

1 Introduction

1.1 Contexte

Le présent article concerne le chapitre 10 de norme SIA 267 « Géotechnique » consacré aux ancrages avec des tirants précontraints et le chapitre 6 de la norme SIA 267/1 « Géotechnique - spécifications complémentaires » consacré aux essais sur les tirants précontraints. Les ancrages passifs ne sont pas traités, hormis au chapitre 2. L'article est orienté sur les ancrages permanents et basé sur l'expérience de l'auteur dans le cadre de la maintenance des ouvrages ancrés des routes nationales.

1.2 But

L'article aborde les expériences d'utilisation pratique des chapitres des normes SIA 267 et 267/1 sur les tirants d'ancrage du point de vue d'auteur de projet et de direction de travaux et traite les phases de projet, appel d'offres mais surtout de réalisation et de contrôle d'exécution.

2 Normes à prendre en considération

La majeure partie des articles du chapitre 10 de la norme SIA 267 ne sont pas nouveaux. Ils datent d'il y a environ 20 ans et de la publication de la norme SIA V191 de 1995 [1] et du cahier technique 2009 de 1996 [2] consacrant l'utilisation de tirants permanent avec double protection corrosion (ou protection poussée) et le dimensionnement aux facteurs partiels. Ces articles sont par contre « dispatchés » entre la SIA 267 et la 267/1. De même, les articles du chapitre 11 de la norme SIA 267 reprennent ceux de la norme SIA 191/1 [3], publiée 2 ans avant les Swisscodes, elle-même intégrant les articles du cahier technique 2010 de 1995 [4].

D'autres normes sont intimement liées à l'étude du projet ainsi qu'à sa réalisation, qu'il s'agisse de normes d'exécution, sur les produits ou procédés, les aspects contractuels, ou les contrôles et essais. A noter qu'en ce qui concerne les ouvrages existants, la mise en service de la série de normes SIA 269/x [5] font référence explicite à la SIA 267.

La Figure 1 synthétise les relations entre ces diverses normes.

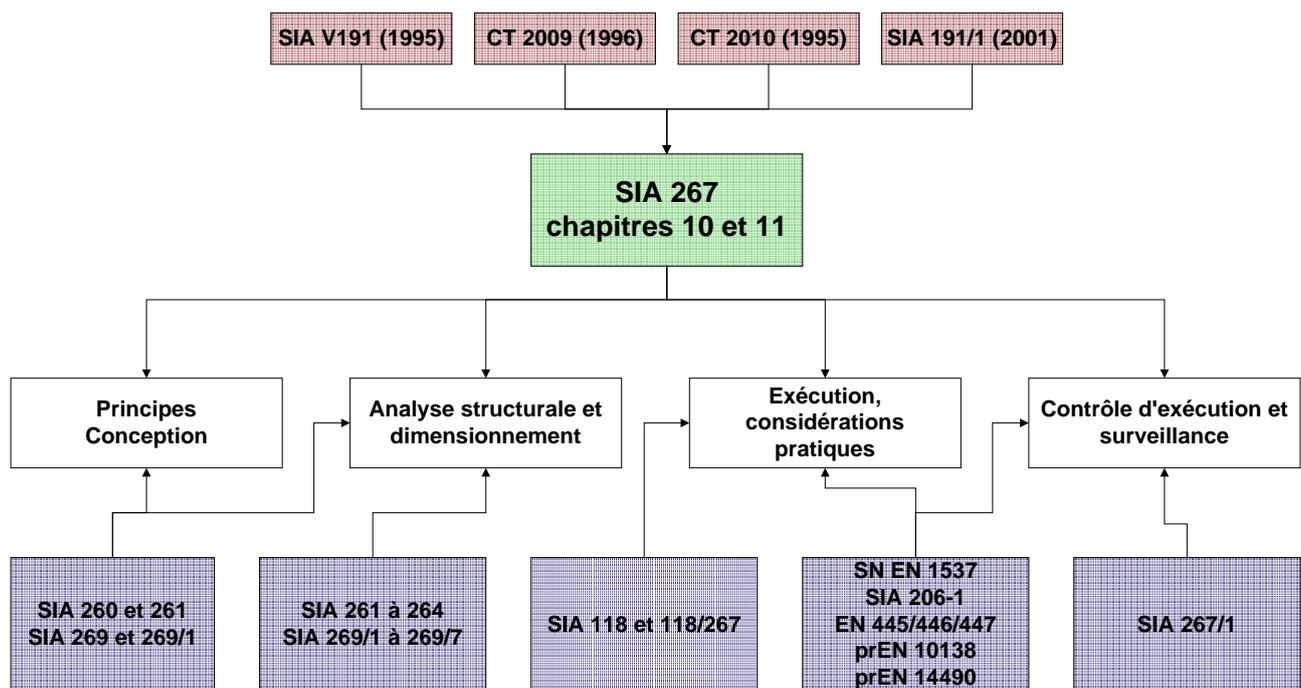


Figure 1 : Lien entre les normes à prendre en considération (inspiré de [6]). En rouge les normes fondatrices des chapitres 10 et 11 de la SIA 267 et en bleu les norms liées, par phases.

Deux autres documents sont importants : la directive de l'OFROU sur les tirants d'ancrages de 2007 [6] et le manuel d'homologation technique de l'EMPA concernant les systèmes d'ancrages selon la norme SIA 267 de 2004 [7].

3 Principes

3.1 Généralités

En tant que conseil du MO plus qu'en tant que spécialiste (géotechnicien), l'intégration des droits et devoirs de chacun dans le développement d'un projet avec ancrage (p. ex voisinage) et les risques liés au projet doivent être identifiés au plus tôt et systématiquement mis à jour. Des lacunes dans ce processus se font en général ressentir de manière pénible tout au long de la phase de projet.

Une planification dès le début de toutes les étapes de travaux, et notamment des tirants d'essais, la précision des exigences de qualité, ainsi qu'une prévision de marges dans le planning permet d'établir un appel d'offres cohérent. Les discussions avec les entreprises de travaux spéciaux, généralement sous-traitantes d'une entreprise de maçonnerie, sont à entreprendre dès l'adjudication, voire déjà lors des séances de clarification.

3.2 Conception

Dans le cas de la maintenance d'ouvrages ancrés existants par l'utilisation de nouveaux tirants, le défi est en premier lieu géométrique. En effet, garantir un espacement des tirants de 1.50m entre les zones de scellements (§10.2.2.6) relève parfois de la gageure lorsqu'on y inclut une réflexion sur les tolérances d'exécution (voir Figure 2). A ce sujet, une grande différence existe entre la norme SIA 267 et la norme SIA 193.131 [8]. Par exemple, pour des tirants de 20m de longueur, le rayon du cône d'erreur peut varier du simple au double ! :

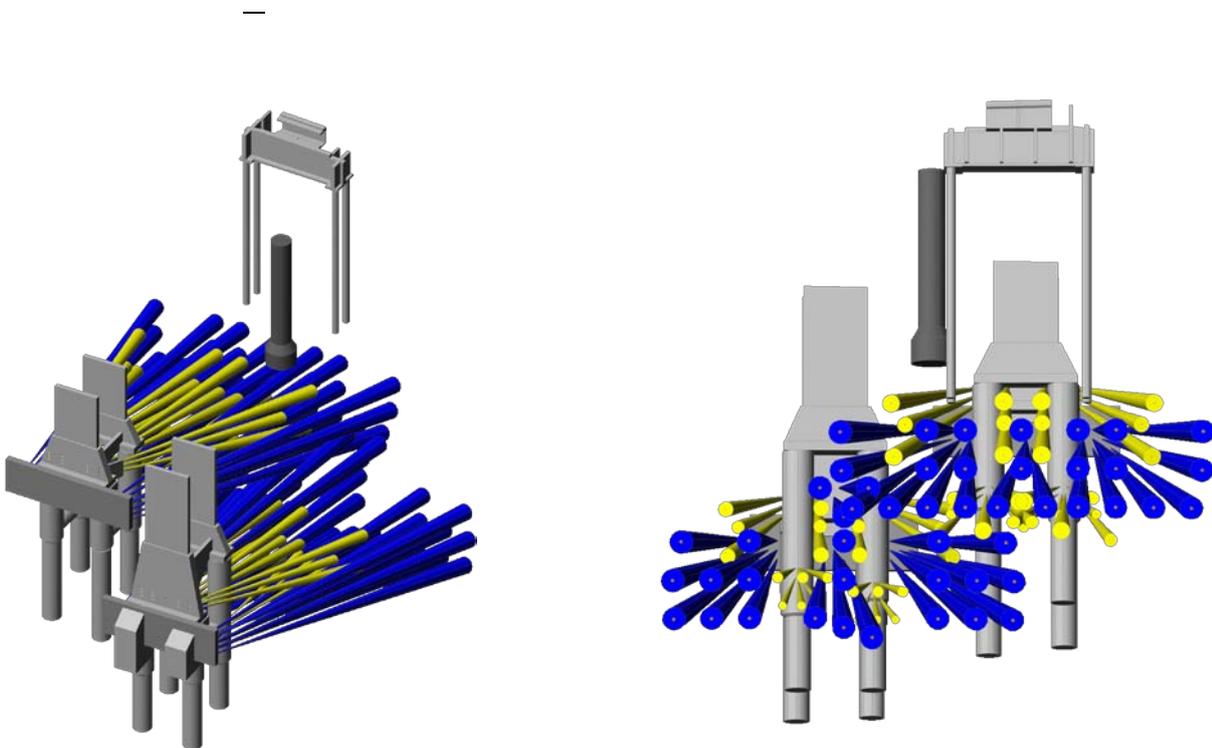


Figure 2 : Exemple d'étude de conflits entre tirants d'ancrages existants (en jaune) et futurs (en bleu). Piles 1 et 101 des pont sur la Paudèze (autoroute N9 près de Lausanne).

Deux situations de risques doivent être considérées lors de la conception car elle influent les dimensions des éléments de structure et les zones d'introduction des forces, généralement en béton armé : la position des emplacements de réserves (entre 10 et 30% selon § 10.2.2.3) et la conséquence de la rupture d'un tirant isolé (selon § 10.2.2.5). Si cette dernière ne doit pas forcément être résolue par le dimensionnement, dans la pratique c'est souvent le cas, en admettant que cette situation de risque est accidentelle.

4 Analyse structurale et dimensionnement

4.1 Valeurs de calcul de la force d'ancrages

Lors de l'élaboration du projet et des vérifications de la sécurité structurale, il est important de connaître ou d'estimer le mode de défaillance de la structure ancrée. La distinction donnée au § 10.5.2 de la norme est généralement bien suivie.

Si les tirants peuvent s'allonger lors de la mise en place du mécanisme de rupture (§ 10.5.2.2.2), le choix de la section d'acier est dicté par la résistance ultime du tirant à la traction (voir Figure 3a : cas d'un soutènement vertical ancré – EL2). Ensuite, la force de blocage peut être choisie entre 30% (valeur minimale garantissant l'entrée des clavettes) et 60% de cette valeur (valeur maximale permettant d'exclure le risque de corrosion sous contrainte).

Si les tirants ne peuvent pas s'allonger lors de la mise en place du mécanisme de rupture (§ 10.5.2.2.3), le choix de la section d'acier est dicté par la force nécessaire à la stabilité générale, assimilée la force de blocage des tirants (voir Figure 3b : cas d'une stabilisation de talus – EL3). Ensuite, la section d'acier nécessaire est déduite de cette force de blocage.

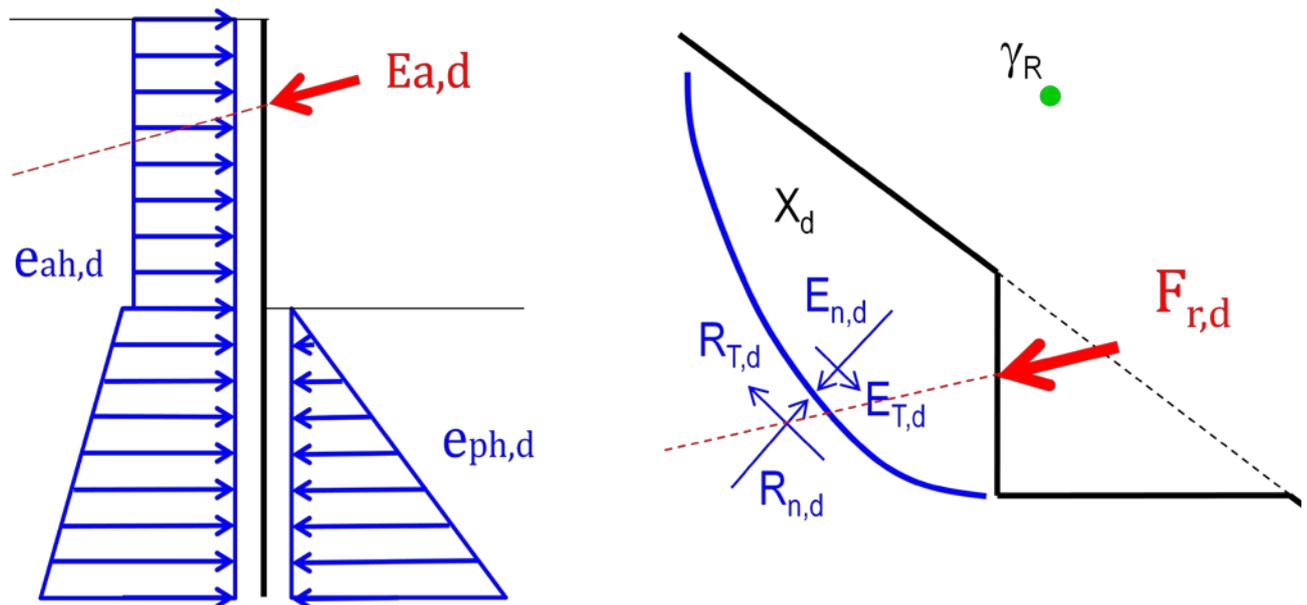


Figure 3 : Différentes définitions des résistances ultimes. a) ancrage sollicité à la traction b) ancrage non sollicité à la traction

s'appliquent pas aux soutènements. Les résultats de cette étude seront probablement inclus dans la future révision de la norme SIA 261.

- Enfin concernant le choc, la directive OFROU [8] fournit des indications.

5 Considérations pratiques

5.1 Appel d'offres

La norme 118/267 [10] ne précise pas les grandeurs qu'il faut fournir en soumission et le CAN 164 permet de préciser plusieurs paramètres qui peuvent être contradictoires. Les conditions particulières doivent être claires en ce qui concerne les exigences de qualité. Le plan de contrôle est une pièce essentielle afin de résumer les exigences et les essais à planifier en vue de leur satisfaction. Toutefois, il est préférable, étant donné l'organisation des entreprises (entreprise de précontrainte sous-traitante de l'entreprise de travaux spéciaux elle-même sous-traitante de l'entreprise de maçonnerie) que les informations importantes soient reportées sur les plans.

5.2 Projet d'exécution

Dans le cas de projet d'ancrages, le projet d'exécution peut donner lieu à des optimisations importantes après le choix du fournisseur des tirants, optimisations qui peuvent s'étendre aux zones d'introduction des forces. Les détails d'exécution ne doivent pas être négligés ; en particulier, la construction des zones d'introduction des forces exige des précautions d'étanchéité à faire figurer sur les plans d'exécution.

5.3 Exécution

La DT et l'auteur de projet revêt une importance cruciale lors de l'exécution des tirants et de la planification des contrôles d'exécution. Les méthodes de forage, d'injection-réinjection (y compris la définition des pression de refus et des volumes de coulis à injecter), devraient être discutées et adaptées entre l'entreprise de travaux spéciaux et le mandataire spécialiste au plus tôt, lors de l'exécution des tirants d'essais, surtout en cas de terrains sensibles. Ces discussions doivent néanmoins se faire en ne perdant pas de vue les responsabilités de chacune des parties.

La nécessité d'essais d'eau, les mesures de prétraitement des zones de scellement doivent figurer en soumission et être discutée avec l'entreprise, notamment en cas de terrains sensibles comme, par exemple, les marnes. Le choix des paramètres à protocoler doit être contrôlé avec l'entrepreneur afin de posséder toutes les informations nécessaires lors de l'avancement du chantier.

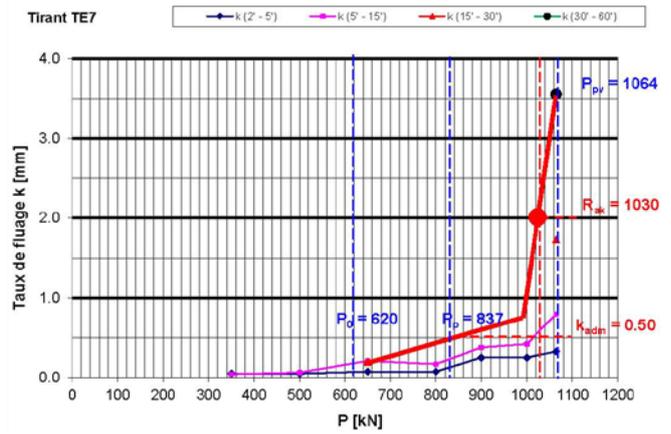
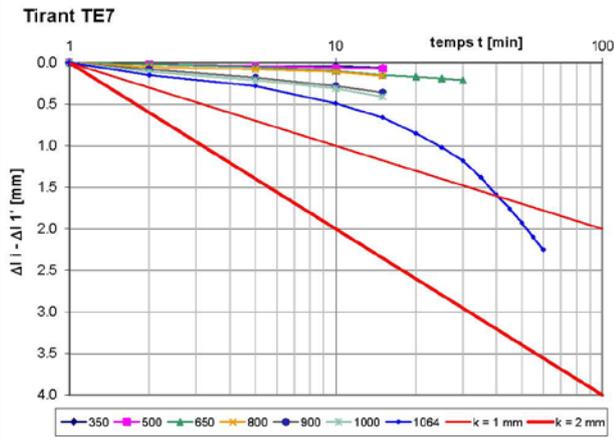
Les temps d'attente entre la dernière réinjection et la mise en tension n'est pas précisée. Selon la directive [1] elle est de min. 7 jours voire de min. 10 jours dans les zones sensibles. Ces valeurs minimales ne sont que rarement dépassées, alors qu'un temps de séchage supplémentaire améliore la capacité portante des tirants.

6 Contrôles d'exécution

6.1 Tirants d'essais

L'exécution de tirants d'essais est le seul moyen d'avoir accès à la résistance externe du tirant. Ils doivent être planifiés soigneusement déjà en soumission. Des temps d'attente suffisants doivent être prévus et une interprétation sur place des courbes de fluage est nécessaire afin de décider de la prolongation d'un palier non stabilisé (voir Figure 5a). Lors d'essais en hauteur, même si l'on doit s'accommoder de mesures moins précises en l'absence de points fixes (§ 6.2.2.1.6 de la SIA 267/1), une estimation des déplacements du massif d'appui est nécessaire dans le cas d'ouvrages souples (mesures simultanées avec les mesures sur l'ancrage). L'absence de ces mesures peut conduire à sous-estimer la résistance externe du tirant.

L'essai doit ensuite être interprété dans le plan force-fluage (Figure 5b) afin de faire ressortir le taux de fluage admissible nécessaire à définir les épreuves de mise en tension.

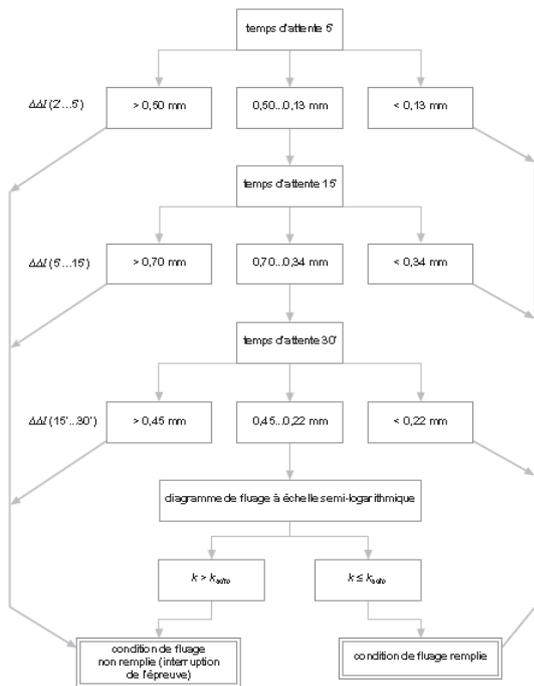


Tirant TE7 : $L_v = 8\text{ m}$ en moraine, $\varnothing_{\text{for}} = 0.14\text{ m}$, $p_{\text{ref}} = 20\text{ bars}$, $V_{\text{max}} = 150\text{ kg/réinj.}$, 3 réinj. / 2 tubes alternés

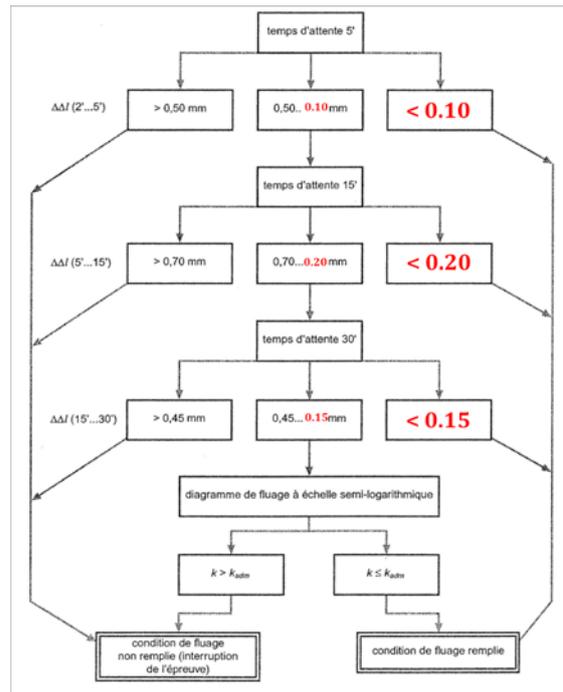
Figure 5 : a) exemple de diagramme de fluage d'un tirant d'essai b) courbe charge-fluage avec définition de k_{adm}

6.2 Epreuves de mise en tension

La figure 11 de la norme SIA 267/1 est un exemple valable pour $k_{\text{adm}} = 0.7-0.75$ (Figure 6a). Lors de l'interprétation des tirants d'essais et la définition du k_{adm} associé, toute valeur différente doit conduire à la redéfinition de la valeur minimale des déplacements différentiels pour les épreuves de mise en tension, y inclus un certain facteur de sécurité. La Figure 6b illustre la définition des déplacements différentiels admissibles sur la base du tirant d'essai présenté à la Figure 5.



a)



b)

Figure 6 : a) Figure 11 de la norme SIA 267/1, valable pour $k_{\text{adm}}(P_p) = 0.7-0.75$. b) Définition des déplacements différentiels admissibles sur la base du tirant d'essai de la Figure 5 : $k_{\text{adm}}(P_p) = 0.5$

6.3 Exigences sur les coulis

Des exigences contraignantes sur la qualité des coulis de remplissage et d'injection, tirées des normes pour la précontrainte sont en vigueur. Ces exigences permettent d'assurer la durabilité des tirants. A la connais-

sance de l'auteur, elles sont fortement remises en question par les entreprises. La Figure 7 résume l'évolution de ces exigences entre 1989 et 2007.

Propriétés	SIA 162/1 n°43 (1989)	EN445 à 447 (1996)	EN445 à 447 (2007)
Mélange	Pas d'exigences	± 2% ciment et adjuvant, ±1% eau E/C = 0.48	± 2% ciment et adjuvant, ±1% eau E/C int = 0.48 – E/C ext = 0.50
Fluidité	Pas d'exigences	Cône de Marsh: • après malax. et 30 min : t < 25 s • en sortie de conduit : t > 10 s	Cône de Marsh: • après malax : t0 < 25 s • après 30 min : 1.2xt0 > t30 > 0.8xt0
Exsudation (ressuage)	Øxh = 100 x 100 mm • max 2% après 3h • max 4%	Øxh = 25 x 250 mm ou 50 x 200 mm • max 2% après 3h • < 4%	Øxh = 60-80 x 1000 mm avec toron • max 0.3% après 3h • < 0.8%
Variation de volume	Øxh = 100 x 100 mm • max 3%	Øxh = 50 x 200 • min -1% à max + 5%	Øxh = 60-80 x 1000 mm avec toron • min -1% à max + 5%
Résistance	>25 [N/mm ²] après 28j	Ø100 x 80 mm ou 40x40x160 mm >27 [N/mm ²] à 7 jours >30[N/mm ²] à 28 jours	Ø100 x 80 mm ou 40x40x160 mm >27 [N/mm ²] à 7 jours >30[N/mm ²] à 28 jours

Figure 7 : Comparaison de l'évolution des exigences sur les coulis d'injection

7 Surveillance

7.1 Tirants de mesures

L'élaboration d'un projet d'ancrage exige la surveillance de ceux-ci durant la totalité de leur durée d'utilisation. En général, cette surveillance passe par des tirants de mesures et consiste en la mesure simultanée de la tension résiduelle et de la résistance électrique prouvant l'isolation du tirant par rapport à son environnement (ERM I) sur les tirants de mesures. Enfin, en fonction de l'accessibilité des tirants, le câblage des appareils de mesures vers un coffret est judicieux. Dans ce cas, on préférera des tubes et coffrets inox ou alu yc moyens de fixations au tubes PE et brides plastiques.

7.2 Plans de surveillance

La surveillance d'un ouvrage ancré sur toute sa durée d'utilisation, à long terme, exige la définition d'un plan de surveillance. En général, les tirants de mesures ne suffisent pas et un dispositif de mesures redondantes, par exemple à l'aide d'inclinomètre ou d'extensomètres, permet d'identifier correctement les manques. Les documents d'exécution tels que PV de forages et d'injection, PV de mises en tension doivent être conservés en plus des plans conformes, afin de juger correctement du comportement de l'ouvrage ancré.

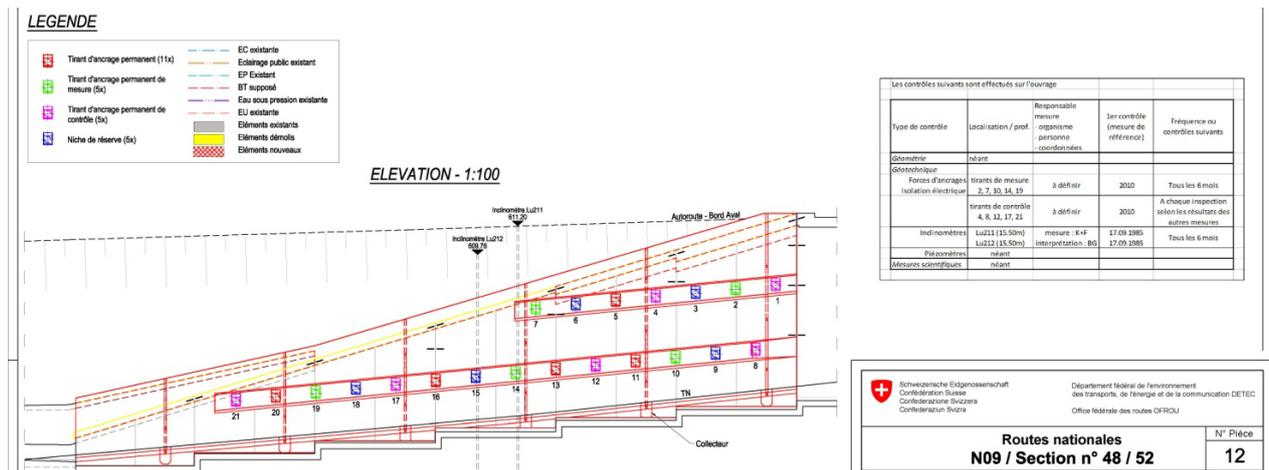


Figure 8 : exemple de plan de surveillance

8 Conclusions

En conclusion, les chapitres sur les tirants d'ancrages précontraints des normes SIA 267 et 267/1 sont en général clair concernant la phase d'étude. En phase d'appel d'offres, des compléments à ces articles doivent être inclus dans les conditions particulières du projet et dans le plan de contrôle. Toutes les étapes de construction doivent être planifiées avec des marges.

Lors de la réalisation, la satisfaction des exigences demandées par la norme SIA 267 et les normes liées demande une DLT rigoureuse et des contrôles d'exécution consciencieux. Enfin, des documents conformes du projet d'ancrages, en plus du plan de surveillance, doivent absolument être conservés

9 Références bibliographiques

- [1] Norme SIA V191 « Tirants d'ancrages précontraints », 1995
- [2] Cahier technique SIA 2009 « Dimensionnement des ouvrages ancrés », 1996
- [3] Norme SIA 191-1 « Tirants d'ancrage passifs (clous) à adhérence totale », 2001
- [4] Cahier technique SIA 2010 « Tirants d'ancrage passifs », 1995
- [5] Normes SIA 269/x « Maintenance des structures porteuses », 2011
- [6] Documentation SIA « Géotechnique, introduction à la norme SIA 267 » D 0187, 2003
- [7] Directive OFROU 12005 « Tirants d'ancrages », v 3.10, 2007
- [8] Leitfaden für die « Technische Zulassung von Ankersystemen gemäss Norm SIA 267 », EMPA 2004
- [9] Norme SIA 193.131 (EN 1537) « Exécution des travaux géotechniques spéciaux – tirants d'ancrages », 2000
- [10] Normes SIA 162.071/162.072/162.073 (EN 446/447/448) « Coulis pour câbles de précontrainte – méthode d'essais, procédures d'injection des coulis et prescriptions pour les coulis courants », 2007
- [11] Directive OFROU « Choc provenant de véhicules routiers », 2005
- [12] Norme SIA 118/267 « Conditions générales pour la géotechnique », 2004

Auteur:

..... Dr Frédéric Mayoraz
Ing. civil dipl EPF - Géotechnicien, Membre de la direction - administrateur
 De Cérenville Géotechnique SA
 1024 Ecublens

29.04.2013