être efficacement isolés de l'influence de l'environnement extérieur en tenant compte de la possibilité d'éventuels déplacements, bien que d'amplitude, en général faible, pouvant se produire pendant la vie de la structure.

Les dispositions adoptées doivent pouvoir assurer une parfaite continuité avec la protection choisie pour la partie libre.

Elles sont, dans leur principe, identiques pour les protections des classes P1 et P2.

4.61. Principes de protection de la zone de raccordement communs aux classes P1 et P2

Le dispositif de protection comporte fondamentalement :

- un tube trompette solidaire de la plaque d'appui de façon rigoureusement étanche et coiffant la gaine extérieure du tirant sur une longueur minimale de 0,30 m (fig. 4.01, 4.02, et 4.03., ci-après),
- un capot fixé solidement et de façon rigoureusement étanche sur la plaque d'appui,
- un remplissage continu du volume intérieur défini par le tube trompette et le capot, soit au moyen d'un produit satisfaisant aux conditions des articles 4.42 (p. 35) et 4.43 (p. 37) respectivement, soit au moyen d'un produit conforme aux spécifications de la Commission interministérielle de la précontrainte.

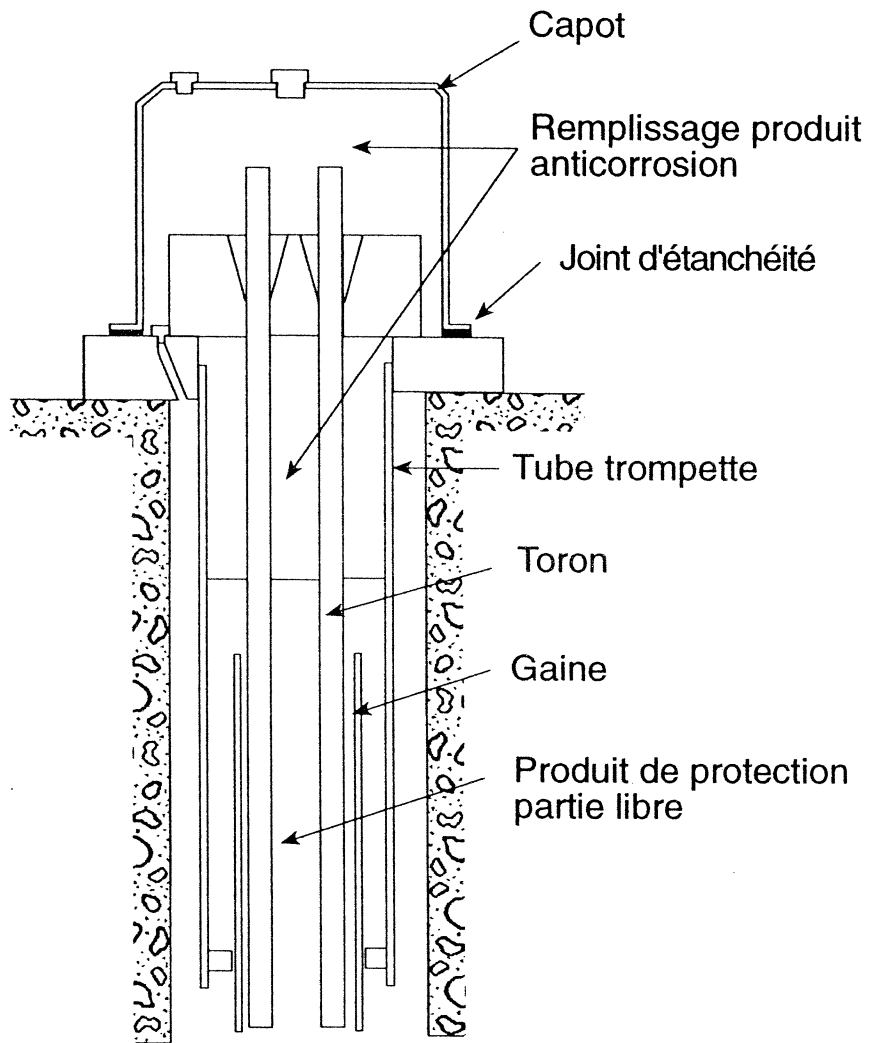


Fig. 4.01. — Schéma de principe de la protection de la classe P1

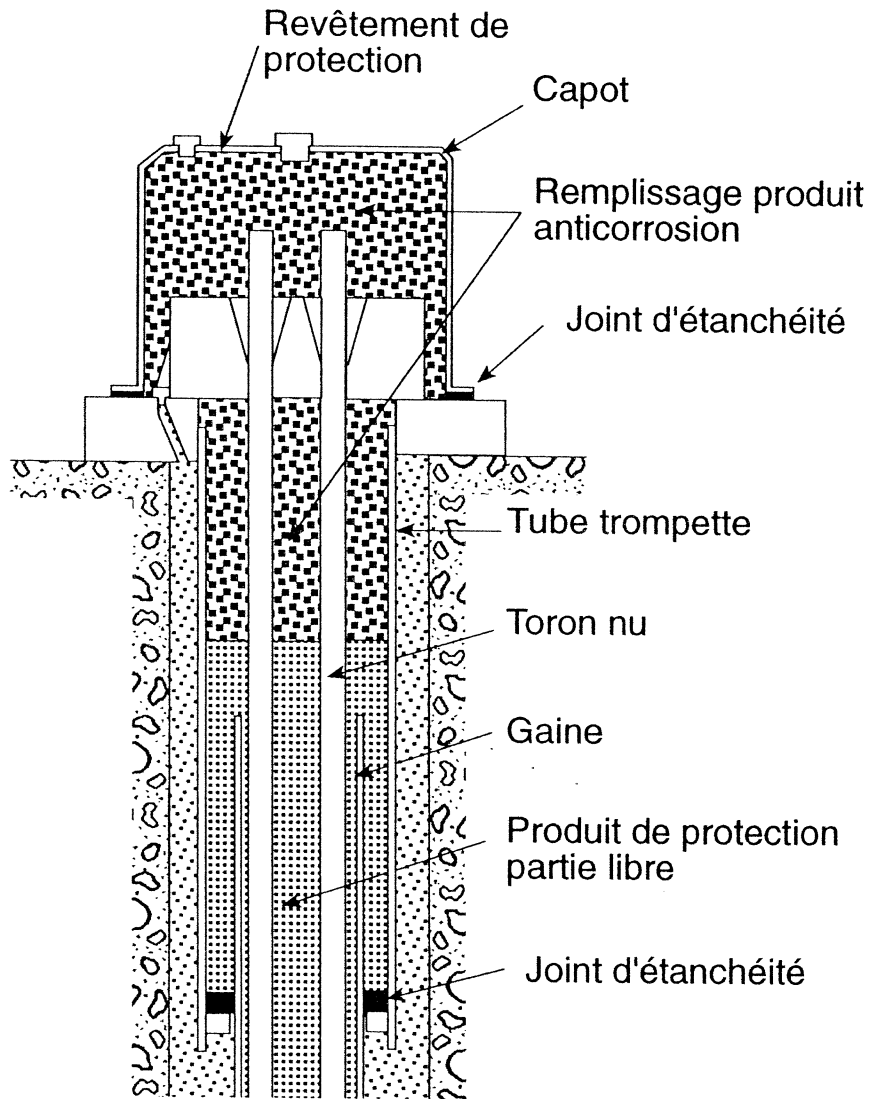
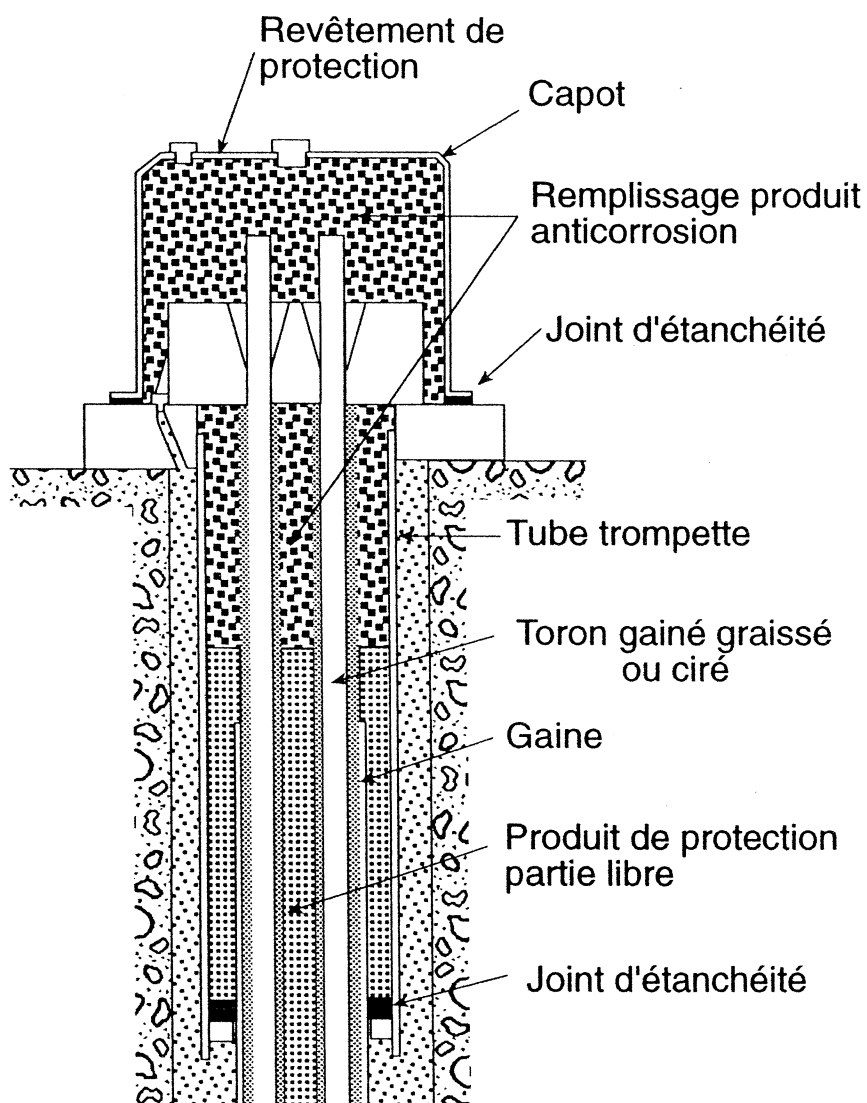


Fig. 4.02. — Schéma de principe de la protection de la classe P2
Cas des torons nus



*Fig. 4.03. — Schéma de principe de la protection de la classe P2
Cas des torons gainés graissés ou cirés*

4.62. Dispositions particulières supplémentaires pour une protection de la classe P2

Pour une protection de la classe P2 :

- la liaison par recouvrement entre le tube trompette et la gaine doit être complétée par la mise en place d'un joint d'étanchéité ou de tout autre dispositif équivalent de façon à interdire toute fuite du produit de remplissage ou toute entrée d'eau en provenance de l'extérieur quels que soient les mouvements relatifs éventuels (fig. 4.02 et 4.03 ci-avant).

COMMENTAIRE

Un joint du type soufflet raccordant de façon effective et étanche le tube trompette à la gaine constitue le dispositif de liaison apportant les meilleures garanties.

- La protection de la surface extérieure du tube trompette, de la plaque d'appui et du capot doit être assurée contre toute corrosion éventuelle extérieure par un moyen approprié.

COMMENTAIRE

Tous les produits anticorrosion compatibles du point de vue chimique ou électrochimique avec les aciers de précontrainte peuvent être utilisés (peintures, revêtements, etc.). Le cachetage ou l'enrobage au coulis, mortier ou béton de ciment ou de résine peut être également utilisé pour la trompette et, chaque fois que la vérification directe de la traction du tirant par essai de décollement n'est pas envisagée comme méthode de contrôle, pour la plaque d'appui et le capot.

- Le remplissage du tube trompette et du capot doit être conduit de façon à garantir l'enrobage des organes d'accrochage de l'armature dans la tête d'ancrage.

4.7. MISE EN ŒUVRE DE LA PROTECTION

4.71. Délais de mise en œuvre de la protection

4.710. Lorsque les travaux sont effectués en ambiance agressive, la réalisation de la protection doit, soit précéder, soit suivre immédiatement la mise en place du tirant dans le sol.

COMMENTAIRE

Cela signifie qu'en ambiance agressive, il doit être prévu une protection antérieure à la mise en tension du tirant, et qu'à défaut d'utiliser des tirants préprotégés en usine, cette protection doit être exécutée immédiatement après la mise en place du tirant dans le sol.

4.711. Pour les protections P1 et P2 en ambiance non agressive, les délais de mise en œuvre de la protection ne doivent pas dépasser les valeurs ci-après :

1. un mois après la mise en place du tirant dans le sol,
2. quinze jours après sa mise en tension, sauf s'il existe une protection antérieure.

COMMENTAIRES

1. Il est rappelé (article 4.330, p. 34) qu'en cas d'impossibilité de satisfaire aux prescriptions de l'article 4.711.1 (ci-dessus) une protection antérieure est obligatoire.
2. En cas de mises en tension échelonnées, le délai de quinze jours court à partir de la première mise en tension partielle ; cette condition impose en général une protection mise en œuvre avant ou juste après la première mise en tension.

4.72. Conditions de mise en œuvre

4.720. Généralités

1. Chaque système de tirant doit, ainsi qu'il a été mentionné précédemment, faire l'objet d'une notice technique illustrée qui sera remise au

maître d'œuvre. Cette notice doit obligatoirement indiquer la composition et la mise en œuvre de la protection, et en particulier :

- les dispositions envisagées,
- le mode opératoire,
- les produits utilisés pour la protection.

2. La protection doit être réalisée de telle façon qu'elle ne comporte aucune solution de continuité d'une extrémité du tirant à l'autre.

En particulier, lorsque la protection est assurée par des produits injectés, ceux-ci doivent l'être à partir de l'extrémité la plus basse, avec un évent à l'extrémité opposée, avec une montée en pression finale. Ce mode d'injection est appelé « injection en source ».

3. Les prescriptions ci-après sont de caractère général, puisque des spécifications plus précises doivent figurer dans la notice technique de chaque procédé.

4. Il est rappelé que, dans le cas d'utilisation de produits de protection basiques, un contrôle préalable du pH doit être effectué, de façon à s'assurer que celui-ci est bien compris entre 9 et 12.

4.721. Mise en œuvre des produits à base de bentonite-ciment

1. Afin d'éviter la dessiccation, toutes précautions doivent être prises pour assurer l'étanchéité de la gaine et du capot de protection de la tête d'ancrage.

2. Le mélange bentonite-ciment nécessite, pour obtenir un produit parfaitement homogène, l'emploi de malaxeur à haute turbulence.

4.722. Mise en œuvre des résines

Les résines étant obtenues à partir d'un mélange de plusieurs composants et les performances étant fonction à la fois de la qualité des composants et des proportions de leur mélange, il convient d'observer les prescriptions ci-après :

1. Tout composant dont la date de péremption est dépassée doit être éliminé.
2. Les proportions du mélange indiquées par le fabricant doivent être rigoureusement respectées.

COMMENTAIRE

On peut recommander l'utilisation de produits prédosés.

3. Le mélange doit être homogénéisé à l'aide d'un agitateur mécanique – et non manuellement – pendant un temps défini par le fournisseur.
4. Après confection du mélange, celui-ci doit être injecté immédiatement.
5. Compte tenu du fait que la viscosité des résines varie avec la température ambiante, il conviendra de respecter scrupuleusement les conditions de mise en œuvre stipulées dans la fiche technique.

4.723. Mise en œuvre des torons gainés graissés ou cirés

Dans le cas où il doit assurer une protection de la classe P2, le faisceau gainé doit être placé à l'intérieur d'une gaine complémentaire, l'espace subsistant entre la gaine extérieure et les gaines des torons devant être rempli, par exemple avec un coulis de ciment. Dans le cas de remplissage par coulis de ciment, le niveau du remplissage ne doit pas dépasser la partie supérieure des gaines des torons (fig. 4.03, p. 44). La zone de transition entre l'extrémité supérieure des gaines des torons et la tête d'ancrage doit être protégée à l'aide de produits souples.

COMMENTAIRE

Lorsque cette protection est assurée par de la graisse, il est rappelé (voir article 4.61, p. 41) que celle-ci doit avoir des caractéristiques conformes aux spécifications de la Commission interministérielle de la précontrainte.

4.724. Mise en œuvre des protections rigides à base de coulis de ciment

1. L'injection, à l'aide de coulis à base de ciment, des tirants précontraints doit être effectuée conformément aux règlements en vigueur.

COMMENTAIRE

Actuellement, le document de référence est le fascicule 65 du C.C.T.G.

En complément à ces règlements, l'utilisation d'adjuvants expansifs est admise.

2. Le produit est injecté en source, sous pression, et avec une montée en pression finale.

La décantation du ciment est contrôlée, et l'espace libre correspondant est rempli par une adjonction de produit afin d'enrober parfaitement le tirant jusqu'au contact de la tête d'ancrage, sans solution de continuité.

4.8. DISPOSITIONS PARTICULIÈRES À CHAQUE SYSTÈME

Elles figurent dans la notice descriptive du procédé concerné.

CHAPITRE 5

MISE EN ŒUVRE

5.0. GÉNÉRALITÉS

Les diverses opérations de mise en œuvre d'un tirant d'ancrage comprennent :

- le forage du trou dans lequel sera mis en place le tirant,
- la mise en place de l'armature,
- l'accrochage du tirant au sol,
- la mise en tension du tirant,
- la protection du tirant contre la corrosion, qui a fait l'objet du chapitre 4 (p. 25),
- et, dans le cas des tirants provisoires, la détente ou l'extraction (partielle ou totale).

COMMENTAIRES

1. Pour divers types de tirants (ancrages à plaques, à vis, etc.), certaines des opérations ci-dessus n'existent pas ou sont groupées.
2. L'ordre chronologique de certaines opérations peut être inversé.

5.1. FORAGE

Le procédé de forage doit éviter toute modification des caractéristiques du sol et en particulier tout entraînement d'éléments fins qui pourrait provoquer des désordres dans le voisinage.

COMMENTAIRE

Parmi les procédés répondant aux critères ci-dessus, on peut citer :

- en l'absence de nappe aquifère en charge au niveau de la tête du forage :
 - les procédés utilisant un tubage de revêtement mis en place à l'avancement,
 - les procédés consistant à réaliser un forage non revêtu exécuté à l'aide d'un fluide de perforation dont les caractéristiques et le mode de mise en œuvre sont adaptés à la nature des terrains traversés. Ce fluide peut, suivant le cas, être constitué par de l'air, de l'eau, de l'argile-ciment, de la boue bentonitique, un coulis de ciment, etc.
- en cas de forage dans une nappe aquifère en charge au niveau de la tête du forage, s'il y a des risques d'entraînements de terrain nuisibles à l'accrochage du tirant ou à l'environnement, on utilise :
 - les dispositions assurant l'étanchéité de la tête de forage (presse-étoupe, sas, etc.),
 - les systèmes utilisant des fluides de perforation lourds,
 - la préinjection du terrain, etc.

5.2. MISE EN PLACE DE L'ARMATURE

5.20. Domaine d'application

Cet article ne concerne pas les procédés où l'armature est constituée par le tubage du forage ou un train de tiges laissées en place.

5.21. Si le fluide de perforation ne présente pas des caractéristiques suffisantes pour assurer un scellement normal, il doit être chassé du trou du forage par le coulis de scellement définitif avant la mise en place de l'armature.

5.22. Toutes précautions doivent être prises pour que l'armature, ou la gaine du tirant, ne soit pas détériorée au cours de sa mise en place.

5.3. ACCROCHAGE DU TIRANT AU SOL

5.30. Généralités

L'accrochage du tirant au sol peut être réalisé par deux familles de procédés :

- les procédés n'utilisant ni les coulis ni les mortiers de scellement (pieux battus, systèmes à ancrage mécanique, etc.),
- les procédés utilisant les coulis ou mortiers de scellement.

5.31. Procédés n'utilisant ni les coulis ni les mortiers de scellement

5.310. Les systèmes d'ancrage n'utilisant que des éléments en béton armé doivent être réalisés à l'aide de ciments résistant à l'agressivité éventuelle du milieu. Les caractéristiques de ces ciments sont mentionnées à l'article 3.21 (p. 18).

5.311. Dans les systèmes d'ancrage utilisant des éléments métalliques en contact direct avec le terrain, ces parties métalliques peuvent être constituées :

- par l'armature du tirant,
- éventuellement par les autres organes d'ancrage au terrain (plaques, vis, sabots, etc.).

La protection contre la corrosion de l'armature du tirant a été définie au chapitre 4 (p. 25).

Quant aux autres organes d'ancrage, ils sont en général soumis à des contraintes suffisamment faibles pour qu'il n'y ait pas de risques de corrosion sous tension ; quand ils sont en contact direct avec le terrain, leur

protection consiste, le plus souvent, à prévoir un surdimensionnement en épaisseur, ou à utiliser des aciers au cuivre (voir article 3.111.2, p. 16).

5.32. Procédés utilisant les coulis et les mortiers de scellement

5.320. Généralités

Les coulis ou mortiers de scellement peuvent être réalisés à partir :

- de ciment, avec ou sans additif,
- de résines.

Les critères de choix et les caractéristiques de ces matériaux ont été indiqués aux articles 3.2 (ciments, p. 18) et 3.3 (résines, p. 24).

5.321. Exécution des scellements

Le mode d'exécution des scellements doit figurer dans la notice technique remise au maître d'œuvre.

Lorsque des essais préalables ont été effectués (chapitre 6, p. 83), le mode de scellement des tirants de l'ouvrage doit être le même que celui qui a été utilisé pour les tirants d'essai.

5.4. MISE EN SERVICE DU TIRANT

5.40. Généralités sur la mise en service

5.400. Lorsque le scellement a atteint un durcissement suffisant, on procède à la mise en service du tirant, laquelle comporte, pour chaque tirant, les opérations suivantes :

- a) application de la traction d'épreuve T_e , par étapes successives au cours desquelles sont mesurés simultanément les pressions du vérin et les déplacements du tirant,

- b) maintien pendant une durée limitée de la traction d'épreuve et mesure des déplacements correspondants suivant les prescriptions du mode opératoire de l'essai de mise en tension stipulées à l'article 5.433 (p. 69),
- c) dans le cas où les critères de réception sont satisfaits, relâchement partiel de la traction jusqu'à la traction du blocage T_b , puis blocage du tirant,
- d) détente du vérin.

5.401. Cette succession d'opérations n'est réalisable qu'en cas d'utilisation d'un équipement de mise en tension (voir article 5.41, p. 56) comportant un vérin à blocage commandé. L'utilisation de vérins à tête autobloquante oblige à modifier cette succession, qui peut, par exemple, s'échelonner alors de la manière suivante :

- a) montée jusqu'à la traction de blocage T_b , par étapes successives avec mesures en continu et simultanées des pressions du vérin et des déplacements du tirant et blocage,
- b) détente du vérin,
- c) mise en place d'un dispositif de surtension,
- d) remontée jusqu'à la traction d'épreuve T_e , par étapes successives au cours desquelles on mesure simultanément les pressions et les déplacements,
- e) maintien pendant une durée limitée de la traction d'épreuve T_e , et mesure des déplacements correspondants suivant les prescriptions du mode opératoire de mise en tension stipulées à l'article 5.433 (p. 69),
- f) dans le cas où les critères de réception sont satisfaits, détente du vérin.

COMMENTAIRE

Dans la suite du texte, seul le processus réalisé avec un vérin à blocage commandé sera commenté et illustré.

5.402. Dans la pratique, le processus de blocage du tirant provoque en général des pertes de tension par calage qui conduisent à distinguer deux tractions caractéristiques de blocage :

T_b traction de début de blocage,

T_r traction réelle en fin de blocage.

La valeur de la traction de début de blocage T_b est définie à l'article 5.411 ci-après.

COMMENTAIRES

- Seule la traction de début de blocage T_b est directement mesurable. La traction réelle de fin de blocage T_r peut cependant être vérifiée à partir du diagramme de mise en tension.
- Les pertes de calage (glissement des armatures dans l'organe d'ancrage, déformation de celui-ci, etc.) sont, pour un procédé donné, sensiblement constantes et bien connues (voir article 5.411.11 ci-après).

La traction réelle de fin de blocage T_r est donc connue avec une bonne approximation, à partir de la traction de début de blocage.

5.41. Tractions caractéristiques de mise en tension

5.410. Traction d'épreuve T_e

La traction d'épreuve T_e est prise égale à la plus petite des valeurs définies aux articles 5.410.1 et 5.410.2 (ci-après), sauf si les conditions indiquées à l'article 5.410.3 (ci-après) imposent une valeur plus faible.

COMMENTAIRE

La traction d'épreuve subit donc une double et, éventuellement, une triple limitation :

- limitation en fonction de la traction de service T_s (article 5.410.1),
- limitation due à l'armature (article 5.410.2),
- éventuellement limitation due à la structure (article 5.410.3).

1. Limitation en fonction de la traction de service T_s

11. Tirants provisoires

La traction d'épreuve T_e des tirants provisoires a une valeur différente suivant que la traction de début de blocage T_b est (ou non) supérieure de plus de 15 % à la traction de service T_s .

- si T_b est supérieur à $1,15 T_s$, la traction d'épreuve est égale à la traction de début de blocage :

$$\text{si } T_b > 1,15 T_s, T_e = T_b$$

- dans le cas contraire, la traction d'épreuve est égale aux 115 centièmes de la traction de service :

$$\text{si } T_b < 1,15 T_s, T_e = 1,15 T_s$$

12. Tirants permanents

La traction d'épreuve T_e des tirants permanents est égale aux 125 centièmes de la traction de service T_s :

$$T_e = 1,25 T_s.$$

COMMENTAIRE

L'essai systématique de tous les tirants à des valeurs supérieures à $1,25 T_s$, non seulement ne confère pas une sécurité supplémentaire, mais encore peut être dangereux pour l'ensemble des scellements. C'est la raison pour laquelle il est formellement déconseillé de soumettre les tirants à une traction d'épreuve plus élevée que $1,25 T_s$.

2. Limitation due à l'armature

Pour tous les types de tirants, la traction d'épreuve T_e ne doit, en aucun cas, être supérieure aux 90 centièmes de la traction T_p correspondant à la limite élastique de l'armature :

$$T_e < 0,90 T_p.$$

En outre, cette tension d'épreuve ne doit pas dépasser la « valeur maximale de la tension à l'origine » fixée par les agréments de l'armature et du dispositif d'ancrage délivrés par la Commission interministérielle compétente.

3. Limitation due à la structure

31. Déformation de la structure sous les efforts dus à la mise en traction des tirants

Dans le cas où la structure ancrée n'étant pas suffisamment rigide l'application aux tirants de la traction d'épreuve qui résulterait des dis-

positions ci-dessus risquerait de provoquer dans cette structure des déformations incompatibles avec sa bonne tenue, il convient alors de fixer une traction d'épreuve plus faible.

32. Déformation de la structure du fait de sa mise en charge au cours d'excavations ou autres interventions

Dans beaucoup de cas, la traction T_s des tirants est atteinte après que la mise en charge de la structure s'est produite (par excavation du terrain, par exemple). Dans ce cas, les tirants sont mis en traction à une valeur initiale T_i inférieure à T_r .

La valeur de T_i est donnée par une note de calcul ou par un programme de calcul. Mais la définition de la valeur de T_e par rapport à T_s reste inchangée :

- pour les tirants provisoires, $T_e = 1,15.T_s$,
- pour les tirants permanents, $T_e = 1,25.T_s$.

Dans ce cas, T_b devient T_{bi} avec $T_{bi} < T_b$.

COMMENTAIRE

- Les différences entre T_s et T_i sont généralement de 5 à 30 % de T_s , mais elles peuvent être beaucoup plus importantes.
- La limitation due à la mise en charge et celle qui est due à la rigidité du support peuvent se cumuler : dans ce cas, le tirant n'est absolument pas testé, ni à T_r , ni à T_e . Il est donc nécessaire d'avoir effectué des essais de conformité en nombre supérieur à celui qui est indiqué à l'article 6.21 (p. 100).

Il peut être aussi nécessaire de renforcer localement la structure pour être à même de monter ponctuellement la charge du tirant à T_e .

Cela peut entraîner en outre la mise en place de cellules de mesure des efforts, permettant de s'assurer du bon fonctionnement des tirants non testés à T_e .

5.411. Traction de début de blocage et pertes

1. Traction de début de blocage

La traction de début de blocage T_b est égale à la traction initiale T_i , majorée des pertes calculées.

COMMENTAIRE

La détermination de la traction initiale fait l'objet d'une note de calcul.

Les pertes de traction appartiennent à deux catégories :

11. Les pertes immédiates : ce sont les pertes de calage, inhérentes au processus de blocage lui-même (glissement des armatures dans l'organe d'ancrage, déformation de celui-ci, etc.). Elles sont en général bien connues.

12. Les pertes différées, qui peuvent provenir :

- de la relaxation des armatures de précontrainte,
- du fluage du scellement dans les terrains plastiques.

COMMENTAIRE

L'estimation des pertes doit être considérée avec soin, de façon à éviter, autant que possible, une trop grande surévaluation ou sous-évaluation, toutes deux nuisibles pour la sécurité des ouvrages.

La surévaluation des pertes conduirait à un excès permanent de tension des armatures, ce qui ne peut qu'accroître les risques de mauvaise conservation dans le temps.

La sous-évaluation des pertes conduirait à une valeur trop faible de la traction résiduelle ; la structure risquerait alors de ne trouver un équilibre qu'au prix de déformations incompatibles avec sa sécurité, ou simplement avec ses conditions normales d'exploitation.

2. Évaluation des pertes

Les pertes sont la somme des pertes proportionnelles à la traction et des pertes non proportionnelles.

21. Pertes proportionnelles à la traction.

Elles comprennent :

- les pertes par frottement dans le vérin,

COMMENTAIRE

Hormis le cas, exceptionnel, de certains vérins pour lesquels les pertes sont pratiquement constantes, celles-ci représentent, pour la grande majorité des vérins et suivant le type de ceux-ci, 2 à 3 % de la traction.

- les pertes par frottement dans l'organe d'ancrage et dans la pièce de raccordement (trompette),

COMMENTAIRE

En général, les pertes par frottement dans le vérin ne sont pas dissociées de celles dans l'organe d'ancrage et la pièce de raccordement : leur ensemble représente environ 4 à 5 % de la traction.

Pour connaître leur valeur, il convient de se reporter à la fiche d'agrément du procédé ou, à défaut, à la notice du constructeur ; on peut aussi les déterminer expérimentalement (voir article 5.433.12, p. 71).

- les pertes par frottement en ligne dans la partie libre, dues aux possibles courbures du forage, au positionnement des armatures, etc.

COMMENTAIRE

Ces pertes sont généralement faibles.

22. Pertes non proportionnelles à la traction

Elles proviennent de phénomènes complexes, inhérents au processus de scellement du tirant, et dus à des glissements et déformations au niveau du scellement, etc.

COMMENTAIRE

La perte qui en résulte, évaluée en pourcentage de la traction finale, dépend notamment des proportions relatives de la longueur libre et de la longueur sollicitée du scellement.

À titre indicatif, pour des ancrages courants dans un bon terrain meuble, avec des longueurs de scellement de l'ordre de 8 mètres et des longueurs libres de 12 à 15 mètres, ces pertes représentent environ 2 à 3 % de la traction maximale.

23. Pertes accidentelles

La valeur de ces pertes accidentelles doit rester faible.

À titre indicatif, si les pertes totales (pertes évaluées conformément aux articles 5.411.21 (p. 58) et 5.411.22 (p. 59) + pertes accidentelles) attei-

gnent 12 à 15 % de la traction maximale, il convient de rechercher la cause de cette anomalie.

24. Remarque

La contrainte de l'armature est suffisamment faible et le processus de mise en tension est suffisamment rapide pour que l'on puisse négliger le fluage de l'acier.

5.42. Matériel et appareillage de mise en tension

5.420. Remarques préliminaires

Le matériel de mise en tension comprend un vérin hydraulique actionné par une pompe manuelle ou électrique.

Le contrôle de la mise en tension impliquant de connaître les allongements du tirant ainsi que la traction correspondante, on mesure la pression dans le vérin au moyen de manomètres, et les allongements à l'aide de réglets ou comparateurs. En raison des particularités du processus de mise en tension et de l'interprétation faite ultérieurement, il importe que l'ensemble du matériel et de l'appareillage soit en parfait état de marche, sensible et précis. Il faut rappeler que, dans la plupart des cas, le même matériel et appareillage est utilisé pour la réalisation des essais préalables de conformité ou de contrôle qui exigent d'effectuer des mesures particulièrement fines (voir chapitre 6, p. 83).

5.421. Spécifications particulières

1. Vérins et organes d'ancrage

Suivant le système de précontrainte retenu, le vérin est annulaire ou à corps plein, à blocage commandé ou à tête autobloquante. La course du vérin doit rester compatible avec les allongements prévisibles du tirant et les tassements de l'appui.

Il importe de connaître avec précision la section active du vérin, ainsi que les pertes par frottement dans les vérins et les organes d'ancrage.

COMMENTAIRES

1. La section active du vérin dépend de la position du joint d'étanchéité.
2. Les pertes par frottement peuvent être :
 - soit calculées d'après les données du constructeur (article 5.411.21),
 - soit déterminées expérimentalement.

Dans le cas exceptionnel où l'on utilise un vérin dans lequel les pertes par frottement ne sont pas proportionnelles à la traction (article 5.411.21, p. 59), le matériel de mise en tension doit être choisi dans une gamme telle que les pertes par frottement ne dépassent pas 10 % de la charge maximale appliquée au tirant.

COMMENTAIRE

Par exemple un vérin de 2 000 kN qui, associé à ses organes d'ancrage, aurait un frottement constant de 80 kN pour des efforts compris entre 100 et 2 000 kN ne pourrait être utilisé que pour des mises en tension dont la valeur ultime dépasserait 800 kN.

2. Plaques d'appui

Les plaques d'appui des organes d'ancrage doivent être dimensionnées de telle manière qu'elles ne subissent, du fait des efforts qui leur sont appliqués, aucune déformation préjudiciable.

COMMENTAIRE

Une plaque trop déformable peut non seulement provoquer une perte de tension dans l'armature, mais encore créer des désordres dans la structure.

En outre elle augmente les risques de mauvais fonctionnement des appareillages de contrôle de la traction dans le temps (voir chapitre 7, p. 105).

C'est pourquoi la raideur des plaques doit être suffisante pour que leur flèche soit inférieure à 1 mm, compte tenu des conditions d'appui.

Il faut aussi s'assurer du bon contact mécanique de la plaque et de la structure et vérifier que la qualité du béton sous la plaque d'appui est suffisante eu égard aux contraintes induites.

3. Mesure des pressions – Manomètres

Le manomètre utilisé pour la mesure des pressions doit être choisi de telle façon que la valeur maximale de sa graduation soit au plus égale à une fois et demie la pression maximale prévue en tenant compte de la section du vérin et de son frottement.

COMMENTAIRE

Seulement dans le cas où un tel manomètre n'existe pas dans le commerce, il est toléré d'utiliser un manomètre correspondant à deux fois la pression maximale prévue.

Les manomètres doivent être maintenus en parfait état. Leurs indications doivent pouvoir être comparées à tout moment à celles d'un manomètre de contrôle conservé en permanence sur le chantier. Pour ce faire, les canalisations de mise en pression doivent posséder un branchement permettant le montage rapide en parallèle de ce manomètre, lequel ne doit, en aucun cas, rester à demeure sur la pompe. La différence de lecture entre les deux manomètres pour la pression maximale prévue ne doit pas dépasser 3 %.

Si les indications des deux manomètres diffèrent de plus de 3 % (après correction éventuelle selon sa courbe d'étalonnage en ce qui concerne le manomètre de contrôle), le manomètre de chantier doit être remplacé.

Le manomètre de contrôle est vérifié lui-même à chaque début de chantier, et, éventuellement, régulièrement au cours de celui-ci, avec un manomètre étalon soumis systématiquement, tous les six mois, à la vérification d'un organe officiel.

COMMENTAIRES

1. Parmi les organismes procédant à de tels étalonnages, on peut citer, par exemple, le Laboratoire national d'Essais, le Laboratoire central des Ponts et Chaussées, le Centre expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux publics.
2. Pour s'affranchir de la sujétion d'étalonnages aussi fréquents, ce manomètre étalon peut être remplacé par une balance de pression. C'est avec elle que l'on vérifie le manomètre de contrôle.

4. Mesures des déplacements – Repères fixes

La mesure des allongements s'effectue avec un régllet gradué en demi-millimètres et de longueur suffisante pour n'avoir pas à être recalé, et solidaire du point fixe indiqué ci-après.

Les lectures se font au demi-millimètre près.

COMMENTAIRES

1. Il est devenu courant d'utiliser des comparateurs numériques à longue course.
2. Par ailleurs, le développement des mesures et de l'électronique rend possibles l'enregistrement et l'obtention en temps réel des courbes efforts-déplacements.

Ces mesures s'effectuent à partir d'un point fixe (par exemple : une tige rigide fichée dans le sol ou un trépied supportant un profilé rigide en acier, disposé à une distance convenable de la tête du tirant et sensiblement perpendiculaire à son axe).

Toute circulation d'engins est interdite dans le voisinage immédiat de ce point fixe.

Lorsque la mise en place d'un tel point fixe est impossible (mur de quai par exemple), ou lorsque la mise en traction des premiers tirants a permis de vérifier que la structure a une rigidité suffisante, ces allongements sont déterminés en mesurant le déplacement, par rapport à la structure, de la partie mobile du vérin.

COMMENTAIRE

La mesure du déplacement par rapport à la structure n'est pas très satisfaisante, car elle ne permet pas la détermination des allongements absolus du tirant, par suite des déformations de la structure et celles de la plaque d'appui de la tête d'ancrage. Ce n'est qu'en fin du chargement, lorsque tous les organes ont pris leur place, qu'elle permet de chiffrer les allongements relatifs. Sauf cas exceptionnels, la mesure du déplacement par rapport à la structure ne peut donc pas servir à calculer la longueur libre du tirant. En tout cas, lorsque les déplacements sont mesurés par rapport à une structure ancrée particulièrement déformable, il y a lieu de mesurer aussi les mouvements de celle-ci.

5.43. Application de la traction d'épreuve T_e

5.430. Remarques liminaires sur les caractéristiques mesurables

Les dispositions auxquelles on recourt lors de la mise en tension ne permettent pas d'évaluer la traction appliquée réellement à l'armature du tirant ni son allongement réel. On est ainsi limité à mesurer une traction dite globale et à mesurer des allongements qui sont en fait les résultantes de plusieurs phénomènes.

1. La traction globale de l'armature s'obtient en multipliant la section utile du vérin par la pression du fluide de remplissage.

COMMENTAIRE

Cette évaluation introduit un certain nombre de sources d'erreurs qui doivent être corrigées, en particulier :

- les frottements dans les vérins,
- les frottements dans les organes d'ancrage,
- l'imprécision des manomètres, etc.

Du fait de ces frottements, la traction réelle dans l'armature est inférieure à la traction globale définie ci-dessus lorsque les mesures sont faites au cours d'une montée en pression (voir commentaire 1 de l'article 5.431, p. 66) ; elle lui est supérieure lorsque les mesures sont effectuées au cours d'une détente (article 5.440, p. 78). Il en résulte donc que les corrections dues aux effets des frottements peuvent intervenir dans un sens ou dans l'autre. Néanmoins, dans la suite du texte, les effets de ces frottements sont désignés sous le vocable de « pertes » et leur évaluation est donnée à l'article 5.411.2 (p. 58).

2. L'allongement de l'armature est à évaluer à partir du déplacement relatif de deux repères :

- l'un, lié à l'armature ou, à défaut, à la partie mobile du vérin,
- l'autre, constitué par un point fixe (article 5.421.4, ci-avant), ou, à défaut, par un point lié à la structure à ancrer.

COMMENTAIRES

1. Le déplacement ainsi mesuré intègre un certain nombre de phénomènes de nature différente et en particulier :

- la mise en place de l'armature et la récupération des mous et des jeux,
 - le déplacement éventuel du scellement,
 - le déplacement éventuel du repère de mesure (tassement de la pièce d'ancrage, mise en place de la structure ancrée, etc.).
2. Lorsqu'il y a risque de glissement des armatures dans le dispositif de fixation de celles-ci dans le corps du vérin, il n'est pas souhaitable d'effectuer les mesures par rapport à un repère lié à la partie mobile du vérin.

3. L'ensemble des résultats relevés lors de la montée en pression est représenté par un diagramme caractéristique (voir fig. 5.01, p. 68) obtenu en portant :

- en ordonnée, la traction globale de l'armature (produit de la section active du vérin par la pression du fluide de remplissage lue au manomètre), l'axe des ordonnées étant gradué à la fois en pression et en traction totale,
- en abscisse, le déplacement du repère lié à l'armature (article 5.430.2, ci-avant).

COMMENTAIRE

Étant donné que la phase initiale des opérations de mise en tension correspond à la mise en place du tirant et du dispositif de mise en tension (rattrapage des mous et des jeux), l'origine du diagramme ne peut pas être représentée.

Il est indispensable que le diagramme de mise en tension soit tracé directement à partir des valeurs relevées, sans correction de quelque nature que ce soit, et sans interprétation.

5.431. Fixation des pressions de mise en tension

Généralités

Avant toute mise en tension, il convient préalablement de choisir :

- la pression correspondant à la première lecture, appelée par la suite $\Pi (T_0)$,
- les pressions des diverses étapes intermédiaires entre $\Pi (T_0)$ et la pression d'épreuve $\Pi (T_e)$,

- cette dernière $\Pi (T_0)$ est déterminée en tenant compte des frottements, calculés *a priori* en fonction des caractéristiques du matériel utilisé.

COMMENTAIRES

1. Si ψ désigne les frottements calculés ou estimés correspondant à une certaine pression $\Pi (T)$, cette pression, pour un vérin de section S , est donnée, lorsque les mesures sont faites au cours d'une montée en pression, par la relation ci-après :

$$\Pi (T) = \frac{T + \psi}{S}$$

2. En général, pour une même catégorie de tirants ancrés dans un terrain de mêmes caractéristiques, la détermination des frottements réels est effectuée sur le premier tirant de la série, et la valeur de la pression d'épreuve $\Pi (T_0)$ est corrigée en conséquence pour les tirants suivants.

$\Pi (T_0)$ et les pressions intermédiaires $\Pi (T)$ sont fixées par référence à $\Pi (T_e)$.

1. Choix de la pression $\Pi (T_0)$ correspondant à la première lecture

La pression $\Pi (T_0)$ correspondant à la première lecture est fixée conventionnellement à une valeur voisine du dixième de la pression d'épreuve :

$$\Pi (T_0) = \frac{1}{10} \Pi (T_e).$$

COMMENTAIRE

Des exemples de valeurs à adopter pour $\Pi (T_0)$ sont indiqués en commentaire à l'article 5.431.2, ci-dessus).

La pression $\Pi (T_0)$ doit être choisie judicieusement. Elle ne doit être ni trop basse (de façon que la totalité des mous et des jeux soit récupérée) ni trop haute (de façon à avoir suffisamment de valeurs intermédiaires). C'est la raison pour laquelle, afin de normaliser, dans la mesure du possible, le processus de mise en tension, il est conseillé de choisir pour $\Pi (T_0)$ une valeur ne s'écartant pas trop de $\frac{1}{10} \Pi (T_e)$.

2. Choix des pressions intermédiaires

Les mesures intermédiaires entre $\Pi(T_0)$ et $\Pi(T_e)$ doivent être au moins au nombre de quatre (fig. 5.01, ci-dessous). Elles sont réparties à intervalles égaux, sauf la dernière, située entre $0,8 \Pi(T_e)$ et $0,9 \Pi(T_e)$.

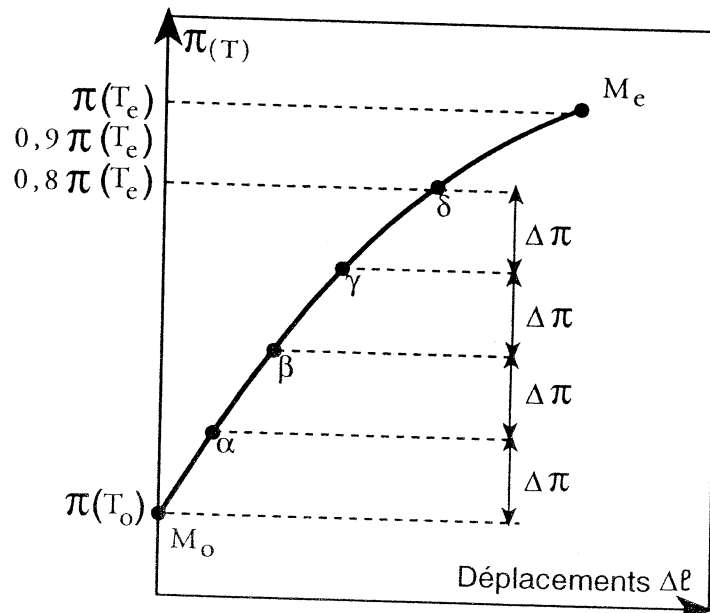


Fig. 5.01.

COMMENTAIRE

Pour faciliter les lectures et limiter les erreurs de transmission, la pression $\Pi(T_0)$ et les pressions intermédiaires doivent, dans la mesure du possible, correspondre à des graduations principales du manomètre.

Pour guider le choix des entreprises, le tableau ci-après indique, en fonction de la pression d'épreuve $\Pi(T_e)$ choisie, quelles sont les valeurs de $\Pi(T_0)$ et les pressions intermédiaires.

Pression d'épreuve $\Pi(T_e)$ - MPa	Pression de première lecture $\Pi(T_0)$ - MPa	Pressions intermédiaires MPa
17	2,5	5 - 7,5 - 10 - 12,5 - 15
27	4	8 - 12 - 16 - 20 - 24
54	5	15 - 25 - 35 - 45

5.432. Processus de montée en pression

La montée en pression s'effectue, sans mesures, jusqu'à la valeur $\Pi (T_0)$. Après mesure de la position relative des repères pour cette pression $\Pi (T_0)$, la montée en pression s'effectue, par une augmentation régulière, jusqu'à $\Pi (T_e)$, avec des points intermédiaires de mesure des déplacements pour les valeurs de pressions fixées à l'article 5.431.2, ci-avant ; pour chacun de ces points de mesure, $\alpha, \beta...$ (fig. 5.01.), la durée de l'arrêt est limitée au temps strictement nécessaire à la mesure du déplacement. Une fois atteinte la pression $\Pi (T_e)$, il est procédé à l'épreuve du tirant.

COMMENTAIRE

En plus du processus minimal décrit ci-dessus, l'entreprise peut, si elle le désire, effectuer des cycles, d'amplitude limitée, de déchargement-chargement. Le premier de ces cycles peut, sans inconvénient, être effectué avant d'avoir atteint la pression $\Pi (T_e)$: un autre, effectué à la pression $\Pi (T_e)$ (voir commentaire de l'article 5.433.11 et article 5.433.12, ci-après), peut être réalisé après l'épreuve du tirant. Les cycles entre $\Pi (T_0)$ et $\Pi (T_e)$ sont à éviter pour les terrains susceptibles de fluer, car ils rendent l'interprétation ultérieure malaisée.

5.433. Essai de réception du tirant

Généralités

L'essai de réception du tirant consiste à le maintenir sous une traction constante, égale à la traction d'épreuve T_e , pendant le laps de temps défini à l'article 5.433.1, et à mesurer le déplacement du repère lié à l'armature pendant cet essai.

COMMENTAIRE

Il est rappelé que cet essai ne constitue par une vérification du coefficient de sécurité du tirant.

1. Mode opératoire

1.1. Opérations obligatoires

Compte tenu des dispositions habituelles, il est impossible de maintenir une traction rigoureusement constante.

De façon pratique, on observe le manomètre pendant toute la durée de l'épreuve, et on remonte la pression :

- avant qu'elle n'ait baissé de 2 %,
- sans qu'elle dépasse la pression $\Pi(T_e)$ de plus de 1 % (fig. 5.02, ci-dessous).

Toutes les mesures sont faites « en montant », sans détente.

La figure 5.02 résume ce mode opératoire.

À la fin de la durée d'épreuve, on remonte, si nécessaire, la pression à sa valeur initiale $\Pi(T_e)$, et on mesure le déplacement Δe du repère lié à l'armature. On le porte sur le diagramme de mise en tension (segment $M_e M'_e$ de la figure 5.03).

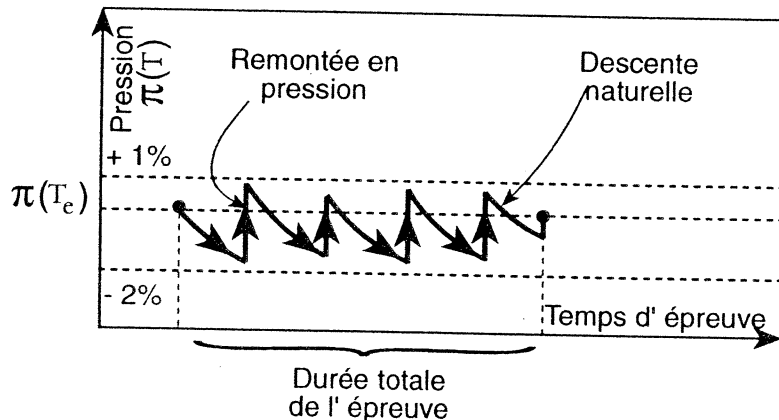


Fig. 5.02. — Mode opératoire

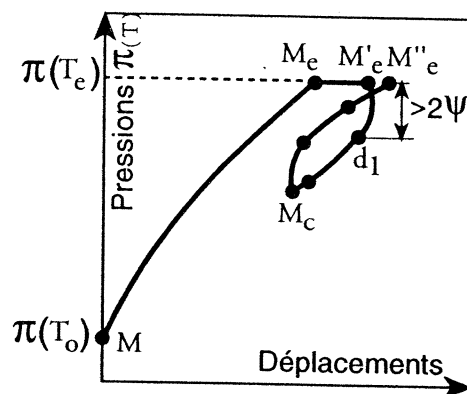


Fig. 5.03.

COMMENTAIRE

L'entreprise peut alors, si elle le désire, effectuer un cycle de déchargement-chargement.

12. Cycles complémentaires

Les dispositions minimales décrites ci-dessus pour l'épreuve du tirant peuvent être complétées par des dispositions particulières permettant éventuellement :

- une vérification de la position du point M_e ,
- une vérification de la valeur des frottements prise en compte dans les calculs.

On procédera alors à un ou plusieurs cycles, partiels ou complets de détente et de remontée en tension.

Lors de l'exécution d'un tel cycle partiel à l'issue du palier d'épreuve (fig. 5.04), la première détente $M'_e d_1$ est supérieure au double des frottements estimés.

Le point bas du cycle M_c est choisi en dessous de la valeur de la traction réelle en fin de blocage T_r .

On remonte ensuite en pression au point M''_e .

Si le cycle est conduit avec assez de précision, on peut définir également un point X' intermédiaire (fig. 5.05), milieu de XM'_e , qui représente la traction réelle du câble, sous la pression $\Pi(T_e)$, le segment $X'M'_e$ étant égal à la valeur réelle des frottements au niveau et au-dessus de la tête d'ancrage.

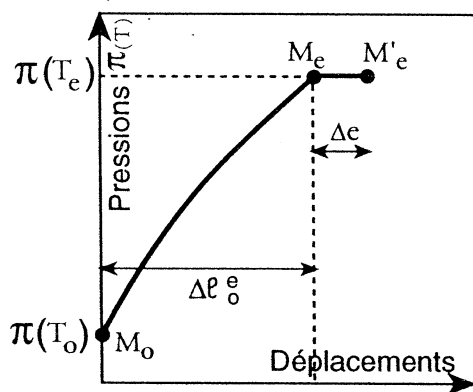


Fig. 5.04.

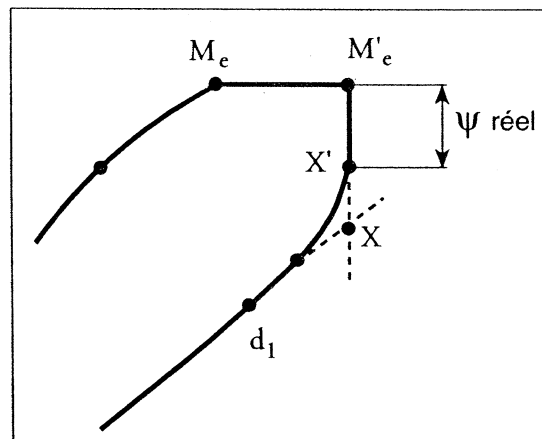


Fig. 5.05.

COMMENTAIRE

Dans le cas où les mesures sont effectuées par rapport à la paroi et si cette paroi est déformable, il convient de mesurer simultanément les déplacements de la paroi.

5.434 Durée de l'épreuve du tirant et intervalles de mesure

1. Choix du temps t_0 origine de l'épreuve

L'origine de l'épreuve est le temps t_0 qui est celui où on atteint un palier de traction du tirant (fig. 5.06, ci-après).

Le vérin doit être choisi de telle sorte que cette montée s'effectue en moins d'une minute.

2. Durée de l'épreuve

La durée de l'épreuve à laquelle sont soumis tous les tirants, comptée à partir du temps t_0 défini précédemment, est d'au moins :

- 30 minutes dans les terrains cohérents susceptibles de fluer (tels qu'ils sont définis à l'article 6.032, p. 86, $I_p > 20$).
- 15 minutes dans les autres terrains.

COMMENTAIRE

Ces durées peuvent, exceptionnellement, être prolongées avec l'accord du maître d'œuvre.

Les intervalles de mesure sont indiqués :

- à l'article 5.434.311 (p. 73) pour les terrains non susceptibles de fluer,
- à l'article 5.434.312 (p. 74) pour les terrains susceptibles de fluer.

3. Critères de réception

Généralités

Pour qu'un tirant quelconque soit accepté, il faut vérifier que le déplacement du scellement en cours d'épreuve est satisfaisant.

Il est intéressant de contrôler également la longueur libre équivalente du tirant, sans que cette détermination puisse constituer un critère de réception.

COMMENTAIRES

1. Le déplacement du scellement est supposé être celui du repère lié à l'armature, éventuellement diminué de l'allongement dû au fluage de

l'acier, d'autant plus important que la contrainte sollicitant celui-ci et la longueur libre du tirant sont grandes.

2. Une longueur libre suffisante est indispensable pour qu'un tirant fonctionne normalement. Par ailleurs, sa détermination constitue une évaluation indirecte de la bonne exécution du tirant.
3. Il convient toujours de procéder systématiquement à ces mesures de déplacements afin de déceler les tirants de comportement anormal. Ces anomalies peuvent provenir :
 - d'une hétérogénéité du sol,
 - et aussi de l'exécution défectueuse du tirant.

31. Déplacement du scellement

311. Terrains non susceptibles de fluer (figure 5.06).

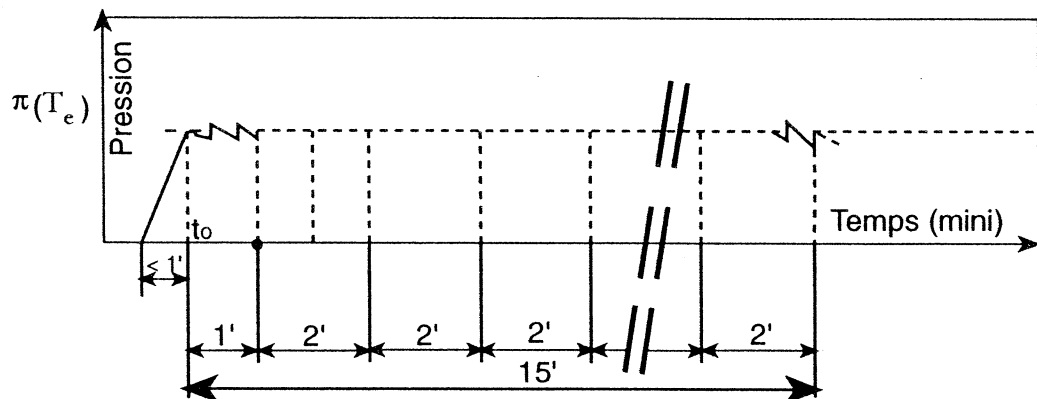


Fig. 5.06.

La première mesure du déplacement est effectuée au temps $t_0 + 1$ minute, la deuxième, au temps $t_0 + 3$ minutes et les suivantes toutes les 2 minutes jusqu'à $t_0 + 15$ minutes.

Si Δe_{3-15} représente le déplacement du repère entre les temps $t_0 + 3$ minutes et $t_0 + 15$ minutes, l'épreuve est réputée satisfaisante si

$$\Delta e_{3-15} < 1,5 \text{ mm.}$$

COMMENTAIRE

Les conditions de mesures sur chantier et/ou l'existence de sols encore mal connus conduisent à proposer une valeur du déplacement limitée à 1,5 mm, mais, dans la majorité des cas, la valeur mesurée ne dépasse pas 1 mm.

Si cette condition n'est pas remplie, l'épreuve est poursuivie jusqu'au temps $t_0 + 60$ minutes, le nombre de mesures complémentaires effectuées pendant ce laps de temps étant laissé à l'initiative de l'opérateur, sans pouvoir être inférieur à 3.

En désignant par Δe_{15-60} le déplacement mesuré du repère entre les temps $t_0 + 15$ min et $t_0 + 60$ min, le tirant est accepté si :

$\Delta e_{15-60} \leq 1,5$ mm pour les tirants provisoires,

$\Delta e_{15-60} \leq 1$ mm pour les tirants permanents.

Si cette nouvelle condition n'est pas remplie, le tirant est réputé non valable pour son usage.

On peut alors décider :

- d'effectuer des essais complémentaires avec chargement cyclique permettant d'apprécier son évolution dans le temps (au moins une vingtaine de cycles dont les charges extrêmes sont comprises entre environ 90 % et 120 % de la charge de service, frottements exclus),
- de l'utiliser à une charge inférieure,
- de le charger et de suivre son évolution,
- de le conforter,
- de le refaire.

COMMENTAIRE

Lorsque le déplacement correspondant au fluage de l'acier n'est pas négligeable par rapport aux déformations mesurées, il y a lieu de tenir compte de ce fluage et d'effectuer les corrections en conséquence.

REMARQUE IMPORTANTE

Les solutions ci-dessus sont valables pour un tirant présentant une faiblesse accidentelle. Si, systématiquement, les premiers tirants essayés ne satisfont pas aux critères de réception précédents, une décision est à prendre au niveau du chantier.

312. Terrains susceptibles de fluer

Il est rappelé que l'épreuve est poursuivie jusqu'au temps $t_0 + 30$ minutes. Les déplacements sont mesurés entre les temps $t_0 + 5$ minutes et $t_0 + 30$ minutes, avec une mesure toutes les cinq minutes.

Si Δe_{5-30} représente le déplacement du repère dans l'intervalle de mesure ci-dessus, le critère de réception est satisfaisant si les deux conditions ci-après sont remplies simultanément :

- $\Delta e_{5-30} \leq 1 \text{ mm}$
- la courbe représentative du fluage en fonction du temps, en coordonnées semi-logarithmiques, n'a pas sa concavité tournée vers le haut.

COMMENTAIRE

La valeur maximale de 1 mm indiquée dans la première condition ci-dessus a été choisie pour tenir compte des conditions de mesures sur chantier et/ou de l'existence de sols encore mal connus ; cependant, dans la majorité des cas, on observe des valeurs de déplacement ne dépassant pas 0,5 mm.

Si cette double condition n'est pas satisfaisante, l'épreuve est poursuivie jusqu'au temps $t_0 + 60$ minutes.

En désignant par Δe_{30-60} le déplacement mesuré entre les temps $t_0 + 30$ min et $t_0 + 60$ min, le tirant est accepté si :

$$\Delta e_{30-60} \leq 0,5 \text{ mm.}$$

S'il n'en est pas ainsi, le tirant est réputé non valable pour son usage. En fonction des résultats des essais préalables déjà effectués (article 6.1, p. 89), la conduite à tenir est l'une de celles qui ont été indiquées à l'article 5.433.312.

32. Estimation de la longueur libre équivalente

321. Définitions

On appelle longueur libre équivalente L_{eq} la longueur d'une armature de même constitution que celle du tirant, ancrée ponctuellement aux deux extrémités, et qui prendrait le même allongement total sous la même traction T_e .

Elle est donnée conventionnellement par la formule :

$$L_{eq} = \frac{E \cdot \Omega \cdot \Delta \lambda_0^e}{T_e - T_0}$$

où E désigne le module d'élasticité apparent de l'armature,

Ω désigne la section de l'armature,

$\Delta \lambda_0^e$ désigne l'allongement entre $\Pi(T_0)$ et $\Pi(T_e)$.

T_e

COMMENTAIRES

1. T_o et T_e se déduisent respectivement de $\Pi(T_o)$ et $\Pi(T_e)$ par la relation qui figure au commentaire 1 de l'article 5.431 (p. 66).
2. Lorsque les mesures sont effectuées par rapport à un repère lié à la structure ancrée, il est nécessaire, si cette structure est déformable, de corriger la valeur de l'allongement $\Delta\lambda_o^e$ pour tenir compte du mouvement propre de la structure.
3. Le module d'élasticité apparent de l'armature peut être différent de celui de l'acier qui la constitue.

Pour les armatures de précontrainte constituées de barres ou de faisceaux de fils ou de torons parallèles, la valeur moyenne de ce module est

$$E = 2 \times 10^7 \text{ N/cm}^2 = 2 \times 10^5 \text{ MPa.}$$

Cette valeur peut varier, dans les limites $\pm 5\%$, les valeurs les plus élevées correspondant aux barres et les valeurs les plus faibles, aux torons.

Pour des armatures câblées (constituées de torons enroulés en hélice), le module d'élasticité apparent peut être beaucoup plus bas.

La valeur donnée précédemment, à titre indicatif, doit être ajustée en fonction des procès-verbaux d'essai par lots, fournis par l'usine. L'attention est attirée sur le fait que, pour certaines barres filetées à leurs extrémités, la section indiquée est celle à fond de filet, et non la section courante de la partie libre.

La longueur L_{eq} , comptée à partir de la fixation de l'armature sur le vérin (fig. 5.07) – ou à partir du repère lié à l'armature, si celui-ci est situé entre la plaque d'appui et les mors du vérin –, définit une position expérimentale du point d'ancrage fictif P_f , que l'on compare à la position du bouchon, et à celle du scellement.

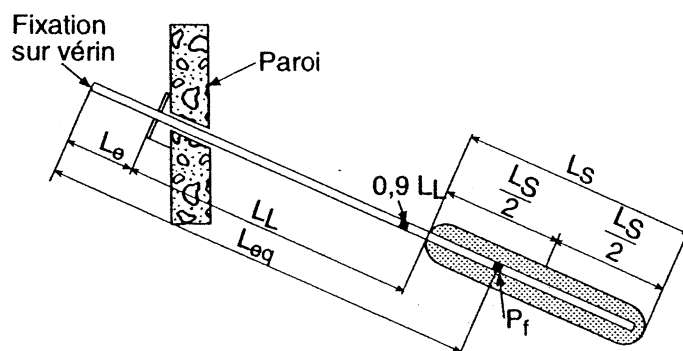


Fig. 5.07.

322. Analyse des résultats

Le point P_f est normalement situé entre le bouchon et le milieu de la longueur du scellement.

COMMENTAIRE

Le calcul, relativement long, peut être remplacé par le tracé graphique préalable de deux diagrammes linéaires de tension (fig. 5.08) correspondant aux deux critères choisis ($L_L + L_e$ d'une part, $L_L + L_e + 1/2 L_s$ d'autre part). On vérifie seulement que le point M_e tombe dans le secteur ainsi défini.

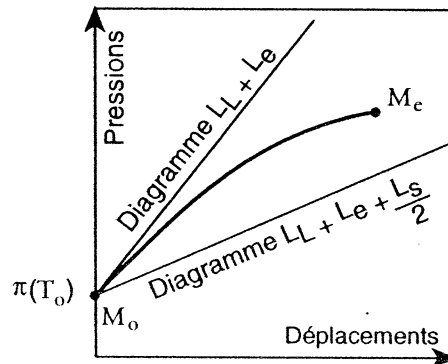


Fig. 5.08.

Toutefois, dans certains cas, le point P_f peut être situé en dehors de la zone définie précédemment :

- c'est notamment le cas des sols susceptibles de fluer, pour lesquels, compte tenu du fluage du scellement, la position du point d'ancrage fictif, telle qu'elle résulte de la mesure des déplacements, n'a pas de signification physique.
- cela peut aussi se produire s'il y a eu pénétration de laitance dans la partie libre : il peut en résulter une gêne pour la mise en place ultérieure de la protection. Pour ces raisons, on peut admettre que P_f soit en avant du bouchon, à condition qu'il reste à une distance de celui-ci au plus égale au dixième de la longueur libre théorique :
 - pour les tirants ne nécessitant aucune protection,
 - pour les autres tirants, sous réserve qu'il soit possible de justifier une mise en place correcte de la protection,
- enfin, si P_f se trouve au-delà du milieu du scellement, il convient de rechercher l'explication de cette anomalie.

33. Conclusion

Si les critères de réception indiqués à l'article 5.434.31 (p. 73) sont satisfaits, on passe alors à la phase de blocage du tirant.

34. Présentation des résultats

Les résultats des essais de réception sont présentés sous forme de tableaux récapitulatifs indiquant les valeurs des déplacements pour tous les intervalles de mesure.

5.44. Blocage du tirant et détente du vérin

5.440. Mode opératoire

REMARQUE PRÉALABLE

Le blocage de l'armature et la détente du vérin font, sauf dans le cas des systèmes à tête autobloquante, partie d'un processus continu.

On cale l'armature, lorsque la pression correspond à la valeur T_b traction de début de blocage, sans frottements :

$$\Pi (T_b) = \frac{T_b - \Psi_b}{S}$$

formule dans laquelle Ψ_b représente la valeur des frottements, évalués ou mesurés, correspondant à la pression $\Pi (T_b)$.

On mesure le déplacement résiduel du repère lié à l'armature au point B correspondant à la pression $\Pi (T_b)$ (fig. 5.09, ci-contre).

On procède alors à la détente du vérin. Le repère lié à l'armature se déplace, par suite du raccourcissement élastique de la partie L_e de l'armature située entre la plaque d'appui et le mors du vérin. Lors de la détente, on procède à la mesure du déplacement de ce repère, en trois points correspondant par exemple à $0,5 T_e$, $0,25 T_e$ et $0,125 T_e$.

COMMENTAIRE

Le premier point de mesure est choisi à une valeur suffisamment éloignée de T_e pour s'affranchir des frottements.

Ces trois points de mesure permettent de définir la droite de détente Δ_d , et son intersection S avec l'axe des déplacements.

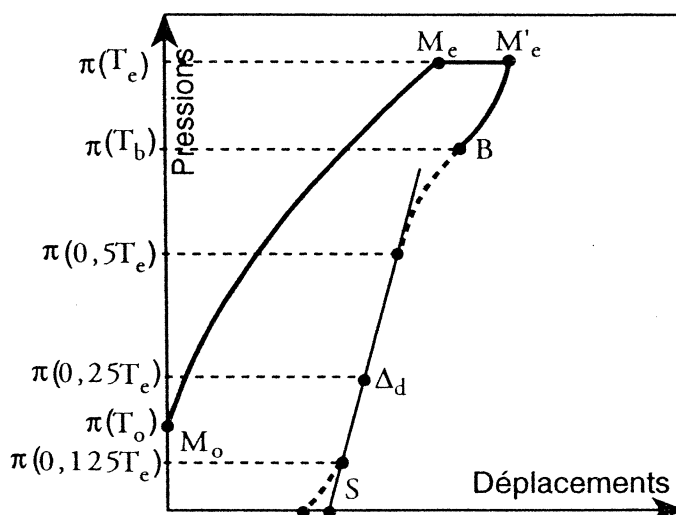


Fig. 5.09.

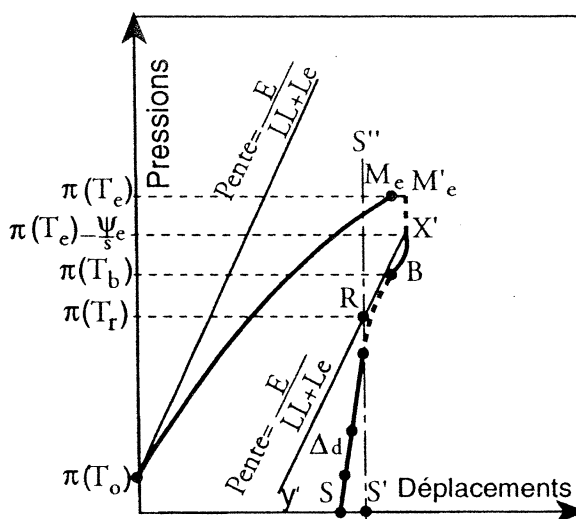


Fig. 5.10.

5.441. Détermination de la traction de fin de blocage

Une construction géométrique simple permet de déterminer la traction de fin de blocage T_f à partir du diagramme de détente (fig. 5.10).

1. Sur la verticale du point M'_e , et en dessous de ce point, on marque un point X' tel que, si Ψ_e désigne les frottements correspondant à $\Pi(T_e)$,

$$M'_e X' = \frac{Y_e}{S}$$

puis, par ce point X', on trace la droite X' Y' de pente $\frac{E}{L_e + L_L}$.

COMMENTAIRE

Si le repère servant aux mesures des déplacements est choisi sur le tirant entre la structure et les mors du vérin, la longueur extérieure L_e est comptée entre la plaque d'appui et le repère. Dans le cas contraire, la longueur extérieure L_e est comptée entre la plaque d'appui et les mors du vérin (cas de la figure 5.07, p. 76).

2. Sur l'axe des déplacements, on marque le point S' à droite du point S tel que :

$$SS' = \frac{L_e \cdot T_r (\text{prévue})}{E \cdot \Omega}$$

SS' représente l'allongement théorique, sous la traction T_r prévue, d'un élément de tirant de longueur L_e , dont l'armature a une section Ω et un module d'élasticité apparent E.

Par ce point S', on trace une droite S' S'' parallèle à l'axe des pressions.

3. L'intersection des droites X'Y' et S' S'' donne un point R dont l'ordonnée est égale à la pression utile dans le vérin (frottements déduits). La traction résiduelle T_r est donc égale à :

$$T_r = S \cdot \Pi (T_r).$$

5.442. Vérification de la traction de service T_s

La traction de service T_s est égale à la traction T_r diminuée des pertes différées probables (article 5.411.12, p. 59)

COMMENTAIRES

1. Alors que la droite S' S'' est déterminée avec une bonne précision, il n'en est pas de même de la droite X' Y' parce que la longueur $M'_e X'$ est évaluée, et que la pente réelle peut être légèrement différente de :

$$\frac{E}{L_e + L_L}$$

De ce fait, la détermination de la traction de fin de blocage T_r ne peut être considérée comme très précise, et une tolérance de 5 % en plus ou en moins est admise sur la valeur trouvée par rapport à la valeur prévue au projet.

2. La méthode du cycle (5.433.12, p. 71), qui conduit à une détermination plus précise de la droite X' Y', permet d'obtenir une valeur plus exacte de la traction de fin de blocage T_r .

5.5. DÉTENTE OU EXTRACTION DES TIRANTS PROVISOIRES

5.51. Lorsque les documents particuliers du marché le stipulent, les tirants provisoires sont extraits, en totalité ou en partie.

5.52. En l'absence de stipulations dans les Documents particuliers du Marché, les tirants provisoires peuvent, à l'initiative de l'entreprise, et avec l'accord du maître d'œuvre, être :

- soit extraits, totalement ou partiellement,
- soit détendus.

S'ils ne sont pas extraits, les tirants provisoires doivent être obligatoirement détendus. Cette détente ne doit être effectuée que lorsque les efforts ainsi libérés peuvent être équilibrés par un organe de substitution.

COMMENTAIRE

Cet organe de substitution est généralement constitué par tout ou partie de la structure.

5.53. Toutes précautions concernant la sécurité du personnel doivent être prises au cours de la détente ou de l'extraction.

CHAPITRE 6

LES ESSAIS DE TIRANTS

6.0. DÉFINITIONS, OBJECTIFS ET OPPORTUNITÉ DES DIFFÉRENTS ESSAIS

6.01. Les différents types d'essais

Suivant les objectifs recherchés, les modalités de leur mode opératoire, la place qu'ils occupent dans le processus de réalisation du projet, on distingue :

- les essais à la rupture (norme NF P 94-153) comprenant :
 - les essais préalables,
 - les essais de conformité,
- les essais de contrôle (norme NF P 94-153),
- les essais de réception, qui ont fait l'objet de l'article 5.433 (p. 69).

Indépendamment du type auquel il appartient, chaque essai consiste à éprouver, plus ou moins sévèrement, la qualité du scellement du tirant au terrain, par application de tractions statiques.

6.02. Objectifs des différents essais Spécifications générales

6.020. Essais à la rupture

L'essai s'effectue sur deux tirants identiques d'une même catégorie selon un mode opératoire défini à l'article 5.21 (p. 52) de la norme NF P 94-

153. Le but premier de l'essai est :

- de vérifier que le tirant peut être soumis à une traction imposée T_S ,
- d'atteindre la rupture du scellement par arrachement pour autant que l'effort de traction limite conventionnelle d'élasticité T_p de l'armature n'ait pas été atteint.

En aucun cas ces tirants ne peuvent être réutilisés ultérieurement comme tirants de service.

Par rapport à la réalisation de l'ouvrage, les essais à la rupture sont appelés :

- **essais préalables** lorsqu'ils sont effectués sur des tirants appartenant à des plots d'essais conçus avant tout démarrage du chantier de construction de l'ouvrage,
- **essais de conformité** lorsqu'ils sont effectués en tout début de chantier sur des tirants intégrés ou non à l'ouvrage (mais non réutilisés ultérieurement comme tirants de service).

6.021. Essais de contrôle

Ces essais sont entrepris pour contrôler statistiquement la qualité d'exécution courante des scellements des tirants de service. Pour cette raison, on limite les tractions d'épreuve auxquelles sont soumis les tirants choisis à des valeurs censées ne provoquer aucune amorce de rupture de scellement.

L'essai de contrôle s'effectue selon un processus défini à l'article 5.2.2 (p. 53) de la norme NF P 94-153.

6.022. Essais de réception

Ce sont les procédures normales auxquelles sont soumis tous les tirants de l'ouvrage préalablement à leur mise en service et qui précèdent l'opération de blocage.

COMMENTAIRE

Il est rappelé que ces essais sont définis à l'article 5.433 (p. 69) des présentes recommandations.

6.03. Opportunité des essais Obligations des divers contractants

6.030. Domaine d'application

Les articles 6.031 à 6.034 (ci-dessous) s'appliquent aussi bien aux tirants provisoires qu'aux tirants permanents.

6.031. Essais préalables

1. Les essais préalables sont obligatoires en cas de scellement dans tous les terrains cohérents susceptibles de fluer pour lesquels l'indice de plasticité I_p est supérieur ou égal à 20, tels que les argiles, les limons et certaines marnes.

COMMENTAIRE

Les essais préalables sont encore obligatoires dans de tels terrains, parce que notre connaissance du comportement des scellements dans ces terrains y est limitée et parce que ces derniers, en restant très vulnérables aux remaniements et aux claquages lors du forage et de l'injection, rendent toute prévision de la capacité portante aléatoire.

2. En dehors des terrains cohérents visés à l'article 6.031.1. (ci-après) précédent, les essais préalables peuvent également être imposés par le Cahier des Clauses particulières, dans l'un des deux cas ci-après :

21. Le maître d'ouvrage désire :

- prendre la mesure des difficultés liées à l'exécution du forage et du scellement dans une formation mal connue ou difficile : éboulis de pente, matériaux faillés ou ouverts, loess, terrains comprenant des obstacles enterrés, nappes en charge, etc.,
- fixer, dans le cadre des grands projets, pour une capacité d'ancrage requise, les paramètres optimaux de l'injection : dosages, quantités de coulis, pressions, nombre de passes,
- apprécier le savoir-faire d'une entreprise chargée de la réalisation des tirants.

Si cependant le maître de l'ouvrage estime possible d'exempter l'entreprise de tels essais, les modalités d'exemption sont précisées dans le Cahier des Clauses particulières (voir article 6.031.3).

22. Un constructeur ou un entrepreneur propose un tirant dont la technologie est nouvelle, ou peut être considérée comme telle (cas de systèmes mis en œuvre à l'étranger mais non utilisés en France). L'essai préalable auquel sera soumis ce nouveau tirant consistera alors non seulement à éprouver la tenue de son scellement au terrain mais aussi à vérifier la fiabilité de la conception d'ensemble ainsi que la qualité de sa protection contre la corrosion. Dans ce cas particulier, on exigera que l'essai préalable proprement dit soit complété par le déterrement de la totalité de l'ancrage afin d'effectuer un contrôle visuel des différents composants et de leur fonctionnement sous sollicitation.

3. Lorsqu'une possibilité d'exemption est prévue par le Cahier des Clauses particulières, ce dernier précise dans quelles conditions le maître d'œuvre peut exempter l'entreprise des essais préalables (références de l'entreprise, expérience du système proposé dans des terrains et dans des conditions d'emploi analogues, qualification du personnel, etc.). Dans ce cas, c'est l'entrepreneur qui, sous sa propre responsabilité, demande à en bénéficier. Le maître d'œuvre tranche en dernier ressort.

REMARQUE IMPORTANTE

Conformément à l'article 6.032, ci-après, l'entrepreneur, lorsqu'il est dispensé d'effectuer des essais préalables, est tenu d'exécuter les essais de conformité définis à l'article 6.2 (p. 100).

4. L'exécution matérielle des essais préalables, le dépouillement et l'interprétation des résultats incombent à l'entrepreneur, qui propose ses conclusions au maître d'œuvre. Ce dernier doit donner son accord avant toute exécution des travaux.

6.032. Essais de conformité

1. Les essais de conformité sont obligatoires :

- en l'absence d'essais préalables, sauf dans les cas visés à l'article 6.032.3 ci-après,

COMMENTAIRE

Cela peut correspondre à l'une ou l'autre des circonstances ci-après :

- les documents particuliers du marché ne prévoient pas d'essais préalables,
 - les documents particuliers du marché prévoyaient une possibilité d'exemption des essais préalables (articles 6.031.3) et l'entreprise en a bénéficié.
- en présence d'essais préalables, dans le cas visé à l'article 6.032.4 ci-après.

2. L'exécution matérielle des essais de conformité, le dépouillement et l'interprétation des résultats incombent à l'entrepreneur, qui propose ses conclusions au maître d'œuvre. Ce dernier doit donner son accord avant toute exécution des travaux.

3. Pour des tirants provisoires de moins de neuf mois réalisés dans des terrains bien connus présentant obligatoirement un indice de plasticité I_p inférieur à 20, l'entreprise pourrait être dispensée d'exécuter des essais de conformité à condition qu'elle présente à la fois :

- un plan d'assurance qualité accepté par le maître d'œuvre,
- au moins deux essais à la rupture (préalables ou de conformité) réalisés par elle-même à proximité du chantier, dans des terrains de même structure géologique et de même compacité, avec des techniques de mise en œuvre équivalentes, et pour des efforts analogues.

Bien entendu, ces essais auront satisfait aux critères de réception des articles 6.18 (p. 96) ou 6.25 (p. 101) et auront été approuvés par le maître d'œuvre.

En contrepartie de cette dispense, l'entreprise :

- ou bien exécutera en début de chantier deux essais de contrôle supplémentaires,
- ou bien installera une instrumentation par cales dynamométriques.

4. Dans le cas où l'entreprise chargée de réaliser les tirants de l'ouvrage n'est pas la même que celle qui a exécuté les essais préalables, la nouvelle entreprise est tenue de procéder à des essais de conformité.

6.033. Essais de contrôle

1. Les essais de contrôle sont obligatoires.

COMMENTAIRE

Cette obligation se justifie par la nécessité de contrôler statistiquement la qualité d'exécution courante des scellements des tirants de service. Elle se justifie en outre lorsque sont apparus, lors de la mise en œuvre de certains tirants d'ancrage de l'ouvrage, des incidents ou difficultés remettant en cause les conclusions tirées des essais préalables ou de conformité.

2. L'exécution matérielle des essais de contrôle, le dépouillement et l'interprétation des résultats incombent à l'entrepreneur, qui en soumet les conclusions au maître d'œuvre.

6.034. Essais de réception

Les essais ou procédures de réception sont toujours nécessaires puisqu'ils font partie du processus de mise en service du tirant.

Il est rappelé que ces essais ne constituent pas une vérification du coefficient de sécurité présenté par le tirant.

6.035. Récapitulation

Il résulte des articles 6.031 à 6.034 (p. 86 à 88) que, sur un même projet, mais à différentes périodes de sa réalisation, il sera, sauf pour les exceptions visées aux articles 6.032.3 et 6.032.4 (ci-avant), effectué trois types d'essais, résumés par le tableau ci-après :

Cas où les essais préalables sont rendus obligatoires	Cas où les essais préalables ne sont pas rendus obligatoires
<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">ESSAIS PRÉALABLES</div> <div style="text-align: center; margin: 5px 0;"> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">ESSAIS DE CONTRÔLE</div> <div style="text-align: center; margin: 5px 0;"> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">ESSAIS DE RÉCEPTION</div> </div>	<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">ESSAIS DE CONFORMITÉ</div> <div style="text-align: center; margin: 5px 0;"> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">ESSAIS DE CONTRÔLE</div> <div style="text-align: center; margin: 5px 0;"> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">ESSAIS DE RÉCEPTION</div> </div>

6.1. ESSAIS PRÉALABLES

6.11. Objet des essais préalables

L'objet des essais préalables est indiqué à l'article 6.020 (p. 83).

6.12. Non-réutilisation des tirants d'essai

Il est rappelé qu'en aucun cas les tirants d'essai ne doivent être utilisés ultérieurement comme tirants de service.

6.13. Nombre de tirants d'essai à prévoir

6.130. Considérations générales

Chaque fois que des essais préalables de tirants sont prévus ou décidés, le nombre minimal des tirants d'essai doit être déterminé en fonction des règles et considérations ci-après :

1. En fonction du rôle qu'ils assument dans la stabilité de l'ouvrage, les tirants sont classés en catégories. Il doit y avoir autant de séries d'essais qu'il y a de catégories différentes de tirants.

COMMENTAIRE

Cela signifie que tous les tirants qui assument la même fonction dans la stabilité d'un ouvrage appartiennent à la même catégorie. Par suite, dans un même ouvrage, les tirants verticaux permanents qui assurent la stabilité du radier n'appartiennent pas à la même catégorie que les tirants inclinés qui maintiennent la paroi verticale de soutènement.

2. Dans une même catégorie de tirants, il se peut que tous les ancrages ne soient pas réalisés dans le même terrain. Il faut alors prévoir, dans chaque catégorie, autant de séries d'essais qu'il y a de natures différentes de terrains nécessitant des essais préalables.

COMMENTAIRE

Ce cas peut se produire pour des ancrages disposés suivant plusieurs nappes superposées.

3. Il est impossible d'interpréter valablement des résultats d'essai effectué sur un tirant unique.

4. Un essai ne peut être considéré comme représentatif que si le nombre de tirants d'essai croît avec l'importance de l'ouvrage, donc avec le nombre de tirants prévus au projet.

6.131. Nombre minimal de tirants d'essai

1. Le nombre total de tirants prévus pour l'ouvrage à réaliser est réparti en catégories conformément à l'article 6.130.1 (p. 89) et à son commentaire.

2. Dans chaque catégorie, les tirants sont répartis en sous-catégories selon la nature du terrain dans lequel ils sont scellés.

3. Compte tenu des critères fixés ci-dessus, le nombre minimal N de tirants d'essai à prévoir en fonction du nombre n de tirants compris dans chaque sous-catégorie (telle qu'elle est définie à l'article 6.131.2, ci-dessus) est indiqué par le tableau ci-après :

n	N	n	N
1 à 200	2	1 001 à 2 000	5
201 à 500	3	2 001 à 4 000	6
501 à 1 000	4		

COMMENTAIRE

Les schémas ci-après illustrent deux cas :

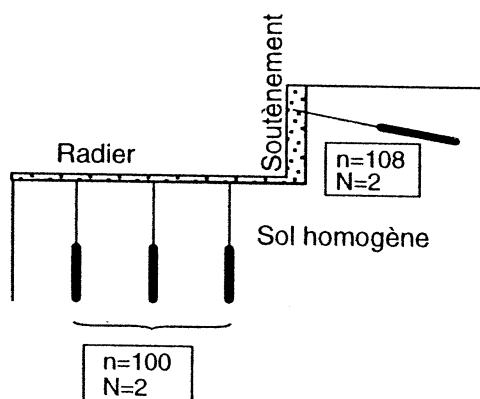


Fig. 6.01. — Cas du sol homogène

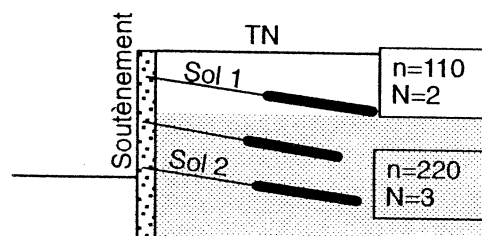


Fig. 6.02. — Cas du bicouche

6.14. Date de réalisation des essais

6.140. Généralités

Il est indispensable que la réalisation des tirants d'essai soit prévue suffisamment longtemps avant l'exécution industrielle des tirants de l'ouvrage.

Ce délai est imposé par :

- l'exécution des tirants d'essai,
- le temps de durcissement du scellement et, éventuellement, de la structure d'appui,
- le temps nécessaire aux essais proprement dits,
- le dépouillement et l'interprétation des résultats.

6.141. La réalisation industrielle des travaux de tirants ne doit en aucun cas être entreprise avant l'interprétation des essais et l'approbation du projet d'exécution.

COMMENTAIRE

Il est rappelé que la succession de toutes les opérations énumérées à l'article 6.140, ci-dessus, peut représenter un délai de plusieurs semaines.

6.15. Emplacements des tirants d'essai

Les tirants d'essai doivent être implantés sur le terrain de façon qu'ils soient aussi représentatifs que possible de la catégorie (et éventuellement, de la sous-catégorie) à laquelle ils appartiennent.

En particulier, il est important que la zone d'ancrage corresponde à celle des tirants à venir et que l'inclinaison soit sensiblement la même.

COMMENTAIRE

Ceci est particulièrement important pour les terrains stratifiés ou pour des couches de terrain d'ancrage de faible puissance.

6.16. Exécution des tirants d'essai et des massifs d'appui éventuels

6.160. Tirants d'essai

1. Sauf en ce qui concerne leur section d'acier, qui peut être surabondante suivant les cas visés à l'article 6.160.2 ci-après, les tirants d'essai doivent être conformes à ceux dont la réalisation est prévue.

Cette conformité concerne en particulier :

- les méthodes de perforation,
- la longueur et le niveau de la partie scellée,
- les techniques de fabrication, de mise en place et de scellement du tirant.

Dans le cas où le scellement des tirants d'essai s'effectue dans le rocher, il convient également de respecter pour ces tirants le même diamètre de forage que celui qui est prévu pour les travaux à venir. Toutefois, dans le cas de scellement dans des sols meubles, qui sont toujours plus ou moins compressibles, le diamètre du forage des tirants d'essai peut, si cela est nécessaire, être supérieur de 20 % au maximum, à celui qui est envisagé pour les tirants ultérieurs.

COMMENTAIRES

1. Lorsque le but recherché par l'essai est la rupture du scellement, il faut effectuer cet essai avec un tirant dont la section d'acier est nettement supérieure à celle qui est nécessaire, afin que la traction maximale sollicitant celui-ci reste inférieure à $0,9 T_p$ (car au-delà de cette valeur le fluage de l'acier devient important). Or, souvent, cela implique de prévoir un câble d'essai de plus gros diamètre, donc d'exécuter, pour le passage de ce câble, un diamètre de forage plus important. Tant que cette augmentation du diamètre de forage reste modérée, elle n'a qu'une faible incidence sur les résultats de l'essai, puisque le diamètre du bulbe de scellement dépend de la compressibilité du sol et de la pression maximale d'injection.
2. Deux facteurs, en revanche, peuvent avoir une grande influence sur la rupture du scellement :
 - la méthode de perforation (en particulier dans les terrains cohérents) : il est donc indispensable d'utiliser pour les tirants d'essai une méthode de perforation identique à celle des tirants à venir ;

- la pression maximale d'injection : celle qui est atteinte lors de l'essai préalable doit être aussi proche que possible de celle qui sera utilisée par la suite pour l'ensemble du chantier.

Hormis le cas de scellement au rocher, les trous des forages destinés à une reconnaissance préalable du terrain ne peuvent être réutilisés tels quels pour servir de logement aux tirants d'essai.

2. Choix de la capacité maximale du tirant d'essai

Généralités

Ce choix s'effectue :

- soit en fonction d'une traction de service connue *a priori* et pour laquelle on désire vérifier un coefficient de sécurité (article 6.160.21),
- soit en fonction de la capacité maximale que l'on peut obtenir pour le terrain considéré et pour le type de tirant donné (article 6.160.22).

21. Dans le cas où il s'agit de vérifier un coefficient de sécurité, on ne recherche pas obligatoirement la rupture. Si F_t est le coefficient de sécurité propre au tirant (article 2.22, p. 10), on adopte comme capacité du tirant d'essai la valeur $T_S \times F_t$

La section de l'acier du tirant est alors choisie de telle sorte que la traction maximale de l'armature pour la capacité donnée ne dépasse pas $0,9 T_p$:

$$T_S \times F_t \leq 0,9 T_p$$

T_p étant la traction correspondant à la limite élastique de l'armature du tirant utilisée pour l'essai.

22. Dans le second cas, on recherche la rupture du scellement.

Si T_{est} est la traction limite estimée par l'entreprise ou le bureau d'études en fonction du terrain et du type de tirant, la section de l'armature est choisie de façon que :

$$1,5 T_{est} \leq T_p$$

T_p étant la valeur correspondant à la limite élastique de l'armature du tirant utilisée pour l'essai.

6.161. Massifs d'appui

La structure d'appui (paroi, radier, massif, etc.) n'étant généralement pas encore réalisée lors de l'exécution des essais préalables de tirants, il convient de concevoir les massifs d'appui de façon à réduire le plus possible leurs déplacements et de mesurer ces derniers par rapport à des repères fixes non liés aux massifs.

COMMENTAIRE

Cette mesure des déplacements, qui n'est pas *a priori* indispensable pour l'interprétation des résultats, permet cependant de détecter des rotations du massif pouvant entraîner des corrections de mesure.

La mesure du déplacement du massif devient nécessaire pour les essais de longue durée réalisés par calage de la tête et retrait du vérin. Elle permet d'attribuer les pertes de traction constatées dans le tirant, soit au déplacement de l'appui, soit au fluage du scellement.

6.17. Matériel et appareillage pour la réalisation des essais préalables

6.170. Généralités

L'interprétation des mesures en cours d'essai étant facilitée par la précision de celles-ci, il est indispensable d'avoir un matériel de mesure précis et sensible.

L'emploi sur chantiers de certains matériels de mesure délicats peut nécessiter l'utilisation d'abris.

6.171. Mesure des déplacements

Le déplacement en tête du tirant doit être mesuré par rapport à un point rigoureusement fixe, avec la précision indiquée dans la norme NF P 94-153.

Ce point fixe doit être extérieur à la zone sollicitée par les efforts du tirant et demeurer insensible à toute déformation propre.

COMMENTAIRE

Ce point fixe peut être constitué par un profilé en acier, fiché verticalement de 1 à 3 mètres dans le sol (fig. 6.03).

Il peut être nécessaire d'abriter ce profilé pour éviter ses déformations en fonction de la température.

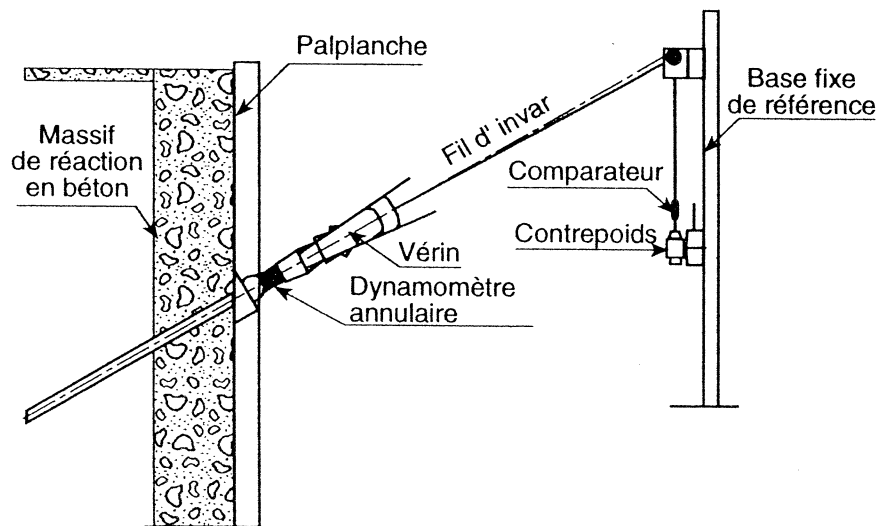


Fig. 6.03.

Toute circulation d'engins est interdite dans le voisinage immédiat (rayon de 10 mètres) du point fixe.

6.172. Mesure des charges

Les charges sont mesurées par une cale dynamométrique adaptée à la traction maximale prévue.

La cale dynamométrique et l'appareil de mesure associé doivent donner les charges avec une précision telle que l'incertitude sur la mesure ne dépasse pas la valeur maximale fixée par la norme NF P 94-153.

6.173. Remarque concernant la mesure des déplacements et des charges

Il y a toujours intérêt à enregistrer les déplacements en fonction des charges et chacune de ces deux quantités en fonction du temps.

Ces enregistrements permettent de détecter des anomalies passagères ou des comportements masqués par des mesures ponctuelles.

Ils ne dispensent pas, toutefois, d'effectuer les mesures ponctuelles, qui sont généralement beaucoup plus précises.

6.174. Appareillage de mise en tension

Le dispositif de réglage du débit de la pompe doit être suffisamment fin pour permettre de corriger de très faibles variations de traction. Pour vérifier le maintien des charges constantes, il est nécessaire que les vérins soient en bon état et ne présentent pas de fuites.

6.175. Remarque : mesure des efforts le long du scellement

Bien que cette mesure ne soit nullement obligatoire, elle peut considérablement valoriser, dans certains cas, l'ensemble des conclusions que l'on tire des essais préalables. Compte tenu de l'intérêt que présentent ces mesures, on s'efforcera, chaque fois que cela sera possible (grands projets, tirants de technologie nouvelle, sols cohérents), de doter d'appareils de mesure les scellements des tirants soumis aux essais préalables. On peut recommander, pour tenter de connaître la distribution des efforts le long d'un scellement et leur loi de mobilisation, de recourir à des jauges ou à des extensomètres amovibles. La mise en œuvre du matériel de mesure, la réalisation des essais et l'interprétation des résultats doivent être le fait d'une équipe spécialisée (entreprise, laboratoire, bureau d'études, etc.).

6.18. Mode opératoire des essais préalables et interprétation des résultats

6.180. Généralités

Le mode opératoire des essais préalables consiste à mesurer les déplacements de la tête d'ancrage au cours de paliers de chargement de valeurs croissantes ou décroissantes.

La valeur des paliers est définie, pour le premier tirant, par rapport à la traction T_p correspondant à la limite élastique de l'armature utilisée lors

de l'essai. Pour le second tirant, elle est définie par rapport aux résultats du premier.

6.181. Conduite des essais – Précautions à prendre

Les essais doivent être effectués par un personnel qualifié, sous la direction d'un technicien expérimenté, l'interprétation des résultats des essais devant être faite au fur et à mesure de leur déroulement.

En outre, les plus grandes précautions doivent être prises pour éviter les accidents corporels consécutifs à une éventuelle rupture prématurée de l'armature du tirant.

COMMENTAIRE

Le choix de la section de l'armature a été effectué pour que la rupture du scellement se produise normalement avant la rupture de l'acier.

6.182. Processus général des essais

Il est rappelé que les tirants d'essai pour un terrain donné et pour un type de tirant donné sont toujours au moins au nombre de deux.

Le processus général des essais consiste :

- à obtenir pour le premier tirant les courbes de fluage à une heure pour des paliers de charges croissantes et à déterminer à partir de ces courbes une traction critique de fluage ou une traction limite de scellement,
- à déterminer pour le second tirant, à partir de la traction (critique ou limite) résultant des essais du premier, la valeur des paliers de chargement.

COMMENTAIRE

Ce processus permet de standardiser les essais préalables de tirants, que la traction de service soit connue ou non.

6.183. Mode opératoire des essais du premier tirant

Il est défini par la norme NF P 94-153 (essais à la rupture).

6.184. Interprétation des résultats de l'essai du premier tirant

Elle s'effectue conformément aux indications de la norme NF P 94-153.

COMMENTAIRE

La norme indique la méthode graphique de détermination de la charge critique de fluage à partir de la pente des courbes représentatives du fluage. Seul est représenté dans la norme le cas où le graphique ne présente pas d'anomalies (la figure de la norme est reproduite ci-dessous sous le numéro 6.04). Mais ce graphique peut présenter des anomalies (fig. 6.05). Il convient alors d'en chercher la raison, et cela peut conduire à réaliser un tirant d'essai supplémentaire.

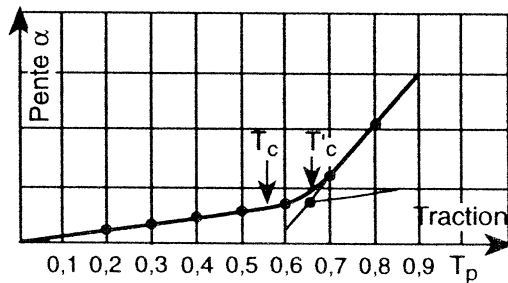


Fig. 6.04. — Traction critique

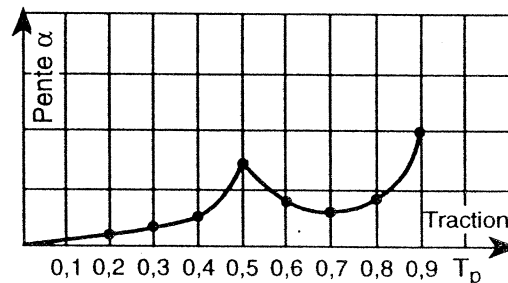


Fig. 6.05 — Diagramme comportant une anomalie

6.185. Mode opératoire des essais du second tirant

Il est également défini dans la norme NF P 94-153.

6.186. Interprétation des résultats des essais du second tirant

Elle s'effectue conformément aux indications de la norme NF P 94-153.

COMMENTAIRE

La norme précise que :

- la charge critique de fluage T_c retenue est la plus petite des deux valeurs obtenues avec chacun des deux tirants,
- l'effort de traction limite conventionnelle par rupture du scellement T_u sera pris égal à la plus petite des deux valeurs obtenues avec chaque tirant,
- lorsque l'écart entre les deux charges critiques T_{c1} et T_{c2} , ou entre les efforts T_{u1} et T_{u2} est supérieur à 20 %, cela peut indiquer une anomalie.

En fait, le problème est plus complexe, car il est possible que l'on ait pu obtenir T_c ou T_u pour le premier, sans l'obtenir pour le second.

Comme la norme ne permet pas de poursuivre l'essai du second tirant d'une manière différente de celui du premier, il convient de chercher les causes de l'anomalie décelée. Parmi ces causes, il peut y avoir :

- un terrain différent pour le second tirant,
- une réalisation défectueuse du second tirant, etc.

Cela peut donc conduire à réaliser un troisième tirant, avec un processus d'essai éventuellement différent de celui qui est prévu par la norme.

6.187. Recherche de la traction de service

1. 1^{er} cas : la courbe de fluage du second tirant est linéaire

11. Deux critères doivent être satisfaits simultanément :

- La courbe doit avoir une bonne concordance avec celle qui a été obtenue, pour une même valeur de la traction, lors des essais du premier tirant.
- Il n'y a pas d'écart supérieur à 20 % par rapport à la valeur moyenne :
 - entre T_{c1} et T_{c2} d'une part,
 - entre T_{u1} et T_{u2} d'autre part.

12. Si ces deux critères sont satisfaits, on adopte comme traction de service la plus faible des valeurs ci-après :

- tirants provisoires : $0,9 T_{c1}$, $0,9 T_{c2}$; T_S ; $2/3 T_{u1}$; $2/3 T_{u2}$
- tirants permanents : $0,8 T_{c1}$; $0,8 T_{c2}$; T_S ; $2/3 T_{u1}$; $2/3 T_{u2}$

13. Lorsque la pente de la courbe de fluage du second tirant est nettement plus forte que celle qui résulte de l'essai du premier, il convient d'en déterminer la raison et, éventuellement, de choisir une traction de service réduite.

2. 2^e cas : la courbe de fluage du second tirant n'est pas linéaire et présente une concavité tournée vers le bas

Le tirant est alors refusé, à moins que des essais effectués sur un troisième tirant ne montrent qu'il s'agit d'un résultat aberrant.

6.2. ESSAIS DE CONFORMITÉ

6.20. Généralités

Les essais de conformité doivent avoir lieu en début de chantier sur des tirants qui sont exécutés dans les mêmes conditions que celles qui sont prévues à la note technique d'exécution (méthodes de perforation, longueur libre et longueur de scellement, armatures, méthodes d'injection).

L'ouvrage à ancrer servant cette fois de massif de réaction pour la réalisation des essais de conformité, on doit s'assurer que l'ouvrage :

- est dimensionné pour ne subir aucun désordre lors de l'application des tractions maximales d'essais,
- intègre des réservations en surnombre destinées à recevoir ces tirants d'essais.

Chaque fois que cela est possible, l'essai doit être poursuivi jusqu'à la rupture du scellement.

REMARQUE

Il est rappelé que les tirants destinés aux essais de conformité ne peuvent, en aucun cas, être réutilisés.

6.21. Nombre de tirants d'essai à prévoir

Comme dans le cas des essais préalables, les tirants de l'ouvrage sont classés en différentes catégories suivant le rôle qu'ils assument (tirants verticaux pour les radiers et tirants inclinés pour les parois verticales de soutènement) et la nature du terrain dans lequel ils sont scellés.

COMMENTAIRE

La présence d'une nappe, dans le terrain où doivent être exécutés les tirants, peut éventuellement conduire à créer deux catégories de tirants :

- ceux dont les têtes sont situées au-dessus du niveau statique de la nappe,
- ceux dont les têtes sont au-dessous.

Pour chaque catégorie de tirants, le nombre minimal d'essais de conformité à prévoir est de deux.

6.22. Date de réalisation des essais

Les essais de conformité sont entrepris après que l'ouvrage à ancrer a été terminé et que le durcissement des scellements est suffisant.

6.23. Matériel et appareillage d'essais

Lors des essais de conformité, on utilise, pour effectuer les mesures définies à l'article 6.24 ci-dessous, le matériel et l'appareillage prescrits pour les essais préalables (voir article 6.17, p. 94).

6.24. Mode opératoire des essais de conformité

Les essais de conformité s'effectuent selon le même processus que celui des essais préalables. Ce processus est défini dans la norme NF P 94-153, à l'article concernant les essais à la rupture.

6.25. Interprétation des résultats – Critère de réception des tirants

Au fur et à mesure qu'ils sont connus, les résultats sont présentés sous forme de courbes de fluage comme pour l'essai préalable (voir la norme précitée).

Les tirants sont considérés comme acceptables si les critères ci-après sont vérifiés :

6.251. Le déplacement Δe de la tête du tirant au cours du dernier palier de chargement de une heure, mesuré entre les temps $t + 5$ min et $t + 60$ min, ne doit pas dépasser la plus petite des deux valeurs suivantes :

$$\Delta e \leq 10^{-4} \cdot L_L$$

où L_L est la longueur libre théorique du tirant

$$\Delta e \leq 1 \text{ mm.}$$

Lorsque le critère précédent n'est pas satisfait, on retient comme traction de service T_s la traction pour laquelle Δe ne dépasse pas la plus petite des deux valeurs ci-dessus.

6.252. Si les tractions critiques de fluage T_c sont atteintes au cours des essais de conformité, la traction de service T_s ne doit pas être supérieure à :

$$T_s \leq 0,9.T_c \text{ pour les tirants provisoires,}$$

$$T_s \leq 0,8.T_c \text{ pour les tirants permanents.}$$

6.3. ESSAIS DE CONTRÔLE

6.30. Généralités

Il est rappelé que les essais de contrôle sont réalisés en cours de travaux sur des tirants faisant partie de l'ouvrage en vue de vérifier la qualité d'exécution des scellements.

6.31. Nombre de tirants d'essai

Il est réalisé un essai de contrôle par série de quarante tirants, avec un nombre minimal de trois essais par chantier.

6.32. Matériel et appareillage d'essais

On utilise le matériel et l'appareillage de mesure prescrits à l'article 6.17 (p. 94) pour l'essai préalable.

6.33. Mode opératoire des essais de contrôle

La mise en tension des tirants d'essai s'effectue par étapes successives jusqu'à la traction d'épreuve T_e suivant les modalités définies par la norme NF P 94-153.

La traction d'épreuve T_e est prise égale à :

$$T_e = 1,15 T_s \text{ pour les tirants provisoires,}$$

$$T_e = 1,25 T_s \text{ pour les tirants permanents.}$$

COMMENTAIRE

La norme NF 94-153 indique que la traction d'épreuve T_e est maintenue une heure. Toutefois, s'il le juge utile, le responsable de l'exécution des essais peut prolonger cette durée, sous réserve de l'accord du maître d'œuvre.

6.34. Critères de réception des tirants soumis aux essais de contrôle

6.341. Sous la traction d'épreuve T_e , les tirants soumis aux essais de contrôle doivent satisfaire la condition ci-après :

L'allongement Δe mesuré entre le temps $t_0 + 5$ min et $t_0 + 60$ min ne doit pas dépasser :

- 1,25 mm pour les tirants provisoires,
- 1 mm pour les tirants permanents.

6.342. Si cette condition n'est pas vérifiée, le tirant est réputé non valable pour son usage.

CHAPITRE 7

CONTRÔLE PÉRIODIQUE DE LA TRACTION

7.1. OPPORTUNITÉ DE PROCÉDER À UN TEL CONTRÔLE

Le contrôle de la traction des tirants permanents et des tirants provisoires d'une durée supérieure à dix-huit mois est obligatoire.

COMMENTAIRE

Bien que le système d'ancrage par tirants constitue un procédé sûr et d'usage courant, il est nécessaire de prévoir un dispositif de contrôle statistique qui permette de déceler à temps d'éventuelles défaillances.

Pour les tirants provisoires d'une durée inférieure ou égale à dix-huit mois, il appartient au Cahier des Clauses particulières de préciser si ce contrôle est exigé ou non, compte tenu des particularités de l'ouvrage, et d'en fixer les modalités.

7.2. MODALITÉS DE CONTRÔLE DES TIRANTS PERMANENTS

7.21. Prise en charge du contrôle

Le premier contrôle des tirants est à la charge de l'entreprise. Sauf dispositions contraires du Cahier des Clauses particulières, les contrôles ultérieurs sont à la charge du maître de l'ouvrage ou du propriétaire de l'ouvrage.

7.22. Durée et fréquence du contrôle

Le contrôle est d'abord trimestriel, le dernier contrôle trimestriel ayant lieu un an après la dernière mise en tension des tirants de l'ouvrage. Au-delà, il devient annuel et s'étend pendant toute la durée de vie de l'ouvrage (voir article 8.5, p. 113).

7.23. Dispositif de contrôle

7.230. Définition du dispositif

Un certain nombre de tirants de l'ouvrage ancré doivent être équipés d'un appareil de contrôle.

Chaque tirant ainsi équipé doit être, en outre, équipé d'un type d'appareil permettant la mesure directe de la traction subsistante, par la remise en tension, pendant toute la durée d'exploitation de l'ouvrage.

À chaque tirant équipé d'appareil de contrôle sont associés deux tirants témoins parmi les tirants de service de la même catégorie (article 6.130, p. 89) et implantés dans son voisinage immédiat. Les tirants témoins sont équipés également d'un type d'appareil permettant la remise en tension.

COMMENTAIRE

Une modification de traction dans le tirant indiquée par l'appareil de contrôle peut provenir soit d'un changement effectif dans la traction du tirant, soit d'un fonctionnement défectueux de l'appareil.

Dans l'hypothèse où l'appareil de contrôle démontre une anomalie effective de comportement du tirant, le contrôle direct de la tension de ce dernier et celui des deux tirants témoins permettent d'apporter des éléments complémentaires d'analyse et de décision quant aux éventuelles mesures à prendre pour rétablir une situation normale de l'ouvrage ancré.

Les choix, d'une part, de l'implantation de chaque tirant équipé d'appareil de contrôle et de ses deux tirants témoins, et, d'autre part, du type de protection contre la corrosion des tirants et plus particulièrement de leurs têtes d'ancrage doivent tenir compte de la nécessité éventuelle de leur remise en tension pendant la durée d'exploitation de l'ouvrage.

COMMENTAIRE

Il est rappelé que la remise en tension est une opération délicate qui doit, dans toute la mesure du possible, être confiée à l'entreprise qui a réalisé les tirants.

7.231. Distribution et nombre des appareils de contrôle

Dans chaque ouvrage, les tirants sont classés en catégories, en fonction du rôle qu'ils assument dans la stabilité de l'ouvrage (article 6.130, p. 89).

Dans chaque catégorie, le nombre minimal de tirants à contrôler, c'est-à-dire le nombre minimal de tirants devant être équipés d'un appareil de contrôle, est fixé comme suit :

- 10 % du nombre des tirants compris dans la tranche de 1 à 50,
- 7 % du nombre des tirants compris dans la tranche de 51 à 100,
- 5 % du nombre des tirants compris dans la tranche commençant à 101.

Le nombre global est obtenu en cumulant les nombres, entiers ou non, calculés dans chacune des tranches ci-dessus, et en arrondissant à l'unité supérieure le total trouvé.

COMMENTAIRE

Le nombre N de dispositifs de contrôle à prévoir en fonction du nombre total n de tirants dans chaque catégorie est donné par le tableau ci-après.

Au-delà de 250, prévoir un dispositif de contrôle supplémentaire par tranche de 20 ou par fraction de 20 tirants.

n	N	n	N
1 à 10	1	93 à 110	9
11 à 20	2	111 à 130	10
21 à 30	3	131 à 150	11
31 à 40	4	151 à 170	12
41 à 50	5	171 à 190	13
51 à 64	6	191 à 210	14
65 à 78	7	211 à 230	15
79 à 92	8	231 à 250	16

7.232. Critères de choix des appareils de contrôle

Les appareils de contrôle doivent être fiables, simples et adaptés à la traction du tirant. Ils doivent donner une évaluation de la traction à $\pm 10\%$ près.

Le Cahier des Clauses particulières peut prévoir des dispositifs complémentaires destinés à assurer l'automatisme du système de contrôle (par exemple : voyants lumineux réglés sur des variations de traction admissibles pour l'ouvrage ou pour les tirants).

COMMENTAIRES

1. Les appareils de contrôle permanent permettant la mesure des variations d'une grandeur induite par l'effort de traction dans le tirant présentent inévitablement un pourcentage de défaillance de fonctionnement du même ordre que celui des appareils de mesure *in situ* basés sur les mêmes principes.
2. À titre indicatif, une variation de 20 % de la traction d'un tirant dans une structure mérite d'attirer l'attention.
3. Le fait de réunir sur un même tableau la signalisation automatique des divers dispositifs de contrôle conduit à une dépense initiale plus importante, mais permet de diminuer les difficultés, la durée et, par suite, le coût de chacune des visites périodiques ultérieures.

7.233. Nature des appareils de contrôle et mode opératoire

Les appareils de contrôle, propres à chaque procédé, doivent être décrits dans la notice technique.

CHAPITRE 8

RECOMMANDATIONS À L'USAGE DES MAÎTRES D'OUVRAGES

8.1. PRÉAMBULE

Les tirants à caractère provisoire ou permanent, destinés à ancrer des ouvrages de génie civil avec diverses finalités (murs de soutènement temporaires ou définitifs, massifs de poids insuffisants, points isolés tels que poteaux ou pylônes, radiers soumis à des pressions hydrostatiques éventuellement variables, etc.), sont de plus en plus utilisés, aussi bien dans le domaine de la construction que dans celui des travaux publics, en raison des avantages nombreux que cette technique apporte.

Il apparaît donc utile, voire nécessaire, d'attirer, de façon toute particulière, l'attention des maîtres d'ouvrages et de leurs conseils sur un certain nombre de données qui caractérisent les tirants d'ancrage.

8.2. TECHNOLOGIE DES TIRANTS

Il s'agit, dans le cas présent, d'un domaine où la technologie joue un rôle fondamental ; en effet :

- la méthode qui sera employée pour exécuter le forage dans lequel le tirant sera ultérieurement mis en place,
- le diamètre de ce forage, par rapport à celui du tirant,
- le mode de façonnage du tirant,
- son mode de scellement,
- la qualité du personnel chargé de la mise en œuvre, sa compétence, son expérience, ses références,

sont autant de critères qu'il convient de prendre en considération.

8.3. PROTECTION CONTRE LA CORROSION

Le tirant constituant pour l'essentiel pendant sa durée d'utilisation un ouvrage enterré, sa protection contre la corrosion présente naturellement un caractère vital.

Il faut, en particulier, veiller à ce que cette protection soit bien assurée à la liaison entre la tête du tirant et l'extrémité de la partie libre, qui constitue le point où le tirant présente le plus d'exposition à la corrosion (article 4.6, p. 41).

Dans le cas où il serait nécessaire d'enlever provisoirement la protection des têtes d'ancrage, il conviendra de veiller à ce que celle-ci soit restaurée.

8.4. ESSAIS

En dépit du sérieux avec lequel l'étude de sol aura été conduite, il existera toujours des circonstances où les terrains dans lesquels les tirants doivent être scellés sont insuffisamment connus. À cela s'ajoute la technologie même des tirants (voir article 8.2, ci-avant). Il importe donc que

les maîtres d'ouvrages veillent à faire exécuter les essais de traction prévus par ces recommandations. Leur attention est attirée tout particulièrement sur le fait que l'application des méthodes de prédimensionnement explicitées dans l'annexe 3 des présentes recommandations ne peut en aucun cas exonérer l'entreprise des essais de traction précités. Ces méthodes peuvent en revanche être très utiles pour apprécier rapidement le bien-fondé d'un avant-projet sommaire.

8.5. CONTRÔLES PÉRIODIQUES DANS LE TEMPS

Pour des tirants d'une durée de vie supérieure à dix-huit mois, le maître de l'ouvrage doit faire procéder à un contrôle systématique de la tension sur un certain nombre des tirants posés et, à cette fin, se soucier de l'accessibilité ultérieure des tirants ainsi désignés (chapitre 7, p. 107).

Lorsqu'il sera amené à transmettre la propriété de l'ouvrage ancré, il devra parallèlement transmettre également au futur exploitant, au travers du règlement de propriété, toutes les informations requises sur les contraintes et consignes inhérentes à ces tirants.

8.6. AUTORISATIONS DE POSE, REDEVANCES

Dans le cas le plus général, les tirants périphériques à l'ouvrage à construire sont implantés sous des propriétés riveraines ou sous le domaine public.

Il appartient donc aux maîtres d'ouvrages d'obtenir les autorisations préalables nécessaires à la pose des tirants auprès des propriétaires des terrains concernés et de régler les redevances que cette mise en place peut entraîner.

8.7. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES PARTICULIÈRES CONCERNANT LES STRUCTURES ANCRÉES

8.71. Dans les ouvrages exceptionnels ou susceptibles d'être modifiés ultérieurement, ou ceux dont l'environnement est susceptible de se modifier, le maître de l'ouvrage peut être amené à prévoir une conception utilisant des critères de sûreté et consistant, par exemple, à répartir, en cas de rupture accidentelle d'un tirant, la réaction correspondante en surtensions provisoires sur un nombre suffisant de tirants voisins. L'exécution d'un ou de plusieurs tirants supplémentaires doit alors être envisagée dans les plus brefs délais pour mettre fin à ces surtensions.

8.72. Dans les cas, visés à l'article 8.71 (ci-avant), où il deviendrait nécessaire d'exécuter ultérieurement un ou plusieurs tirants supplémentaires, le maître de l'ouvrage doit avoir le souci de faire ménager à l'avance, dans le corps de la structure ancrée, un certain nombre de points à partir desquels de nouveaux tirants pourraient être éventuellement installés. Les emplacements retenus doivent être suffisamment accessibles pour permettre, d'une part, la mise en place d'un appareil de forage et, d'autre part, la réalisation, sans difficultés excessives, des opérations de mise en œuvre du ou des nouveaux tirants.

8.73. Les structures ancrées doivent être aptes à résister aussi bien aux sollicitations provisoires engendrées par les reports de charges dus à une rupture accidentelle d'un tirant qu'à celles qui résultent de la mise en place du ou des tirants supplémentaires.

COMMENTAIRES

1. Il n'est pas toujours nécessaire de réaliser à l'avance un renforcement des structures ancrées, il suffit que ce renforcement puisse être effectué seulement en cas de nécessité, à condition qu'il ait été prévu et qu'il soit réalisable sans difficultés excessives.

2. En cas de rupture accidentelle des armatures, les têtes de tirants peuvent parfois être projetées violemment hors de leurs organes d'appui et causer de ce fait sur leur trajectoire des accidents de personnes ou des dommages au voisinage. Sauf environnement immédiat inaccessible aux personnes non autorisées et précautions particulières prises sur les avoisinants, il est recommandé aux maîtres d'ouvrage de lier les têtes d'ancrage aux structures par des dispositifs pouvant prévenir de façon efficace toutes projections accidentelles de ces têtes.

8.8. PIÈCES ÉCRITES ET CAHIERS DES CLAUSES TECHNIQUES

Il importe au maître de l'ouvrage de faire procéder à une étude de sol très complète comportant notamment des essais *in situ* et en laboratoire ainsi qu'une partie hydrogéologique. Les résultats de cette étude doivent être produits *in extenso* dans les pièces écrites du dossier de consultation afin que les entreprises spécialisées dans l'exécution de tirants d'ancrage soient parfaitement informées, au moment d'établir leurs propositions techniques, des caractéristiques mécaniques des différentes couches (poids spécifique, cohésion, angle de frottement, indice de plasticité, etc.).

De même, le maître de l'ouvrage doit veiller avec un grand soin à la rédaction des pièces du Cahier des Clauses techniques qui précisent le rôle attendu de ces tirants, les essais et contrôles dont ils feront l'objet, enfin le type de protection contre la corrosion requis.

Les documents qu'il convient de demander aux entreprises de fournir contractuellement doivent comporter au minimum :

- une notice technique définissant :
 - les principales caractéristiques des tirants à mettre en œuvre (force de service, espacement, longueurs, etc.),
 - la mise en œuvre de la protection retenue contre la corrosion,
 - les modalités d'exécution (forage, fabrication, pose et scellement, mise en tension),

- la réalisation des essais, y compris les tableaux récapitulatifs prévus à l'article 5.434.34 (p. 78),
- le modèle d'appareil de contrôle utilisé, ses caractéristiques, ses conditions de mise en place,
- les dessins donnant le détail de la structure du tirant proposé et une vue générale de l'ensemble des tirants par rapport à la structure ancrée.

REMARQUE

Pendant la rédaction des pièces écrites, il ne faut pas perdre de vue le partage qu'il convient de faire, pour chaque cas, entre le nécessaire et le superflu, car le coût de l'ensemble de l'opération est naturellement lié directement à l'étendue des obligations qui sont imposées aux entreprises et il faut éviter de le grever sans utilité.

ANNEXE 1

STABILITÉ DES SOUTÈNEMENTS

A1.1. CONDITIONS DE STABILITÉ

Pour s'assurer de la stabilité d'un soutènement, il faut procéder à toutes les opérations ci-après :

A1.11. Vérification de l'équilibre séparé de chacun des éléments constitutifs du soutènement à savoir :

- l'équilibre de la paroi supposée isolée (article A1.2, p. 118),
- la résistance de l'ancrage (article A1.3, p. 12),
- la stabilité du massif M contenant les ancrages, ou stabilité d'ensemble de ce massif (article A1.4, p. 121).

La forme de ce massif variant très rapidement avec le nombre de nappes de tirants, il convient de considérer les deux cas suivants :

- massif M avec une nappe d'ancrages unique,
- massif M avec plusieurs nappes d'ancrages.

COMMENTAIRE

Lorsque le soutènement doit maintenir les parois d'une fouille, la forme de ce massif M varie avec la progression des terrassements. Il faut donc, surtout quand il y a plusieurs nappes d'ancrages, vérifier la stabilité et déterminer les efforts sollicitant la paroi et les tirants au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

A1.12. Vérification de la stabilité générale du terrain environnant la structure (article A1.5, p. 127)

COMMENTAIRE

La stabilité générale du terrain environnant la structure est spécialement à vérifier dans le cas des sols hétérogènes et de caractéristiques médiocres ; cette vérification tend à se prémunir contre la formation d'un grand glissement dont la surface de rupture, indépendante de la structure, est éloignée de celle-ci (fig. A1.01).

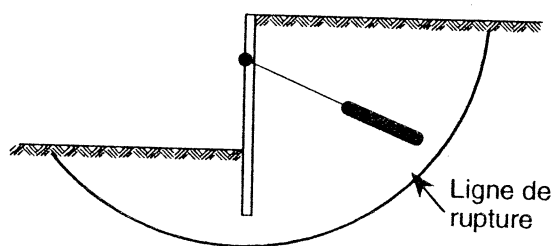


Fig. A1.01. — Exemple de glissement généralisé

A1.2. ÉQUILIBRE DE LA PAROI ISOLÉE

A1.21. Composantes horizontales des forces (fig. A1.02)

Après avoir établi le diagramme des composantes horizontales des poussées correspondant au soutènement considéré, il y a lieu de déterminer le point b d'effort tranchant nul, qui est l'un des sommets du massif M sollicité par les ancrages (article A1.41, p. 122).

Dans le cas d'une seule nappe de tirants, le point b doit être impérativement au-dessus du pied K de la paroi, celle-ci risquant de chasser du pied lorsque b et K sont confondus.

En particulier, il n'est admis de prendre en compte la butée ② que si l'on est certain que celle-ci existera en permanence.

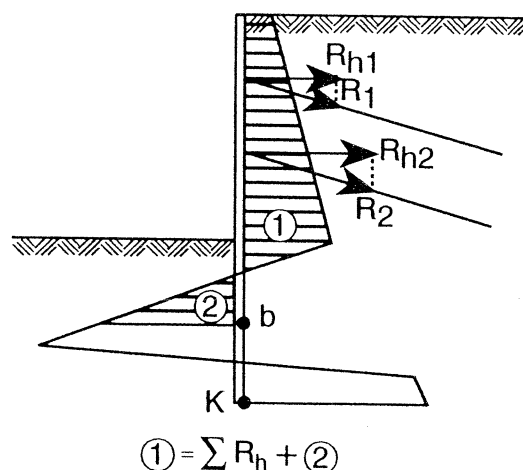


Fig. A1.02. — Équilibre des composantes horizontales des forces

COMMENTAIRE

Par exemple la butée peut disparaître lors d'une excavation au pied de la paroi.

A1.22. Composantes verticales des forces (fig. A1.03 et A1.04, ci-après)

Une grande inclinaison des tirants sur l'horizontale pouvant augmenter fortement la composante verticale sur la paroi, il y a lieu d'équilibrer celle-ci par la composante verticale de la butée et la résistance de pointe.

Dans le cas de terrains pulvérulents (fig. A1.03), il est nécessaire de tracer le polygone des forces : traction R du tirant, poussée P_A et butée P_p au-dessus du point b pour s'assurer que la force verticale nécessaire à la fermeture du polygone est inférieure à la résistance de pointe de la paroi.

Avec les sols cohérents (fig. A1.04.), on vérifie que la somme des adhérences de la paroi $C_A + C_p$ et de la réaction de pointe V est supérieure à la composante verticale de la traction des tirants.

COMMENTAIRE

On admet que les adhérences unitaires sur la paroi sont égales à la cohésion du sol. La réaction de pointe V ne peut être prise en compte lorsque la paroi est exécutée à l'avancement en commençant par le haut.

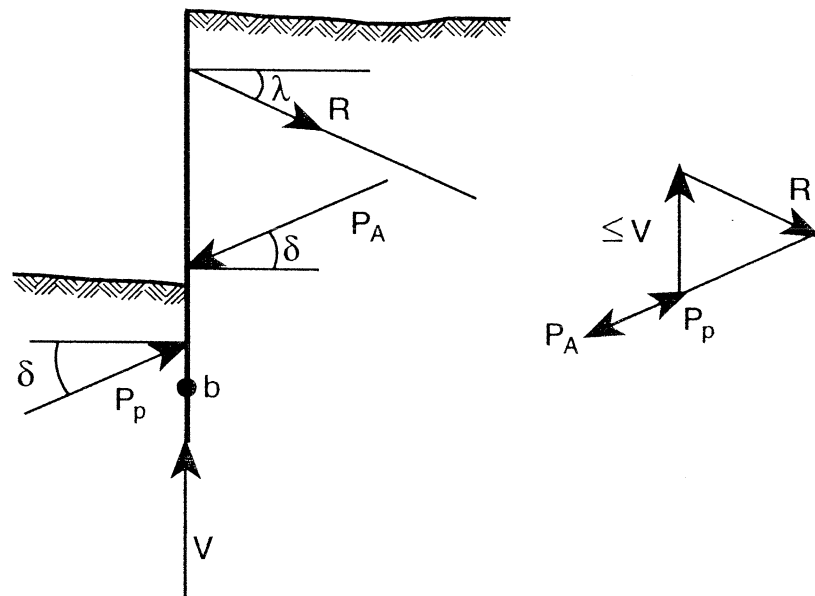
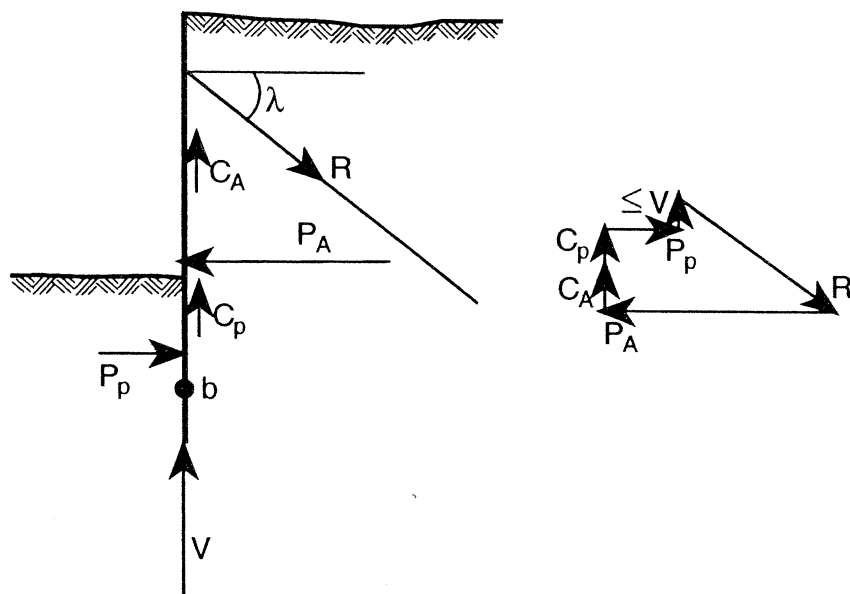


Fig. A1.03. — Cas des sols pulvérulents



*Fig. A1.04. — Cas des sols cohérents.
Équilibre des composantes verticales des forces*

A1.3. RÉSISTANCE DE L'ANCRAGE

L'accrochage du tirant au sol s'effectue au moyen de procédés :

- utilisant les coulis ou mortiers de scellement,
- n'utilisant ni les coulis ni les mortiers de scellement (pieux, plaques, vis, sabots pivotants, etc.).

Le dimensionnement de chacun de ces systèmes doit être tel qu'il puisse transmettre au massif de sol associé M l'effort de traction de service T_s sollicitant le tirant.

Force d'arrachement des ancrages injectés

La force d'arrachement de ces ancrages dépend de la nature du sol et du mode d'exécution. Comme on ne sait pas la calculer, on ne peut la déterminer qu'expérimentalement.

En particulier, si, pour dimensionner les tirants, on ne peut se référer à des cas analogues, il est alors nécessaire de recourir à des essais préalables (article 6.1, p. 89).

A1.4. STABILITÉ D'ENSEMBLE

Cette stabilité doit être assurée pour que le type de rupture illustré par la figure A1.05 ne puisse pas se produire.

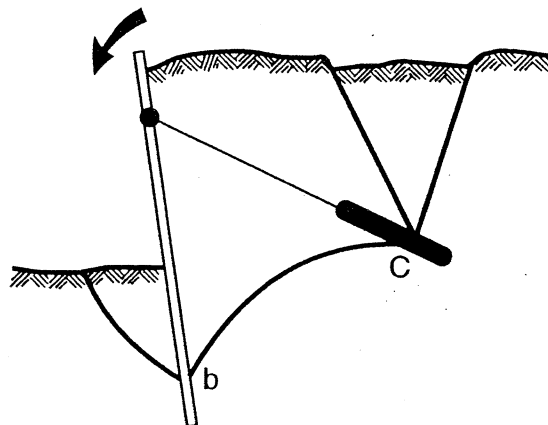


Fig. A1.05.

La méthode de vérification proposée n'est détaillée que dans le cas d'un massif M associé à une nappe unique d'ancrages.

A1.41. Équilibre du massif à nappe unique

1. Principe

La méthode consiste à remplacer la surface de rupture classique représentée par la figure A1.05 par une surface composite voisine, constituée (fig. A1.06) :

- du prisme de rupture en poussée dce en arrière des ancrages,
- du prisme de rupture en butée bhg en avant de la structure,
- d'une surface de raccordement bc entre ces deux surfaces.

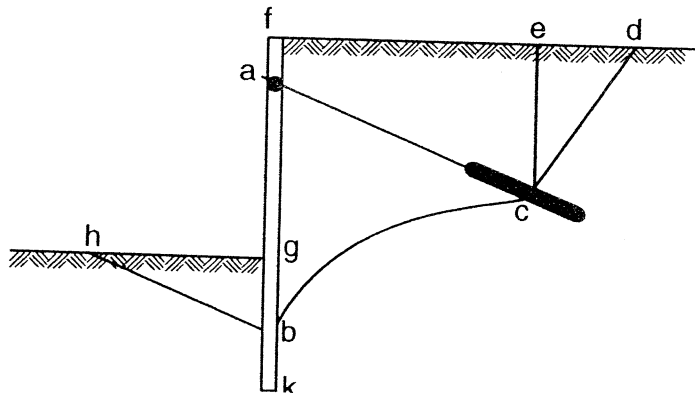


Fig. A1.06.

On simplifie l'étude de l'équilibre en remplaçant respectivement (fig. A1.07) l'équilibre partiel de chacun des prismes de rupture dce et bhg (fig. A1.06) par leurs réactions sur le système « massif-écran-ancrages », c'est-à-dire par la poussée P_a et la butée P_p .

On substitue ensuite (fig. A1.08) à l'étude du système complexe « massif-écran-ancrages » celle du seul massif M, de contour ecbf, en remplaçant l'écran et l'ancrage par leurs réactions sur le massif, soit respectivement la réaction $-P_A$ et la réaction unitaire d'ancrage R.

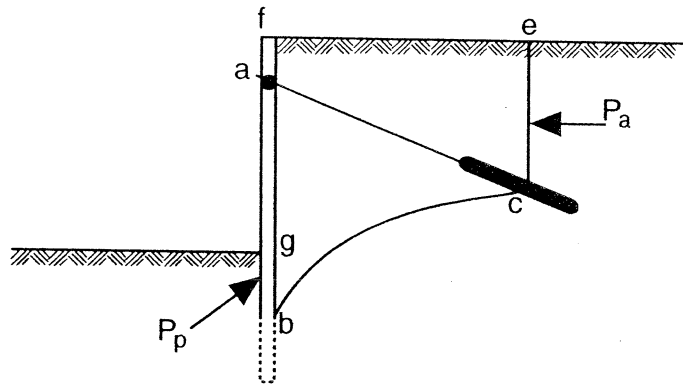


Fig. A1.07.

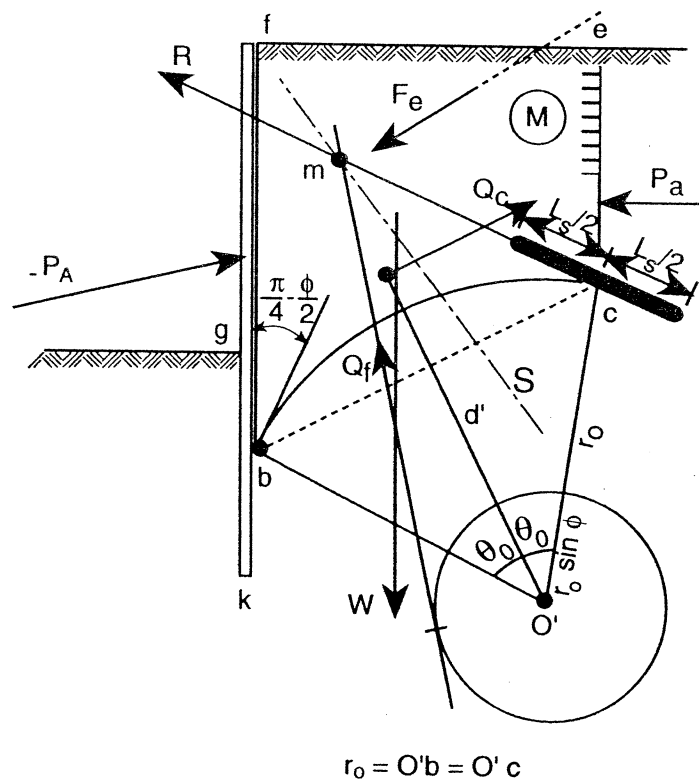


Fig. A1.08.

2. Dimensions du massif M sollicité par l'ancrage

Le massif M est limité (fig. A1.08) :

- à l'avant, par un plan de coupe bf tangent au soutènement,
- à l'arrière, par un plan vertical ec dit plan d'ancrage fictif,

- en bas, par la ligne de rupture qui est une courbe bc.

Le point b est le point d'effort tranchant nul de la paroi.

Le point c est situé sur l'axe du tirant, à une distance de l'extrémité égale :

- à $\frac{L_s}{2}$ si B lui est inférieur ($B \leq \frac{L_s}{2}$) (cas de la figure),
- à B dans le cas contraire ($B > \frac{L_s}{2}$)

B étant l'espacement de deux tirants successifs dans le plan de la nappe et L_s la longueur du scellement.

La courbe de rupture bc est un cercle coupant la paroi en b avec un angle égal à :

$$\frac{\pi}{4} - \frac{\Phi}{2}, \text{ et passant par le point c.}$$

COMMENTAIRE

L'arc de cercle choisi est une approximation de la courbe de rupture probable.

3. Forces en présence

Les forces en présence sont :

- le poids W du massif,
- la réaction $-P_A$ de la paroi, égale et opposée à la poussée des sols et des surcharges sur la hauteur bf de la paroi.

COMMENTAIRE

Le terme P_A ne prend pas en compte la poussée des nappes d'eau éventuelles sur la structure ; celles-ci ne peuvent évidemment pas stabiliser le massif. En revanche, elles doivent être prises en compte pour le calcul de la réaction d'ancrage R.

L'effet des surcharges temporaires doit être examiné à part, car il ne correspond pas forcément au cas le plus défavorable.

- la poussée P_a , surcharge comprise, sur le plan d'ancrage fictif ec (P_a est en général horizontale),
- la résultante F_e des forces externes (force extérieure, pression de courant, etc.),
- la réaction d'ancrage R ,
- la résultante des réactions sur la surface de rupture bc :
 - la composante due à la cohésion C est une force Q_c , d'intensité égale à $2C r_0 \sin \Theta_0$, parallèle à bc , et située à la distance

$$d' = \frac{r_0 \cdot \Theta_0}{\sin \Theta_0} \text{ du centre } O' \text{ du cercle,}$$

- la composante Q_f due au frottement est tangente au cercle de centre O' et de rayon $r_0 \sin \Phi$.

4. Conduite du calcul

On commence par déterminer la ligne d'action de la résultante S des forces W , P_a , $-P_A$, F_e et Q_c . Puis, par le point d'intersection m de sa ligne d'action avec l'axe du tirant, on mène la tangente au cercle de centre O' et de rayon égal à $r_0 \sin \Phi$. C'est la ligne d'action de la composante Q_f des réactions sur bc . Il suffit de reporter cette ligne d'action sur le dynamique pour déterminer les valeurs de Q_f et de l'effort maximal d'ancrage R' (R' est le plus grand effort d'ancrage compatible avec la sécurité du massif).

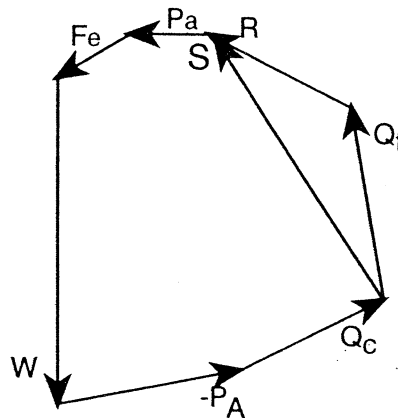


Fig. A1.09.

On doit alors vérifier que : $R' > F_s R$.

La valeur minimale du coefficient de sécurité F_s est fixée à 1,5.

REMARQUE

L'effort R' étant la traction provoquant l'instabilité du massif M , et T_u étant la traction qui provoque la rupture du scellement du tirant, on voit que :

- si $T_u < R'$, une augmentation de la traction du tirant peut provoquer le déversement de la paroi par rupture de l'ancrage. La courbe de rupture du massif ne peut pas se former : c'est le tirant qui lâche (fig. A1.10) ;
- si $T_u > R'$, une augmentation de la traction du tirant déséquilibre le massif M , et la rupture se produit suivant la courbe bc (fig. A1.05, p. 121).

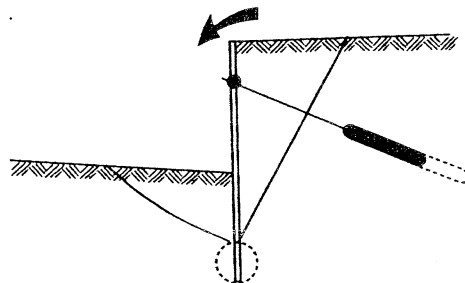


Fig. A1.10. — Rupture du scellement

A1.42. Équilibre du massif sollicité par plusieurs nappes d'ancrages

La paroi et les tirants sont supposés déjà dimensionnés pour que :

- la butée en pied soit suffisante,
- l'ancrage de chaque tirant soit suffisant pour ne pas être arraché.

La stabilité d'un massif M sollicité par plusieurs lits d'ancrages se vérifie selon un processus analogue à celui qui a été indiqué à l'article A1.41. (p. 122) pour une nappe unique d'ancrages. Seuls diffèrent quelques détails particuliers :

- la limite arrière du massif M ,

- la forme de la surface de glissement,
- les valeurs des tractions des tirants.

L'exposé de cette méthode entraînerait des développements qui n'ont pas leur place dans le présent document.

A1.5. STABILITÉ GÉNÉRALE DU TERRAIN ENVIRONNANT

Les vérifications indiquées aux articles précédents concernent uniquement l'équilibre local de l'ensemble « massif-paroi ».

Elles ne concernent pas la rupture par glissement généralisé (voir fig. A1.01, p. 118), qui peut, par exemple, être provoquée par la présence d'une couche molle.

Il convient donc, dans ce cas, d'étudier la stabilité générale du terrain environnant à partir des méthodes classiques.

ANNEXE 2

VÉRIFICATION DE LA STABILITÉ D'ENSEMBLE DES TIRANTS VERTICAUX POUR RADIER

A2.1. MÉTHODE

A2.11. Principe

Le principe consiste à étudier la stabilité au soulèvement vertical d'un massif constitué de volumes élémentaires de sol associés à chacun des tirants sollicités simultanément en traction.

A2.12. Méthode pratique

On trace autour de chaque tirant un volume unitaire, de poids effectif W égal à la traction limite par rupture du scellement du tirant

$$W = T_u.$$

On considère qu'il n'y a pas réduction de la résistance s'il n'y a pas intersection entre les volumes associés à deux tirants voisins, et qu'il y a réduction dans le cas contraire.

COMMENTAIRE

Cette notion de « volume associé » ne peut en revanche en aucun cas être utilisée dans l'état actuel des connaissances de façon biunivoque pour estimer la traction de rupture du scellement d'un tirant.

A2.2. VOLUME UNITAIRE ASSOCIÉ (CÔNE D'INFLUENCE)

On se limitera, ci-après, au cas des tirants verticaux.

A2.2.1. Forme réelle

Le volume réellement associé à un tirant a sans doute une forme grossièrement cylindrique, terminée dans la zone de scellement par un volume conique dont le sommet se situe à l'extrémité basse du scellement (voir figure A2.01).

Dans des sols dont le frottement interne gouverne principalement le comportement, on substitue au volume figuré ci-dessus un volume conique de demi-angle au sommet « β » (voir figure A2.02).

Et lorsque ces sols sont surmontés de formations sans frottement interne, le volume associé dans ces formations est réduit à un cylindre prenant appui sur la base du cône (voir figure A2.03).

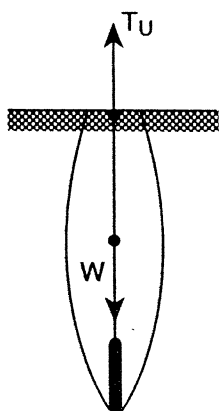


Fig. A2.01

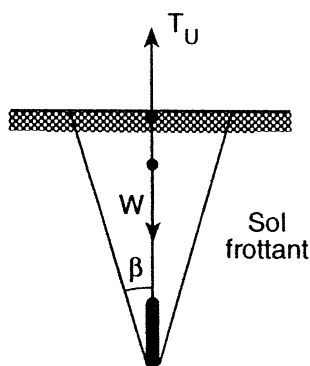


Fig. A2.02

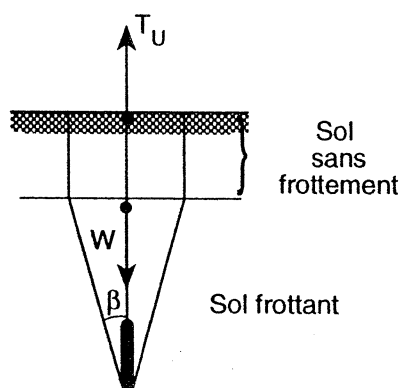


Fig. A2.03

Dans des sols dont la cohésion gouverne principalement le comportement, on substitue au volume figuré en A2.01 un volume cylindrique qui se raccorde à la base du scellement à un volume conique de 45° de demi-angle au sommet (voir figure A2.04).

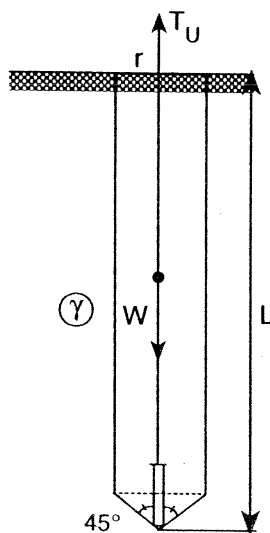


Fig. A2.04

REMARQUE

Le volume d'influence est un procédé de calcul et ne correspond pas physiquement au volume de terrain déplacé au moment de l'arrachage d'un tirant.

A2.22 Volume pratique, en sol homogène à frottement interne prédominant

C'est un cône de révolution, ayant pour axe le tirant, de hauteur totale (fig. A2.05) L et de demi-angle au sommet défini à l'article A2.26 (p. 134) ci-après. Son rayon de base r :

$$r = L \cdot \operatorname{tg} \beta$$

est déterminé de façon que le volume V du massif ainsi obtenu ait un poids total effectif W égal à :

$$W = \pi \cdot r^2 \cdot \gamma \cdot \frac{L}{3} = T_u$$

ce qui peut encore s'écrire :

$$r = \left(\frac{3 \cdot T_u}{\pi \cdot \gamma \cdot L} \right)^{1/2}$$

soit, en assimilant π à 3, ce qui est justifié par le manque de précision des hypothèses :

$$W = g \cdot L \cdot r^2,$$

ou

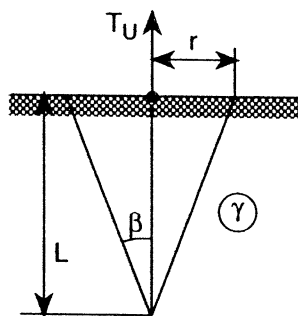
$$r = \left(\frac{T_u}{\gamma \cdot L} \right)^{1/2}.$$

COMMENTAIRE

La même simplification sera effectuée aux articles A2.23. et A2.24. ci-après.

COMMENTAIRE

Le poids spécifique « γ » des sols associés au tirant sera, selon la position de la nappe pouvant régner dans ces sols, soit le poids volumique naturel de ces sols, soit le poids volumique apparent compte tenu de la poussée d'Archimède.



$$r = \left(\frac{T_u}{\gamma \cdot L} \right)^{1/2}$$

Fig. A2.05

Cônes d'influence : formules pratiques

A2.23. Volume pratique, en sol stratifié à frottement interne prédominant

Soient z_1 et z_2 les couches de poids volumiques respectifs γ_1 et γ_2 (fig. A2.06). ζ désigne dans ce cas le rapport de z_2 à la longueur L :

$$z_2 = \zeta L.$$

On peut en tirer la valeur de r :

$$r = \left(\frac{T_u}{L} \cdot \frac{1}{\gamma_1 + (\gamma_2 - \gamma_1) \cdot \zeta^3} \right)^{1/2}$$

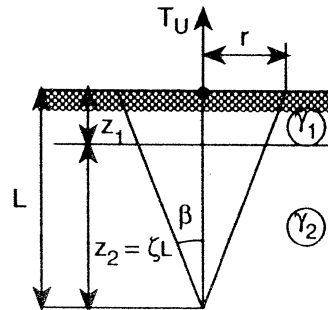


Fig. A2.06

A2.24. Volume pratique, dans un sol à frottement interne prédominant surchargé par un sol sans frottement

Soit L_f la longueur du tirant dans le sol résistant (fig. A2.07). On considère alors un cône, de hauteur L_f surmonté par un cylindre dans la couche de sol sans frottement de poids spécifique γ_0 et d'épaisseur z_0 , on trouve :

$$T_u = W = \pi \cdot \frac{r^2}{3} (\gamma \cdot L_f + 3 z_0 \cdot \gamma_0)$$

ou

$$T_u = r^2 (\gamma \cdot L_f + 3 z_0 \cdot \gamma_0)$$

On peut en tirer la valeur de r :

$$r = \left(\frac{T_u}{\gamma \cdot L_f + 3 z_0 \cdot \gamma_0} \right)^{1/2}$$

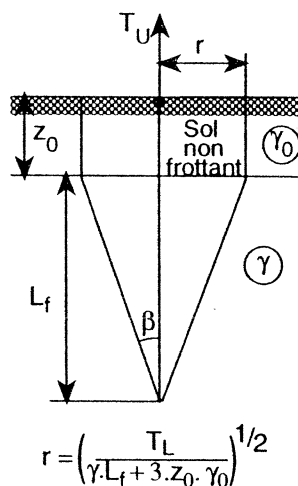


Fig. A2.07

A2.25. Volume pratique, dans un sol homogène à frottement interne prédominant surchargé de façon uniforme

On applique les formules de l'article A2.24, en remplaçant $z_0 \cdot \gamma_0$ par s , s étant la valeur unitaire de la surcharge uniforme (fig. A2.05, p. 132).

Celle-ci ne doit être prise en compte que si elle ne risque pas de disparaître de façon accidentelle.

A2.26. Valeur limite du demi-angle au sommet β

On doit vérifier que l'ouverture du cône d'influence reste égale aux $2/3$ de l'angle de frottement interne effectif du terrain.

A2.27. Volume pratique dans un sol homogène à cohésion prédominante

C'est un cylindre de révolution terminé en partie basse par un cône de 45° de demi-angle au sommet, ce sommet étant situé à l'extrémité basse du scellement du tirant (voir figure A2.04, p. 131).

Le rayon « r » du cylindre et de la base du cône de raccordement est donné par l'équation :

$$T_u = \gamma \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \left(L - \frac{2}{3} r \right)$$

où γ et L ont la même signification qu'en A2.22.

Ce volume une fois déterminé géométriquement, on doit, lorsque le tirant est entièrement réalisé dans un sol cohérent homogène, vérifier que la contrainte de cisaillement induite par T_u sur la surface latérale du cylindre est inférieure à $2/3 C_u$.

A2.28. Volume pratique dans un sol à cohésion prédominante surmonté par des sols de nature différente

Le volume pratique cylindrique tel que figuré en A2.04 sera prolongé avec le même diamètre au travers des sols sus-jacents pris en compte, quant à eux, avec leur propre poids volumique apparent, s'il y a lieu.

Dans ce cas, on doit aussi vérifier, comme en A2.27, que le cisaillement induit par T_u sur la surface cylindrique du volume considéré reste inférieur aux $2/3$ de la résistance limite au cisaillement des différentes couches de sol en contact avec le cylindre.

A2.29. Volume pratique dans un sol homogène à cohésion prédominante surchargé de façon uniforme

La surcharge de valeur unitaire « s » sera prise en compte sur la section droite du cylindre débouchant en surface et rajoutée au poids apparent du volume pratique tel que figuré en A2.04.

Celle-ci ne doit être prise en compte que si elle ne risque pas de disparaître de façon accidentelle.

$$T_u = \gamma \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \left(L - \frac{2}{3} r \right) + \pi \cdot r^2 \cdot s.$$

Comme en A2.27, on doit vérifier que le cisaillement sur la surface latérale du cylindre tel qu'induit par l'effort $(T_u - T_L \cdot r^2 \cdot s)$ reste inférieur à $2/3 C_u$.

A2.3. RÉDUCTION DU VOLUME D'INFLUENCE

A2.31. Principe

Connaissant r , on peut :

- soit disposer les tirants de façon à éviter les intersections,
- soit évaluer la réduction à apporter à T_u .

A2.32. Réduction de T_u dans le cas de volumes coniques voisins

Cette réduction est égale au poids ΔW de l'onglet limité par la corde commune (fig. A2.08), soit :

$$T'_u = T_u \cdot \frac{W - \Delta W}{W}$$

ou en sol homogène :

$$T'_u = T_u \cdot \frac{V - \Delta V}{V}$$

Compte tenu de la précision des hypothèses, on peut utiliser la seconde formule dans tous les types de sols.

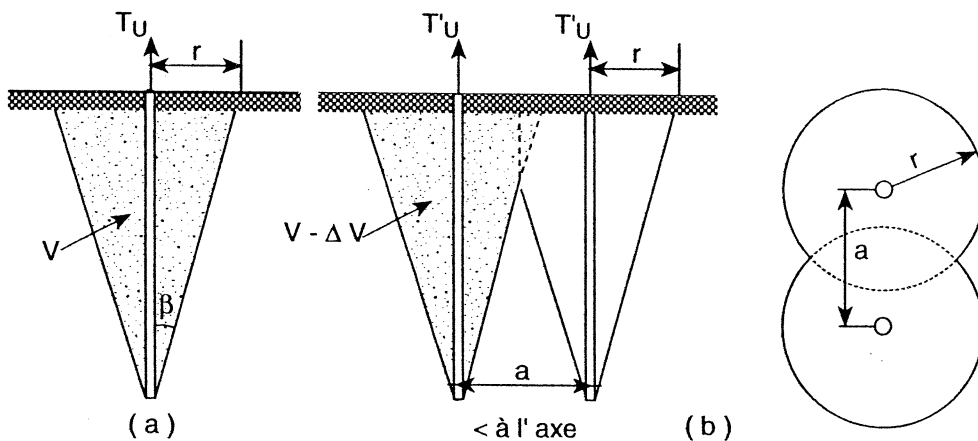


Fig. A2.08. — Réduction du volume d'influence (cas du cône)

a) Ancrage isolé

b) Ancrages voisins

A2.33. Formule pratique dans le cas de volumes coniques

Elle s'exprime par :

$$T'_u = \Psi' \cdot T_u$$

Ψ' étant donné par la courbe de la figure A2.09, en fonction du rapport a/r de l'écartement a de deux tirants successifs au rayon r du cône d'influence.

On peut aussi utiliser la formule pratique :

$$\psi' = 0,5 + 0,4 \cdot \frac{a}{r} \quad \text{si } 0 < a < 1,25 r.$$

$$\psi' = 1 \quad \text{si } a \geq 1,25 r.$$

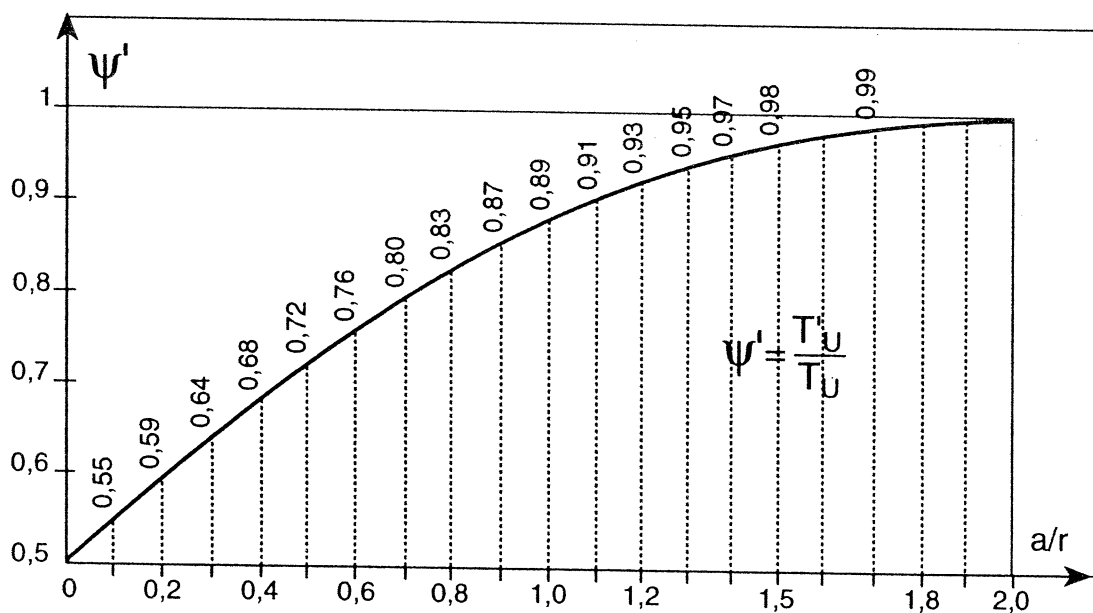


Fig. A2.09.

REMARQUES IMPORTANTES

- Il convient évidemment de vérifier que la traction de service des tirants est compatible avec les évaluations qui viennent d'être faites de T_u ou T'_u .

- *L'estimation ci-dessus de la réduction de volume n'est théoriquement applicable que dans le cas d'un ensemble linéaire d'ancrages équidistants de même puissance.*

Dans le cas d'ancrages implantés sur une grille régulière de maille axb , on calculera Ψ'_a dans le sens « a » et Ψ'_b dans le sens « b », mais en tenant compte du fait que les cônes associés aux ancrages de bordure ne sont en intersection que sur trois côtés.

- *Dans le cas de sols à cohésion prédominante (volumes associés cylindriques) on procédera de façon similaire en tenant compte toutefois :*
 - a) de la résistance au cisaillement sur la surface périmétrale enveloppe du groupe de tirants considéré, résistance limitée aux deux tiers de la cohésion non drainée,*
 - b) des caractéristiques des sols à long terme, caractéristiques pouvant conduire à une modification de la forme des volumes élémentaires associés aux tirants (Φ' prédominant par exemple).*

A2.34. Cas de volumes associés cylindriques

Dans le cas de volumes associés cylindriques, on procédera de façon similaire.

ANNEXE 3

GUIDE POUR LE PRÉDIMENSIONNEMENT DES TIRANTS

Au niveau d'un avant-projet, il est parfois nécessaire de prédimensionner des tirants pour évaluer l'économie du projet.

C'est le but de l'annexe 3.

Il faut souligner que ce prédimensionnement ne dispense pas des essais de tirants qui seuls doivent être utilisés pour justifier le projet définitif.

A3.1. RAPPEL

Dans la pratique, le projeteur appelé à prédimensionner un tirant procède en deux temps. Il détermine d'abord la direction et la valeur de l'effort de traction de service T_s . Ensuite il dimensionne ou prédimensionne les différentes parties du tirant, fixant :

- les sections d'acier,
- la longueur libre du tirant,
- la longueur de scellement du tirant.

A3.2. DIMENSIONNEMENT DE L'ARMATURE

Après avoir choisi le type et la nuance d'acier appelé à constituer l'armature du tirant (barres, fils, torons ou même tubes à parois épaisses), on dimensionne sa section. Ce dimensionnement ne pose aucun problème puisqu'il suffit de minorer simplement la traction T_p correspondant à la limite élastique conventionnelle T_G des aciers choisis.

COMMENTAIRE

La détermination de la traction de service fait l'objet de l'article 3.111 (p. 16).

A3.3. DIMENSIONNEMENT DE LA LONGUEUR LIBRE L_L

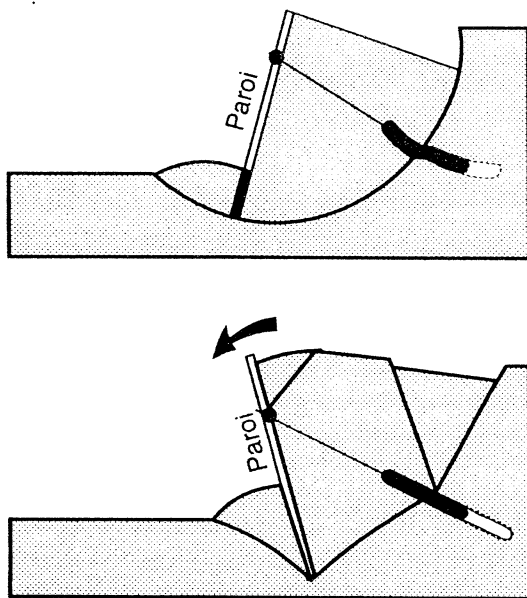


Fig. A3.01. — Exemples de ruptures schématisées dues à une insuffisance de longueur libre du tirant

L'importance de la longueur libre L_L est, dans la majorité des cas, essentiellement conditionnée par la situation de la couche d'ancrage. Comme on préfère dans la pratique sceller dans des sols relativement compacts, la longueur libre L_L est d'autant plus importante que la couche présentant de pareilles qualités est profonde. Dans les autres cas, il faut s'assurer

que L_L est suffisante pour délimiter un volume de sol, lequel, associé à l'ouvrage ancré, ne court aucun risque de rupture d'ensemble du type de celles qui sont schématisées sur la figure A.3.01, dans le cas, par exemple, de soutènements. Pour vérifier la stabilité d'ensemble, on peut se reporter à l'annexe 1 (p. 117).

REMARQUE

Il conviendra de s'assurer que la longueur libre est suffisante pour obtenir une précontrainte effective et sans variation notable en cas de légers déplacements du sol et/ou de l'ouvrage.

A3.4. APPROCHE DU PRÉDIMENSIONNEMENT DE LA LONGUEUR DE SCELLEMENT L_S

REMARQUE IMPORTANTE

Le prédimensionnement proposé ici, fondé sur l'analyse d'un nombre important d'essais de tirants, doit être considéré comme une première approximation et en aucun cas comme une obligation de résultat. Les facteurs qui conditionnent la résistance d'un ancrage (dont la mise en œuvre) sont en effet suffisamment nombreux pour que des écarts plus ou moins importants soient constatés lors de l'application de toute méthode de prédimensionnement aujourd'hui utilisée.

Ce qui justifie donc l'obligation des essais de tirants (chapitre 6, p. 83).

A3.41. Énoncé des exigences

Pour que le scellement d'un tirant joue son rôle, il faut :

- que les différentes armatures constituant la longueur scellée ne puissent pas glisser à l'intérieur du coulis qui les scelle au terrain,
- que la longueur scellée L_S soit suffisante pour transmettre au terrain d'ancrage les efforts induits par l'ouvrage en cours d'exploitation.

A3.42. Condition de non-glissement des armatures

Pour la condition de non-glissement des armatures à l'intérieur du coulis, aucune vérification n'est nécessaire pour les technologies de tirants commercialisés jusqu'à présent en France.

Dans le cas de technologies nouvelles ou mal connues, la condition de non-glissement doit faire l'objet d'une vérification. L'essai préalable en vraie grandeur est le moyen le plus approprié de le faire (voir article 6.1., p. 89).

A3.43 Méthode de prédimensionnement de la longueur de scellement (d'après M. Bustamante)

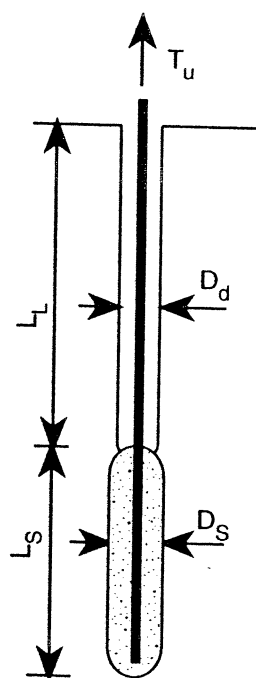
On détermine la longueur L_S à partir de la formule proposée ci-dessous pour le calcul de la traction limite T_u du tirant isolé, soit :

$$T_u = \pi \cdot D_S \cdot L_S \cdot q_S$$

et où :

D_S est le diamètre de calcul du bulbe de scellement (fig. A3.02.)

q_S est le frottement latéral unitaire limite du sol supposé homogène dans lequel le scellement doit être réalisé.



La valeur du paramètre D_S , qui dépend du diamètre de forage D_d , de la nature du sol d'ancrage et de la technique de réalisation du scellement, est prise égale à :

$$D_S = \alpha \cdot D_d$$

avec « α » un coefficient majorateur dont les différentes valeurs figurent au tableau 1.

On remarquera que la prise en compte des valeurs « α » implique de satisfaire certaines conditions d'exécution, notamment en ce qui concerne le choix de la technique et les pressions d'injection. En ce qui concerne les quantités V_i à injecter, les valeurs du tableau 1 ne sont qu'indicatives.

Fig. A3.02.

Sols	Coefficient « α »		Conditions indicatives d'application	
	IRS (en principe $p_i \geq p_\ell$)	IGU (en principe $p_i < p_\ell$)	Quantité usuelle de coulis à injecter V_i	Dosage coulis C/E
Graves	1,8	1,3 à 1,4	1,5 V_s	
Graves sableuses	1,6 à 1,8	1,2 à 1,4	1,5 V_s	
Sables graveleux	1,5 à 1,6	1,2 à 1,3	1,5 V_s	
Sables grossiers	1,4 à 1,5	1,1 à 1,2	1,5 V_s	1,7 à 2,4
Sables moyens	1,4 à 1,5	1,1 à 1,2	1,5 V_s	
Sables fins	1,4 à 1,5	1,1 à 1,2	1,5 V_s	
Sables limoneux	1,4 à 1,5	1,1 à 1,2	1,5 à 2 V_s pour IRS – 1,5 V_s pour IGU	
Limons	1,4 à 1,6	1,1 à 1,2	2 V_s pour IRS – 1,5 pour IGU	1,7 à 2,4
Argiles	1,8 à 2	1,2	2,5 à 3 V_s pour IRS – 1,5 à 2 V_s pour IGU	
Marnes	1,8	1,1 à 1,2	1,5 à 2 V_s pour couche compacte	
Marno-calcaires	1,8	1,1 à 1,2	2 à 6 V_s ou plus, si couche fracturée	1,7 à 2,4
Craie altérée ou fragmentée	1,8	1,1 à 1,2	1,1 à 1,5 V_s si couche finement fissurée	
Rocher altéré ou fragmenté	1,2	1,1	2 V_s ou plus, si couche fracturée	1,7 à 2,4

avec : IRS : Injection Répétitive et Sélective sous pression élevée (voir remarque),

IGU : Injection Globale et Unique sous faible pression (voir remarque),

p_i : Pression d'injection en tête de forage, V_s : Volume du bulbe de scellement associé à D_s .

Tableau 1. — Valeur du coefficient α pour le calcul du diamètre du bulbe (d'après M. Bustamante)

On notera aussi que les valeurs des coefficients « α » sont fixées pour des coulis de ciment pur, éventuellement adjuvés, et pour des dosages habituellement utilisés en France, à savoir C/E compris entre 1,7 et 2,4.

REMARQUE

Dans le tableau 1, on entend par injection répétitive et sélective (IRS), en principe, toute injection sous haute pression réalisée à partir d'un tube à manchettes, au double obturateur, par passes successives et phases répétées.

Il est recommandé que le tube à manchettes comporte deux à trois manchettes par mètre, avec au moins une manchette par mètre de scellement.

L'injection globale et unique (IGU) consiste à passer sous faible pression la quantité de coulis choisie en une seule fois, directement à partir d'un obturateur simple installé, par exemple, en partie haute de la future zone de scellement.

COMMENTAIRE

On désigne par haute pression une pression d'injection supérieure ou égale à la pression limite du sol p_l , mesurée au pressiomètre Ménard (NFP 94-110) sans toutefois dépasser une valeur de 4 MPa.

On désigne par faible pression une pression d'injection, inférieure à la moitié de la pression limite du sol p_l (toujours mesurée au pressiomètre), mais au moins égale à 1 MPa.

Les différentes valeurs « q_s » qui dépendent pour chaque sol de sa compacité, exprimée par la pression limite p_l mesurée au pressiomètre, sont données par les abaques des figures A3.03, A3.04, A3.05 et A3.06 et le tableau 2 qui leur est associé.

Ces abaques, comme toute la méthode de prédimensionnement proposée, ont été essentiellement calés sur les essais pressiométriques. La référence aux essais C.P.T. ou aux essais S.P.T. est donnée à titre indicatif, à partir des corrélations pressiomètre-S.P.T. et pressiomètre-C.P.T. qui, comme on le sait, peuvent présenter des dispersions importantes. L'échelle

descriptive des compacités est donnée en corrélation avec le pressiomètre.

(Bustamante *et al.*, 1985 et 1994) – (Cassan, 1988) – (Gonin *et al.*, 1992).

Sols	Abaque correspondant	Technique d'injection	
		IRS (en principe $p_i \geq p_e$)	IGU (en principe $p_i < p_e$)
Graves Graves sableuses Sables graveleux Sables grossiers Sables moyens Sables fins Sables limoneux	A3. 03	SG.1	SG.2
Limons Argiles	A3. 04	AL. 1	AL. 2
Marnes Marno-calcaires Craie altérée ou fragmentée	A3. 05	MC. 1	MC. 2
Rocher altéré ou fragmenté	A3. 06	$\geq R. 1$	$\geq R. 2$

Tableau 2. — Abaques pour la détermination du frottement limite q_s (d'après M. Bustamante)

Les abaques représentés sur les figures A3.03 à A3.06 (p. 147 à 150) ont été établis à partir de données expérimentales. Pour ceux de la figure A3.06 (abaques R1 et R2), la rupture n'a pas été atteinte, ce qui a conduit, par prudence, à proposer des valeurs de q_s par défaut.

Pour le prédimensionnement, on préconise d'adopter une traction de service T_s ou plus égale à la moitié de la valeur T_u calculée :

$$T_s \leq \frac{T_u}{2}.$$

REMARQUE IMPORTANTE

Les valeurs q_s données ci-dessus ont été établies pour des diamètres de forage D_d compris entre 85 mm et 245 mm, et des longueurs de scellement comprises entre 3 m et 18 m, avec des valeurs moyennes de 8,0 m environ. Les scellements des tirants ont été réalisés avec des couvertures de terrains d'au moins 5 m.

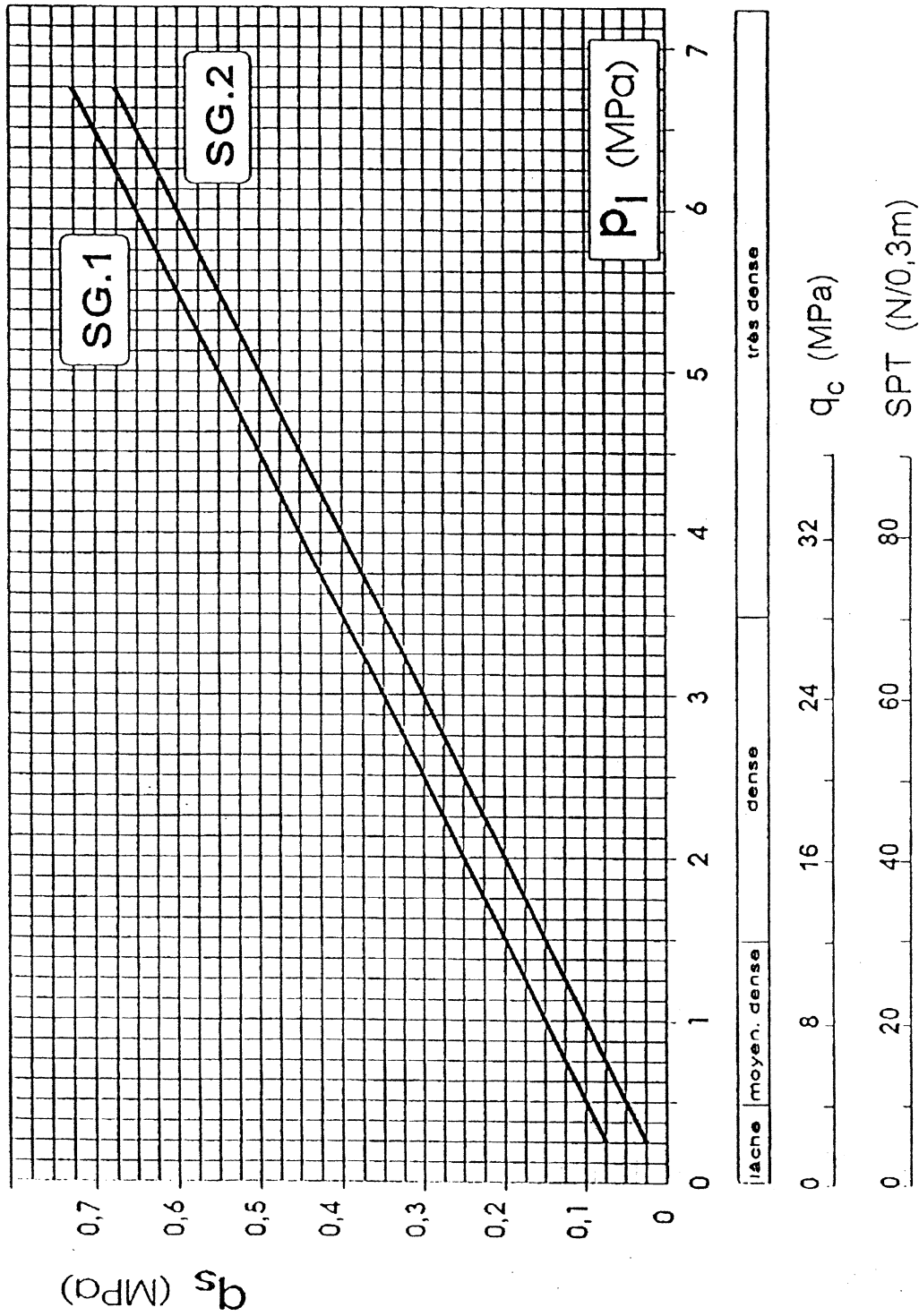


Fig. A3.03. — SABLE + GRAVE

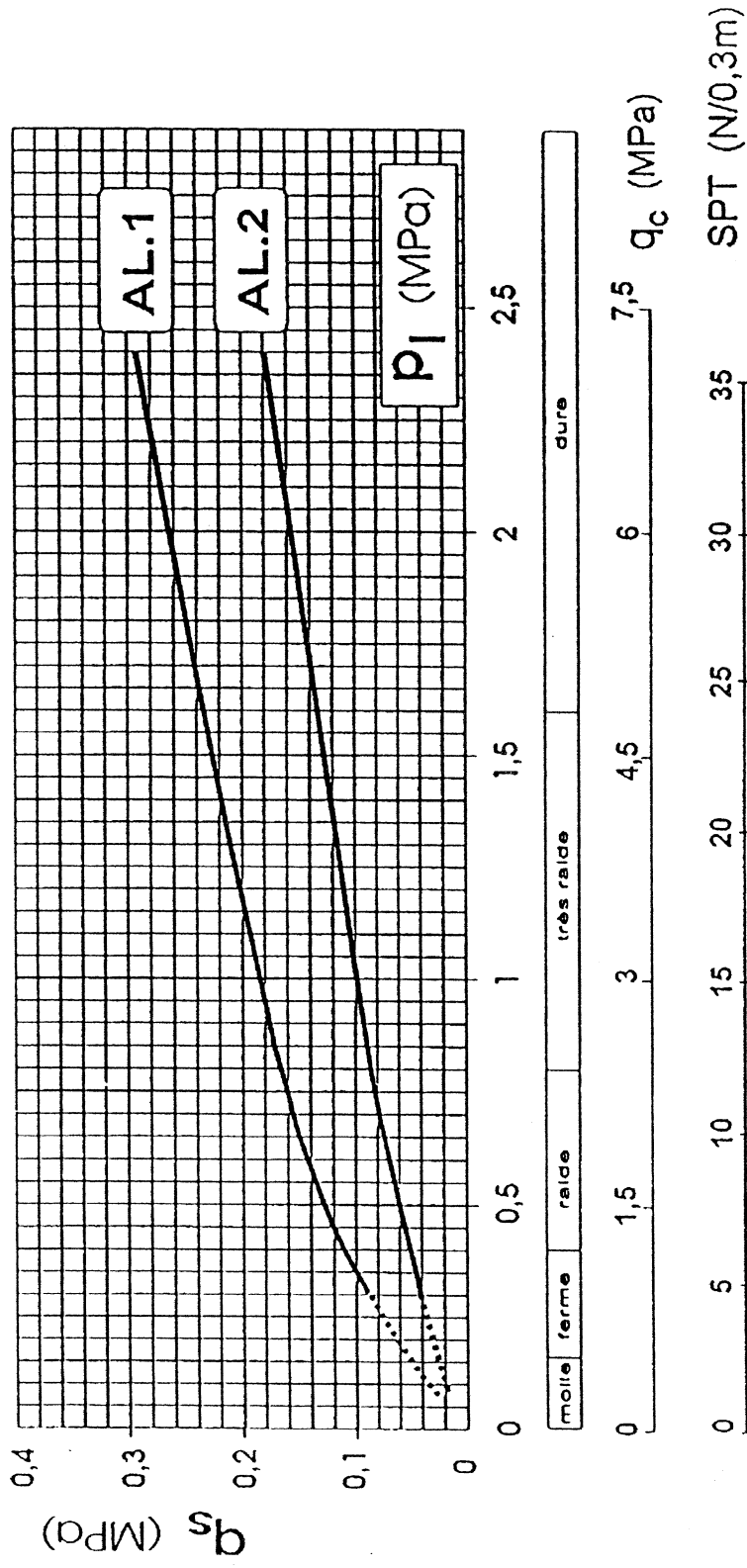
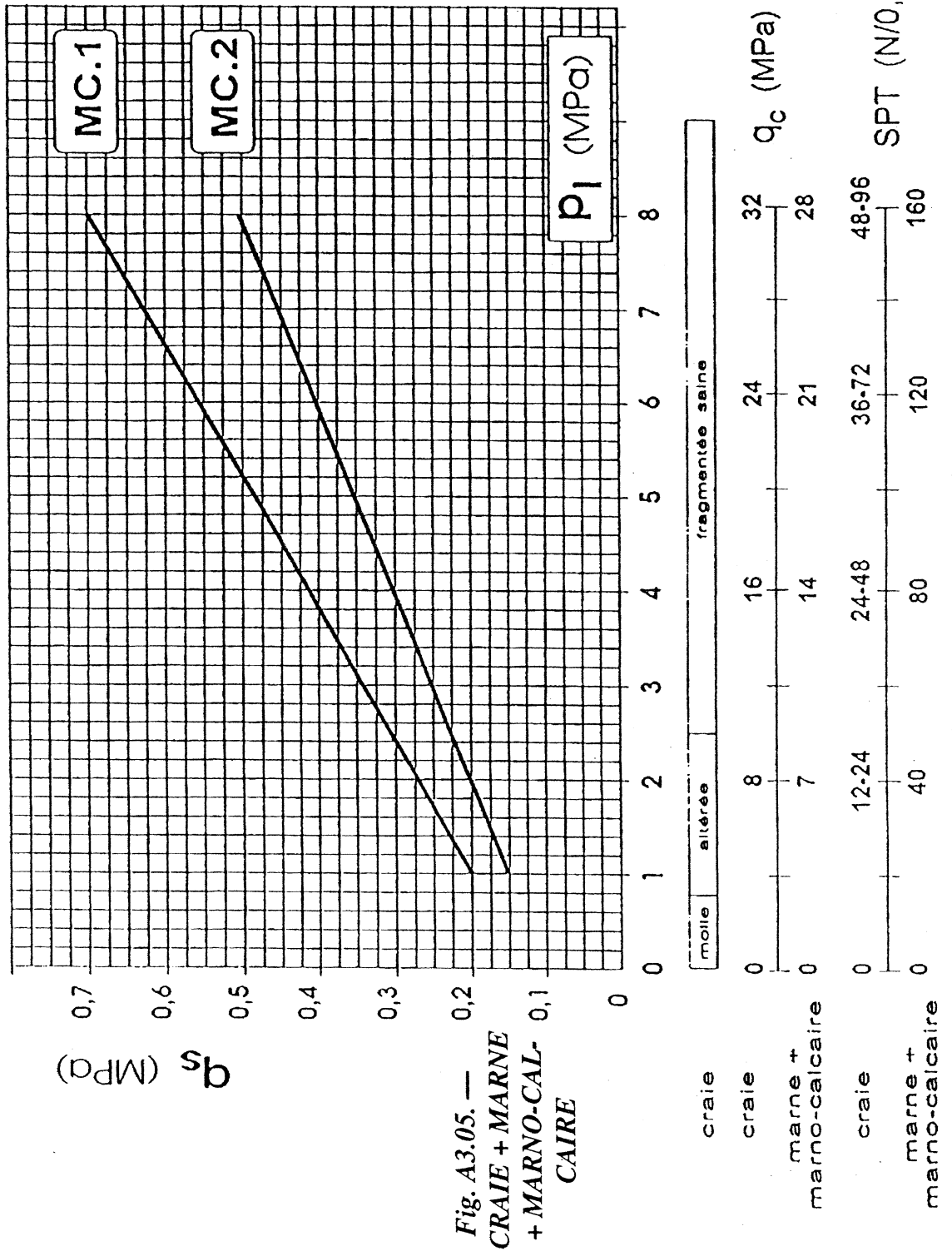


Fig. A3.04. — ARGILE + LIMON



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bustamante M., Doix B. (1985), « Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés », *Bull. Liaison Labo*, P. et Ch. n° 140, nov.-déc., pp. 74-95.

Bustamante M., Gianceselli L. (1994), « Contribution au dimensionnement des pieux vissés », *Bull. Liaison Labo*, P. et Ch. n° 191, mai-juin, pp. 41-53.

Cassan M. (1988), *Les essais in situ en mécanique des sols*, vol. 1 : « Réalisation et interprétation ». Éditions Eyrolles, Paris.

Gonin H., Vandangeon P., Lafeuillade M.-P. (1992), « Étude sur la corrélation entre le standard pénétration test et le pressiomètre », *Rév. Fran. Géotech.*, n° 58, pp. 67-78.

