

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie civil

Caractérisation et optimisation de la performance des cartouches d'ancrage AMBEX  
sous chargement soutenu

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie civil

Luz POLO

Jury : Richard GAGNÉ (directeur)  
Patrice RIVARD  
Jacques BERTRAND

# RÉSUMÉ FRANÇAIS

Les systèmes d'ancrages adhésifs sont utilisés dans plusieurs applications en génie civil, notamment en réhabilitation et réparation des ouvrages d'infrastructure tels que des dalles de ponts, chaussées, tunnels, barrages, murs, poteaux, ainsi que dans certains travaux d'exploration géologique et minière. Un système d'ancrage adhésif comprend trois composants : l'élément d'ancrage : une barre d'armature ou une tige filetée ; le matériau adhésif : polymérique, cimentaire ou hybride ; et le substrat : en béton ou en maçonnerie. Les charges imposées sur les barres d'ancrage sont transmises au substrat par adhérence chimique (réactions) et liaison mécanique (*interlock*) entre les composants mentionnés. Le modèle de design d'adhérence uniforme établit que la performance structurale d'un système d'ancrage adhésif est déterminée par la contrainte de l'adhérence ( $\tau$ ), développée sur toute la surface de contact, entre les composants à l'intérieur du trou d'ancrage.

Ce projet, en partenariat avec l'entreprise AMBEX, étudie et évalue la performance des systèmes d'ancrage avec adhésifs en matériau cimentaire, par rapport au comportement sous chargement continu. Pour ce faire, on a ancré des barres d'armature dans un substrat en béton conventionnel. Les deux adhésifs étudiés sont les cartouches d'ancrage AAC et ARC. On a tenu compte des paramètres géométriques et d'installation en assurant la rupture de l'adhérence lors des essais d'arrachement. On a évalué deux conditions en service: température ambiante (21°C) et élevée (43°C). On a effectué des essais statiques de traction et des essais sous chargement soutenu. Les résultats sont présentés dans des graphiques « charge-déplacement-temps », afin d'établir des prédictions futures de comportement. Le projet montre les avantages des ancrages adhésifs en matériau cimentaire, tels que le taux de fluage très faible sous chargement soutenu, et quelques limitations aussi, comme la variabilité des résultats à l'arrachement pour les ancrages avec la cartouche AAC.

**Mots-clés.** Ancrage adhésif post-installé, Système d'ancrage, Contrainte d'adhérence, Rupture de l'adhérence, Chargement soutenu, Cartouche d'ancrage, Modèle d'adhérence uniforme.

# RÉSUMÉ ANGLAIS

Adhesive anchoring systems are used in many civil engineering applications, including rehabilitation and repair of infrastructure such as bridge decks, roadways, tunnels, dams, walls, columns, and in some geological explorations and mining. An adhesive anchoring system consists of three components: the anchor: a reinforcing bar or a threaded rod; the adhesive material: polymeric, cementitious or hybrid; and a substrate of concrete or masonry. The loads applied on the anchor rods are transmitted by a chemical adhesion to the substrate (reactions) and mechanical interlock between the components mentioned. The design pattern of uniform adhesion establishes that the structural performance of an adhesive anchoring system is determined by the bond strength ( $\tau$ ) developed across the contact surface, between the components within the anchor hole.

This project, in partnership with AMBEX, investigates and assesses the performance of an anchoring system, with an adhesive of cementitious material, related to the creep behaviour. To achieve this, steel rebars were anchored in a conventional concrete substrate. Two adhesives were evaluated: AAC and ARC cartridges. Geometrical and installation parameters were taken into account, to ensure bond failure during pullout tests. Two service conditions were studied: room temperature (21°C) and high temperature (43°C). Static tensile tests and creep tests were performed. The results are presented in graphs “load-displacement-time”, in order to make predictions of future behavior. The project shows the advantages of adhesive anchors made of cementitious material, as a feeble creep rate at sustained load, and also some limitations, as the variability of tension test results for anchors tested with AAC cartridge.

**Keywords.** Post-installed adhesive anchor, Anchoring system, Bond strength, Bond failure, Creep, Anchor cartridge, Uniform bond model.

# REMERCIEMENTS

Je voudrais d'abord remercier mon directeur de recherche, M. Richard Gagné, pour sa contribution à la rédaction de ce rapport, son apport en connaissances et expertise technique dans le domaine des matériaux cimentaires, et pour le temps qu'il m'a accordé afin d'amener à bon terme ce projet de recherche.

J'aimerais également remercier M. Jacques Bertrand, président de la compagnie AMBEX pour le soutien financier, et au département de béton de l'Université de Sherbrooke, pour le soutien technique tout le long du projet de recherche, sans lesquels celui-ci n'aurait pas été possible.

Je tiens aussi à remercier les techniciens du laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke et du département de R&D de la compagnie AMBEX, pour leur collaboration dans la réalisation des essais, partie fondamentale de ce projet de recherche.

Enfin, j'offre ma gratitude aux professeurs du département de béton de l'Université de Sherbrooke, pour avoir enrichi mes connaissances en tant qu'ingénieure civile, et pour m'avoir appris des outils techniques nécessaires à l'exécution des travaux de recherche scientifique.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1 INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problématique et définition .....	2
1.2 Objectifs .....	3
1.3 Plan du document .....	3
<b>2 ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>4</b>
2.1 Définition d'un ancrage adhésif .....	4
2.2 Comportement structural .....	6
2.3 Modes de rupture .....	6
2.4 Modèles de design .....	8
2.5 Paramètres d'influence sur la performance .....	9
2.5.1 Paramètres géométriques .....	9
2.5.2 Paramètres liés à l'adhésif .....	11
2.5.3 Propriétés des barres et tiges d'acier .....	11
2.5.4 Caractéristiques du substrat (élément de béton) .....	12
2.5.5 Paramètres liés à l'installation (trou d'ancrage) .....	15
2.5.6 Conditions en service .....	17
2.6 Ancrages adhésifs sous chargement soutenu .....	19
2.6.1 ASTM E1512-01. <i>Standard Test Methods for Testing Bond Performance of Bonded Anchors</i> .....	20
2.6.2 AASHTO TP 84-10. <i>Evaluation in Adhesive Anchors in Concrete Under Sustained Loading Conditions</i> .....	20
2.7 Essais et qualification .....	22
2.7.1 ACI 355.4-11: <i>Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete</i> .....	22
2.7.2 ETAG 001, Part 5: <i>Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. Chapitre 5: Bonded Anchors</i> .....	24
2.8 Méthodes de calcul .....	25
2.8.1 ACI 318-11. <i>Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Annexe D: Anchoring to Concrete</i> .....	26
2.8.2 ICC-ES AC308. <i>Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements</i> .....	26
2.8.3. ETAG 001. <i>Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. Annex C: Designed Methods for Anchorages</i> .....	27
2.9 Sommaire .....	27
<b>3 BUT DE LA RECHERCHE – PROGRAMME D'ESSAIS .....</b>	<b>29</b>
3.1 Étape I : Propriétés des matériaux .....	30
3.2 Étape II : Comportement des ancrages sous chargement statique .....	31
3.3 Étape III : Performance des ancrages sous chargement soutenu .....	32

<b>4</b>	<b>MATÉRIAUX ET PROCÉDURES</b>	<b>34</b>
4.1	Éléments d’ancrage	34
4.1.1	Blocs de béton	34
4.1.2	Barres d’ancrage	34
4.1.3	Adhésifs cimentaires	35
4.2	Installation des ancrages	36
4.2.1	Géométrie – espacement des ancrages	36
4.2.2	Procédure d’installation	36
4.3	Appareils et instrumentation	39
4.3.1	Essais sur les barres et les adhésifs	39
4.3.2	Essais statiques d’arrachement des ancrages	40
4.3.3	Essais de traction sous chargement soutenu	41
4.3.4	Système d’acquisition des données	43
4.3.5	Calibration des capteurs de force et de déplacement	44
<b>5</b>	<b>PRÉSENTATION DES RÉSULTATS</b>	<b>45</b>
5.1	Essais sur les barres et les adhésifs	45
5.1.1	Résistance à la traction des barres d’ancrage	45
5.1.2	Résistance à la compression et temps de prise : AAC et ARC	45
5.2	Calcul des propriétés mécaniques des ancrages	47
5.2.1	Charge maximale $N_u$	47
5.2.2	Charge à la perte d’adhérence $N_{adh}$	47
5.2.3	Contrainte d’adhérence $\tau$	48
5.3	Essais statiques d’arrachement des ancrages	49
5.3.1	Adhésif AAC (400W et 500W)	49
5.3.2	Adhésif ARC	56
5.4	Essais sous chargement soutenu	62
5.4.1	Adhésif AAC (23°C et 43°C)	63
5.4.2	Adhésif ARC (23°C et 43°C)	71
5.5	Essais statiques de traction <i>post-creep</i>	74
5.6	Essais d’arrachement chez AMBEX – Adhésif AAC – 500W	77
<b>6</b>	<b>DISCUSSION ET ANALYSE</b>	<b>80</b>
6.1	Influence de la longueur d’ancrage	80
6.2	Influence de la nuance de l’acier	80
6.3	Influence du type d’adhésif : AAC vs ARC	81
6.3.1	Valeur de la contrainte $\tau$	81
6.3.2	Variabilité des résultats par série	81
6.3.3	Propriétés mécaniques	82
6.4	Comportement des ancrages sous chargement soutenu	82
6.4.1	Influence du taux de chargement	82
6.4.2	Déplacement de fluage : ARC vs AAC	83
6.5	Comportement des ancrages post-fluage	83
6.6	Comportement des ancrages à 43°C	84
6.7	Prédictions de performance	85

<b>7 CONCLUSIONS .....</b>	<b>91</b>
<b>ANNEXE A ESSAIS STATIQUES DE TRACTION .....</b>	<b>95</b>
<b>ESSAIS STATIQUES <i>POST-CREEP</i> .....</b>	<b>98</b>
<b>ANNEXE B CALCULS DES PROJECTIONS DE DÉPLACEMENT .....</b>	<b>101</b>
<b>ANNEXE C PROJECTIONS APPROCHE LOGARITHMIQUE .....</b>	<b>104</b>
<b>ANNEXE D PROJECTIONS APPROCHE FINDLEY .....</b>	<b>110</b>
<b>ANNEXE E PHOTOS .....</b>	<b>114</b>
<b>Liste de références .....</b>	<b>117</b>

# LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Ancrages utilisés en génie civil .....	4
Figure 2.2	Présentation et installation des adhésifs pour ancrages adhésifs .....	5
Figure 2.3	Mécanismes de transmission des charges dans un ancrage adhésif .....	7
Figure 2.4	Modes potentiels de rupture des ancrages adhésifs .....	8
Figure 2.5	Modèle d'adhérence uniforme dans les ancrages adhésifs .....	9
Figure 2.6	Paramètres dimensionnels d'un ancrage adhésif .....	10
Figure 2.7	Valeurs de $N_U$ de l'adhésif et $T_{adm}$ des barres d'acier et des tiges filetées .....	12
Figure 2.8	Rapport de la valeur $N_U$ dans des éléments fissurés et non fissurés, selon la grandeur de fissures. Adhésif : résine en polyester. $h_{ef}/d = 8$ .....	13
Figure 2.9	Variations de la contrainte d'adhérence $\tau$ dans des ancrages polymériques, pour diverses valeurs de $f'_c$ du substrat .....	14
Figure 2.10	Variations de la valeur $\tau$ dans des ancrages polymériques, selon le type de granulat du substrat .....	15
Figure 2.11	Variations de la valeur $\tau$ dans des ancrages polymériques, selon la condition de nettoyage du trou d'ancrage .....	16
Figure 2.12	Variations de la valeur $\tau$ dans des ancrages polymériques, selon la condition d'humidité du trou d'ancrage .....	17
Figure 2.13	Charges relatives de rupture des ancrages adhésifs à l'époxy et polyester en fonction de la température .....	18
Figure 2.14	Comportement sous chargement soutenu, charge de traction constante .....	19
Figure 2.15	Graphique déplacement – temps (d-t) ASTM E1512-01 .....	21
Figure 2.16	Graphique % charge moyenne statique – temps de rupture (s-t), AASHTO TP 84-10 .....	22
Figure 2.17	Graphique déplacement – temps (d-t) ETAG 001, Part 5 .....	25
Figure 3.1	Cadre de référence du projet de recherche .....	29
Figure 4.1	Barres d'acier 400 W – 15M .....	35
Figure 4.2	Cartouches AMBEX AAC <sup>®</sup> 19 mm et ARC <sup>®</sup> 19 mm .....	35
Figure 4.3	Configuration des ancrages dans les substrats de béton. Distances en mm .....	36
Figure 4.4	Procédure d'installation des ancrages .....	37
Figure 4.5	Préparation des spécimens pour les essais sur cubes .....	39
Figure 4.6	Essais de compression sur des cubes .....	39
Figure 4.7	Essais de temps de prise sur les adhésifs et appareil Vicat .....	40
Figure 4.8	Essais de traction directe sur les barres d'ancrage .....	40
Figure 4.9	Détails du montage des essais statiques de traction .....	41
Figure 4.10	Montage des essais sous chargement soutenu. Distances en mm .....	42
Figure 4.11	Détail des capteurs de force et de déplacement .....	42
Figure 4.12	Système d'acquisition des données VISHAY 5100B .....	43
Figure 4.13	Appareils de calibration des tiges filetées et des tandems .....	44
Figure 5.1	Graphiques charge – déplacement typiques des barres d'acier utilisées .....	46



Figure 5.2	Graphique typique charge – déplacement contrôlé par la résistance. AASHTO TP 84-10 .....	47
Figure 5.3	Valeurs de $N_u$ et $N_{adh}$ indiquées dans un des graphiques typiques charge – déplacement .....	48
Figure 5.4	Graphiques typiques charge - déplacement par série. Essais statiques de traction .....	49
Figure 5.5	Essais statiques de traction. AAC - 400 W – 23°C. Valeurs moyennes de $N_u$ , $N_{adh}$ et $\tau$ selon le temps de cure .....	53
Figure 5.6	Essais statiques de traction. AAC - 500 W – 23°C. Valeurs moyennes de $N_u$ , $N_{adh}$ et $\tau$ selon le temps de cure .....	54
Figure 5.7.	Variabilité des moyennes de $N_u$ , $N_{adh}$ et $\tau$ selon le temps de cure. Essais statiques de traction ARC - 500 W – 23°C – $h_{ef}$ = 125 mm et 150 mm .....	59
Figure 5.8	Essais statiques de traction. ARC – 500 W – 23°C. Valeurs moyennes de $N_u$ , $N_{adh}$ et $\tau$ selon le temps de cure .....	61
Figure 5.9	Graphiques de chargement soutenu Groupe 1. AAC-400-150-23-A .....	65
Figure 5.10	Graphiques de chargement soutenu Groupe 2. AAC-400-125-23-B .....	67
Figure 5.11	Graphiques de chargement soutenu Groupe 3. AAC-500-150-23-C .....	69
Figure 5.12	Graphiques de chargement soutenu Groupe 4. AAC-500-150-43-D .....	71
Figure 5.13	Graphiques de chargement soutenu Groupe 5. ARC-500-150-23-B .....	72
Figure 5.14	Graphiques de chargement soutenu Groupe 6. ARC-500-150-43-C .....	74
Figure 5.15	Essais statiques <i>post-creep</i> à 23°C. Valeurs moyennes de $N_{adh}$ , $N_{adh(80\%)}$ , $N_{adh(70\%)}$ et $N_{adh(60\%)}$ .....	76
Figure 5.16	Essais statiques <i>post-creep</i> à 43°C. Valeurs moyennes de $N_{adh}$ et $N_{adh(55\%)}$ .....	76
Figure 5.17	Essais statiques de traction (installation à 23°C). Valeurs moyennes de $N_{adh}$ . .....	78
Figure A-1	Graphiques superposés charge - déplacement. Adhésif AAC. Acier 400 W. 23°C .....	95
Figure A-2	Graphiques superposés charge - déplacement. Adhésif AAC. Acier 500 W. 23°C .....	96
Figure A-3	Graphiques superposés charge - déplacement. Adhésif AAC. 23°C .....	97
Figure A-4	Graphique superposé charge - déplacement. Adhésif AAC. Acier 500 W. 43°C .....	97
Figure A-5	Graphiques superposés charge - déplacement. Adhésif ARC. $h_{ef}$ = 150 mm. 23°C .....	98
Figure A-6	Graphiques superposés charge - déplacement. Adhésif ARC. $h_{ef}$ = 125 mm. 23°C .....	99
Figure A-7	Graphique superposé charge - déplacement. Adhésif ARC. $h_{ef}$ = 150 mm. 43°C .....	99
Figure A.8	Graphiques superposés charge – déplacement. Essais statiques <i>post-creep</i> . 23°C .....	100
Figure A.9	Graphiques superposés charge – déplacement. Essais statiques <i>post-creep</i> . 43°C .....	100
Figure C-1	Projections logarithmiques Groupe 1. AAC-400-150-23-A .....	106
Figure C-2	Projections logarithmiques Groupe 2. AAC-400-125-23-B .....	107
Figure C-3	Projections logarithmiques Groupe 3. AAC-500-150-23-C .....	108

Figure C-4	Projections logarithmiques Groupe 4. AAC-500-150-43-D .....	108
Figure C-5	Projections logarithmiques Groupe 5. ARC-500-150-23-B .....	109
Figure C-6	Projections logarithmiques Groupe 6. ARC-500-150-43-C .....	109
Figure D-1	Projections Findley - Groupe 1. AAC-400-150-23-A .....	110
Figure D-2	Projections Findley - Groupe 2. AAC-400-125-23-B .....	111
Figure D-3	Projections Findley - Groupe 3. AAC-500-150-23-C .....	112
Figure D-4	Projections Findley - Groupe 4. AAC-500-150-43-D .....	112
Figure D-5	Projections Findley - Groupe 5. ARC-500-150-23-B .....	113
Figure D-6	Projections Findley - Groupe 6. ARC-500-150-43-C .....	113
Figure E-1	Blocs d'ancrage pour les essais statiques de traction .....	114
Figure E-2	Surface de rupture typique des ancrages .....	114
Figure E-3	Arrachement des ancrages pour différents temps de cure. Adhésif AAC .....	114
Figure E-4	Arrachement des ancrages pour différents temps de cure. Adhésif ARC .....	115
Figure E-5	Blocs d'ancrage pour les essais de chargement soutenu .....	115
Figure E-6	Essais du chargement soutenu en cours. Adhésif AAC – 23°C .....	115
Figure E-7	Essais du chargement soutenu en cours. Adhésif ARC – 23°C .....	116
Figure E-8	Essais du chargement soutenu en cours. AAC et ARC. 43°C – 55% N <sub>adh</sub> .....	116
Figure E-9	Défaillance des ancrages sous chargement soutenu. Adhésif AAC - 23°C .....	116
Figure E-10	Détails du montage des essais de chargement soutenu.....	116

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Programme d'essais du projet de recherche – UdeS – Étape I .....	31
Tableau 3.2	Programme d'essais du projet de recherche – UdeS – Étape II .....	32
Tableau 3.3	Programme d'essais du projet de recherche – UdeS – Étape III .....	33
Tableau 4.1	Composants des substrats de béton .....	34
Tableau 4.2	Formulation typique des substrats de béton. Température : $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .....	34
Tableau 4.3	Sommaire des ancrages installés .....	38
Tableau 4.4	Dates d'installation et d'essai des ancrages .....	38
Tableau 5.1	Résultats des essais directs de traction sur les barres d'ancrage .....	45
Tableau 5.2	Résistance à la compression des adhésifs d'ancrage AAC et ARC .....	46
Tableau 5.3	Temps de prise des adhésifs d'ancrage AAC et ARC .....	46
Tableau 5.4	Ancrages avec l'adhésif AAC. Valeurs de $N_u$ , $N_{adh}$ et $\tau$ . Acier 400 W, $23^{\circ}\text{C}$ .....	51
Tableau 5.5	Ancrages avec l'adhésif AAC. Valeurs de $N_u$ , $N_{adh}$ et $\tau$ . Acier 500 W, $23^{\circ}\text{C}$ .....	52
Tableau 5.6	Ancrages avec l'adhésif AAC. Valeurs de $N_u$ , $N_{adh}$ et $\tau$ . Acier 500 W, $43^{\circ}\text{C}$ .....	55
Tableau 5.7	Ancrages avec l'adhésif ARC. Valeurs de $N_u$ , $N_{adh}$ et $\tau$ . $h_{ef} = 150$ mm, $23^{\circ}\text{C}$ .....	57
Tableau 5.8	Ancrages avec l'adhésif ARC. Valeurs de $N_u$ , $N_{adh}$ et $\tau$ . $h_{ef} = 125$ et $150$ mm, $23^{\circ}\text{C}$ .....	58
Tableau 5.9	Ancrages avec l'adhésif ARC. Valeurs de $N_u$ , $N_{adh}$ et $\tau$ . $h_{ef} = 150$ mm, $43^{\circ}\text{C}$ .....	60
Tableau 5.10	Moyennes des charges $N_{adh}$ pour les chargements soutenus à appliquer aux ancrages .....	62
Tableau 5.11	Moyennes des déplacements associés aux charges $N_{adh}$ du Tableau 5.10 .....	63
Tableau 5.12	Groupes et charges appliquées par spécimen d'ancrage. Essais de chargement soutenu .....	64
Tableau 5.13	Résultats des essais statiques <i>post-creep</i> .....	75
Tableau 5.14	Ancrages avec l'adhésif AAC. Valeurs de $N_u$ , $N_{adh}$ et $\tau$ . Acier 500 W, $23^{\circ}\text{C}$ ...	78
Tableau 6.1	Valeurs de déplacement des ancrages sous chargement soutenu. Projections logarithmique et Findley .....	86
Tableau B.1	Projections de déplacement Groupe 1 (AAC - $23^{\circ}\text{C}$ ). Approche Findley .....	101
Tableau B.2	Projections de déplacement Groupe 1 (AAC - $23^{\circ}\text{C}$ ). Approche logarithmique .....	101
Tableau B.3	Projections de déplacement Groupe 2 (AAC - $23^{\circ}\text{C}$ ). Approche Findley .....	102
Tableau B.4	Projections de déplacement Groupe 2 (AAC - $23^{\circ}\text{C}$ ). Approche logarithmique .....	102

Tableau B.5	Projections de déplacement Groupe 3 (AAC - 23°C). Approche Findley ....	103
Tableau B.6	Projections de déplacement Groupe 3 (AAC - 23°C). Approche logarithmique .....	103
Tableau B.7	Projections de déplacement Groupe 4 (ARC - 23°C). Approche Findley .....	103
Tableau B.8	Projections de déplacement Groupe 4 (ARC - 23°C). Approche logarithmique .....	104
Tableau B.9	Projections de déplacement Groupe 5 (AAC - 43°C). Approche Findley ....	104
Tableau B.10	Projections de déplacement Groupe 5 (AAC - 43°C). Approche logarithmique .....	104
Tableau B.11	Projections de déplacement Groupe 6 (ARC - 43°C). Approche Findley .....	105
Tableau B.12	Projections de déplacement Groupe 6 (ARC - 43°C). Approche logarithmique .....	105

# LISTE DES SYMBOLES

COV	Coefficient de variation
$d$	Diamètre de la barre d'ancrage, mm
$d_{min}$	Diamètre minimal de la barre d'ancrage, mm
$d_o$	Diamètre du trou d'ancrage, mm
$F_y$	Limite d'élasticité de la barre d'ancrage, kN
$F_u$	Charge ultime de la barre d'ancrage, kN
$f'c$	Résistance à la compression du substrat d'ancrage, MPa
$h_{ef}$	Longueur effective d'ancrage, mm
$h_{min}$	Profondeur minimale du substrat d'ancrage, mm
$N_u$	Charge maximale, kN
$N_{u,k}$	Charge maximale caractéristique, kN
$N_{adh}$	Charge à la perte d'adhérence, kN
$N_{adh,k}$	Charge caractéristique à la perte d'adhérence, kN
$\Delta_{t=0}$	Déplacement au début du chargement soutenu, mm
$\Delta_t$	Déplacement à un temps $t$ donné, mm
$\Delta_{lim}$	Déplacement moyen correspondant aux charges $N_{adh}$ , mm
$\sigma_y$	Résistance de fluage de la barre d'ancrage, MPa
$\tau$	Contrainte d'adhérence, MPa
$\tau_k$	Containte caractéristique d'adhérence, MPa

# 1. INTRODUCTION

Les ancrages adhésifs sont utilisés dans plusieurs applications en génie civil, notamment en réhabilitation et réparation des ouvrages d'infrastructure tels que des dalles de ponts, chaussées, tunnels, barrages, murs, poteaux, ainsi que dans certains travaux d'exploration géologique et minière. Les ancrages adhésifs ont été étudiés de façon exhaustive pendant environ 30 ans. Ils sont utilisés dans les ouvrages où les forces statiques de traction sont prédominantes. Les performances des ancrages adhésifs doivent être vérifiées expérimentalement avant d'être utilisés, dans les cas où les forces dynamiques (i.e. sismiques) sont considérées, dans les milieux très agressifs (chlorurés, sulfatés, exposés aux radiations) ou dans les structures sous l'eau.

Dans le domaine des ancrages en génie civil, les deux chercheurs les plus reconnus au niveau mondial sont le Dr. Roland A. Cook, enseignant à l'Université de la Floride (Etats-Unis) et le Dr. Rolf Eligehausen, professeur à l'Université de Stuttgart (Allemagne). Sous leur direction, des équipes de travail ont accompli plusieurs études pour des compagnies privées et pour l'avancement de la recherche fondamentale. Concernant les systèmes d'ancrages adhésifs, et sur la base de nombreux essais avec divers types d'adhésifs (notamment des résines polymériques), Cook et Eligehausen ont établi des modèles de comportement et des méthodes de design éprouvés pour les ancrages adhésifs [Eligehausen et Cook, 2006]. Ceci a permis, par exemple, d'ajouter tout récemment des critères concernant spécifiquement le design des ancrages adhésifs, dans l'annexe D de la norme ACI-318-11, certifiée dans plusieurs pays pour la conception de structures en béton armé.

Les chercheurs travaillant dans le domaine des ancrages adhésifs font très souvent référence aux travaux de Cook et/ou d'Eligehausen [Bajer et Barnat, 2011 ; Robinson et Said, 2011 ; El Menoufy, 2010]. Présentement, on effectue des études dans des universités européennes, américaines et japonaises, analysant notamment l'influence des facteurs géométriques et des conditions en service sur le comportement des systèmes d'ancrages adhésifs. L'Université de la Floride et l'Université de Stuttgart réalisent actuellement des études sur la performance à long terme des ancrages adhésifs.

## 1.1 Problématique et définition

Les études expérimentales effectuées sur des ancrages avec adhésifs polymériques ont démontré la bonne performance de ceux-ci, en tenant compte de plusieurs paramètres. Les études de la performance des ancrages avec adhésifs à base de matériaux cimentaires sont encore en cours de développement. Les matériaux cimentaires offrent une alternative prometteuse dans un contexte de développement durable puisqu'ils ne sont pas toxiques et ne contiennent pas de dérivés du pétrole, comme dans le cas des matériaux polymériques. De plus, ces matériaux sont beaucoup plus compatibles, physiquement et chimiquement avec les éléments en béton employés dans les ouvrages d'infrastructure. Au cours des deux dernières années, des chercheurs chinois ont accompli quelques travaux concernant spécifiquement les adhésifs cimentaires<sup>1</sup>.

Étant donné que les ancrages adhésifs polymériques occupent la principale part du marché, notamment en raison de à leur temps de cure rapide (un facteur très important si l'on pense aux échéanciers des travaux de génie civil), les ancrages adhésifs cimentaires sont actuellement utilisés dans les projets où les systèmes polymériques n'atteignent pas leurs meilleures performances : des milieux aux températures élevées ou vulnérables au feu par exemple. Des études montrent que les adhésifs d'ancrage hybrides (mélange des composants polymériques et cimentaires) ont des performances comparables aux ancrages adhésifs polymériques, par rapport aux résistances sous charges statiques de traction.

Ce projet vise à étudier la performance de deux nouveaux types d'adhésifs d'ancrages cimentaires produits par la compagnie AMBEX. Il permettra d'élargir le champ de connaissance pour la compréhension et la prédiction du comportement et de la performance de ces ancrages à long terme. Il contribuera aussi à promouvoir leur utilisation de façon sécuritaire et optimale dans des applications pratiques en génie civil.

---

<sup>1</sup> Peng, Xiao-Qin, Yan-Meng Liu, An-Xin Zhong et Qiao Yang. *Experimental research on high-strength inorganic anchoring material*. 2012

Zheng, Wen-zhong, Wei-hong Chen et Jian-hua Zhang. *Experimental research on performance of bonded rebars with alkali-activated cementitious material*. 2010.

Zhou, Xingang. *Bond behavior of adhesive bonded bars in concrete under static and repeated loads and its application*. 2012

Changqing, Liu, Yu Jiangtao, Lu Zhoudao and Wang Kongfan. *An experimental study on bond behavior of post-installed rebar at high temperature*. 2012

## 1.2 Objectifs

Ce projet de recherche vise les principaux objectifs spécifiés suivants :

- Etudier, caractériser en laboratoire et évaluer la performance des cartouches d'ancrages cimentaires AMBEX AAC et AMBEX ARC sous chargement soutenu pour différents niveaux de charge et conditions de température en service.
- Mesurer et prédire le fluage à long terme des ancrages cimentaires à partir des graphiques de projections de déplacement, lors des essais sous chargement soutenu.
- Vérifier l'influence de certains facteurs reliés à l'installation des ancrages cimentaires sur leur performance en traction.

## 1.3 Plan du document

Ce document est divisé en 6 chapitres : le Chapitre 2 présente un aperçu de la littérature existante sur les ancrages adhésifs, mettant en évidence le comportement sous chargement soutenu et les facteurs d'influence de la performance des ancrages. Le Chapitre 3 présente le but de la recherche et le programme d'essais. La description des matériaux, des appareils et des procédures d'essais est présentée au Chapitre 4. Le Chapitre 5 présente la synthèse des résultats expérimentaux. Le Chapitre 6 présente l'analyse globale des résultats. Les conclusions et recommandations sont formulées au Chapitre 7.



## 2. ÉTAT DE L'ART

### 2.1 Définition d'un ancrage adhésif.

Les ancrages sont classifiés en deux grands groupes : installés in-situ et post-installés (Figure 2.1). Cette deuxième famille comprend des ancrages mécaniques et des ancrages chimiquement adhérents (*bonded*). Les ancrages adhérents sont de deux types : adhésifs et injectés au mortier (*grouted*). Les ancrages adhésifs sont divisés en fonction de l'adhésif employé : coulis cimentaire, adhésifs chimiques (polymériques) ou une combinaison des deux (hybrides). Ce projet de recherche porte exclusivement sur la performance des ancrages adhésifs à base de matériaux cimentaires.

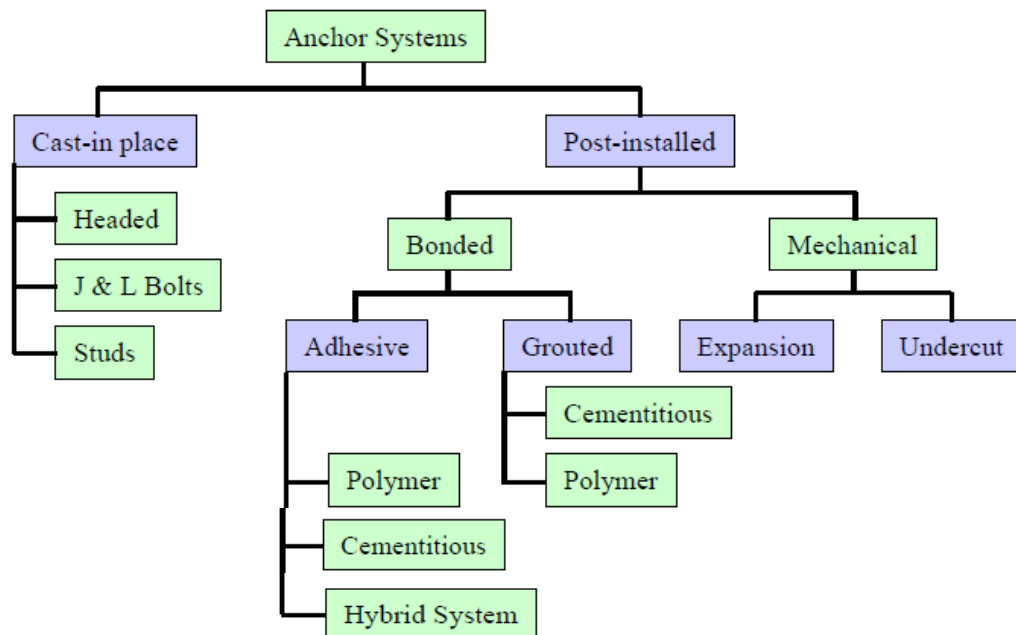


Figure 2.1 Ancrages utilisés en génie civil [Cook *et al.*, 2003]

Les ancrages adhésifs sont constitués de barres d'armature conventionnelles ou de tiges filetées sans tête. Ils sont installés dans des éléments de béton (substrat) en forant un trou, dont le diamètre est de 10% à 25% plus grand que celui de la barre (tige). Le tout est lié dans le trou par un matériau adhésif, soit à base de polymères (un mélange de résine, plus un agent de cure), soit à base d'un coulis de ciment (normalement du ciment à prise rapide). Très souvent, les ancrages adhésifs sont utilisés lorsqu'une mise en service rapide est requise [Cook *et al.*, 2003 ; Powers Fasteners, 2010]. Il existe trois principaux types d'ancrages adhésifs :

- Ancrages polymériques (organiques) Les adhésifs sont de plusieurs types, dont les plus répandus sont les époxy, les vinylesters et le polyester<sup>2</sup>. La norme ASTM C881<sup>3</sup> présente 7 types d'ancrages à base d'époxy, en les regroupant également en 6 classes et 3 niveaux de viscosité.
- Ancrages cimentaires (inorganiques) Les adhésifs à base de ciment à haute résistance initiale, à expansion et à retrait contrôlé. Certains adhésifs contiennent en plus du sable très fin et des adjuvants<sup>4</sup>.
- Ancrages hybrides Ils contiennent des matériaux polymériques, mais aussi des agents de cure, et des fillers, et des matériaux cimentaires<sup>5</sup>.

Les adhésifs commerciaux sont disponibles en trois formats : 1. Capsules en tubes de verre ou de plastique, lesquels sont insérés directement dans le trou d'ancrage. 2. Cartouches en emballages souples, injectées avec des pistolets ou insérées directement dans les trous. 3. Composants en sacs à mélanger sur site (Figure 2.2) [ETAG 001 Part V (EOTA), 2008 ; Wollmershauser et Mattis, 2008].

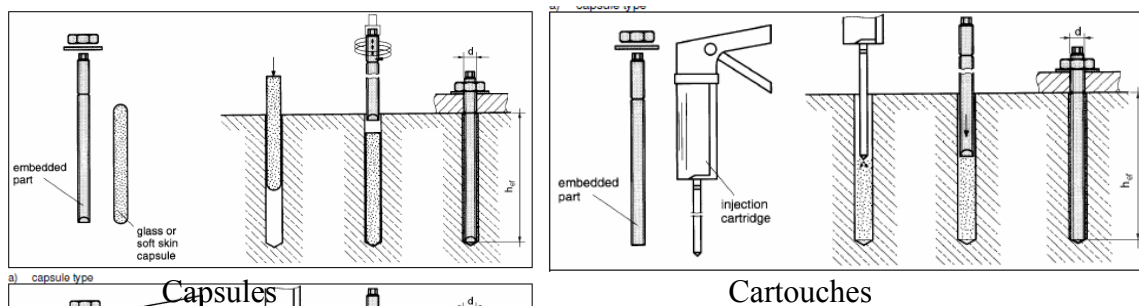


Figure 2.2 Présentation et installation des adhésifs pour ancrages adhésifs [ETAG 001 Part V (EOTA), 2008]

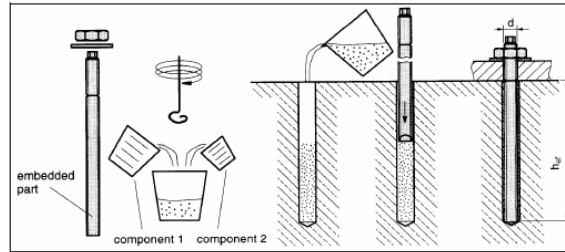
<sup>2</sup> SIKA® AnchorFix®-1. Adhésif d'ancrage à prise rapide. Fiche technique du produit. Edition 01, Sika Canada Inc. Pointe-Claire QC, Canada, 2012, 4 p.

<sup>3</sup> ASTM C881/C881M-10. *Standard Specification for Epoxy-Resin-Base Bonding Systems for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken PA, États-Unis, 2010, 5 p.

<sup>4</sup> MASTERFLOW® MD 928. Coulis non métallique sans retrait de haute précision à base de granulats non métalliques avec temps d'ouvrabilité prolongé. Données techniques du produit. BASF Construction Chemicals, Shakopee MN, États-Unis, 2008, 4 p.

<sup>5</sup> SPEED-E-ROCK™. Coulis de ciment à prise rapide pour ancrage. Fiche Technique 3930-99. W.R. MEADOWS Inc. Milton ON, Canada, 2012, 2 p.

<sup>5</sup> HILTI™ HIT HY-150: MAX Adhesive Anchoring System. *Product Technical Guide*. HILTI Inc, Tulsa OK, États-Unis, 2012, 45 p. Hybrid adhesive combining urethane, methacrylate resin, hardener, cement and water.



## Mélanges

Figure 2.2 (suite) Présentation et installation des adhésifs pour ancrages adhésifs [ETAG 001 Part V (EOTA), 2008]

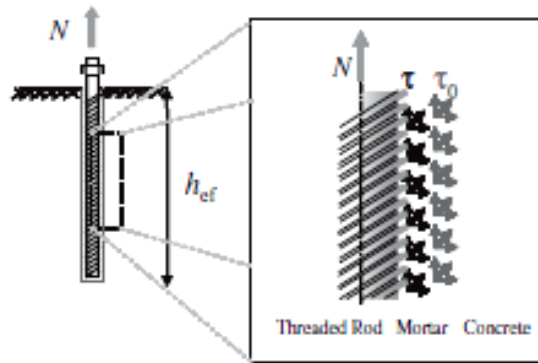
## 2.2 Comportement structural.

Les charges des ancrages adhésifs sont transmises au substrat par adhérence chimique (réactions) et liaison mécanique (*interlock*) entre la barre d'acier, l'adhésif et le substrat (Figure 2.3) [NCHRP (N°639), 2009 ; CALTRANS, 2012]. Les ancrages adhésifs sont utilisés dans les applications où les forces statiques de traction sont prédominantes. Dans les cas où des forces dynamiques (i.e. sismiques) sont considérées, dans les milieux vulnérables au feu ou dans les structures sous l'eau, les adhésifs d'ancrage doivent être vérifiés expérimentalement avant d'être utilisés [Wollmershauser et Mattis, 2008 ; CALTRANS, 2012].

La contrainte d'adhérence =  $\tau$  (*bond strength*) est la valeur qui établit la performance structurale d'un ancrage adhésif. Elle est déterminée à partir de la résistance ultime d'adhérence en traction  $N_U$  (*ultimate tension load*), obtenue des essais statiques de traction (*static load tests*) et de chargement soutenu (*creep tests*). Les valeurs typiques de  $\tau$  pour les ancrages adhésifs polymériques et hybrides sont comprises entre 10 et 20 MPa [Cook et Konz, 2001 ; Bajer et Barnat, 2011 ; Bajer et Barnat, 2012].

## 2.3 Modes de rupture.

Les trois principaux types de rupture des ancrages adhésifs (Figure 2.4) sont les suivants [Powers Fasteners, 2010 ; ETAG 001 Part V (EOTA), 2008 ; ACI Committee 355, 2011 ; Simpson Anchor Systems, 2010 ; McVay *et al.*, 1996 ; Nakano *et al.*, 2012] :



Reprinted with permission from Eligchausen et al. (5).

Figure 2.3 Mécanismes de transmission des charges dans un ancrage adhésif [NCHRP (N° 639), 2009].

- Rupture du lien adhésif – arrachement (*Pullout failure*) : Défaillance de l'adhésif à l'interface substrat-adhésif (ou adhésif-barre d'acier). Elle est accompagnée, dans certains cas, d'une rupture d'un cône de béton peu profond. Une rupture combinée du lien adhésif et du substrat en cône (*breakout-pullout*), est le mode de rupture considéré dans la plupart des cas de design, de calcul et des conditions de service des ancrages adhésifs, quand on vise à évaluer la performance spécifique de l'adhésif d'ancrage [Bajer et Barnat, 2011].
- Rupture du substrat en cône (*Breakout failure*) : Génération d'une surface de rupture conique, projetée vers la surface de l'élément de béton. Ce type de rupture se produit lors des essais non-confinés, dans les ancrages installés à faibles longueurs d'ancrage, et dans le cas où la contrainte d'adhérence  $\tau$  du système d'ancrage est très élevée par rapport à celle du substrat.
- Rupture du substrat au bord de l'élément (*Splitting failure*) : Rupture ou fissuration d'une partie de l'élément de béton, parallèle à l'orientation de l'ancrage. Les ancrages installés à moins que la distance critique aux rives de l'élément de béton montrent ce type de rupture [Simpson Anchor Systems, 2010 ; Asmus, 2012].

La rupture de la barre (tige) n'est pas considérée ici. Néanmoins, elle peut se produire dans les cas où la nuance de l'acier s'avère insuffisante par rapport aux valeurs élevées de la contrainte d'adhérence  $\tau$  des adhésifs d'ancrage ou de la résistance du substrat. [Powers Fasteners, 2010; ETAG 001 Part V (EOTA), 2008; Simpson Anchor Systems, 2010; Hivin, 2012; Thota, 2010].

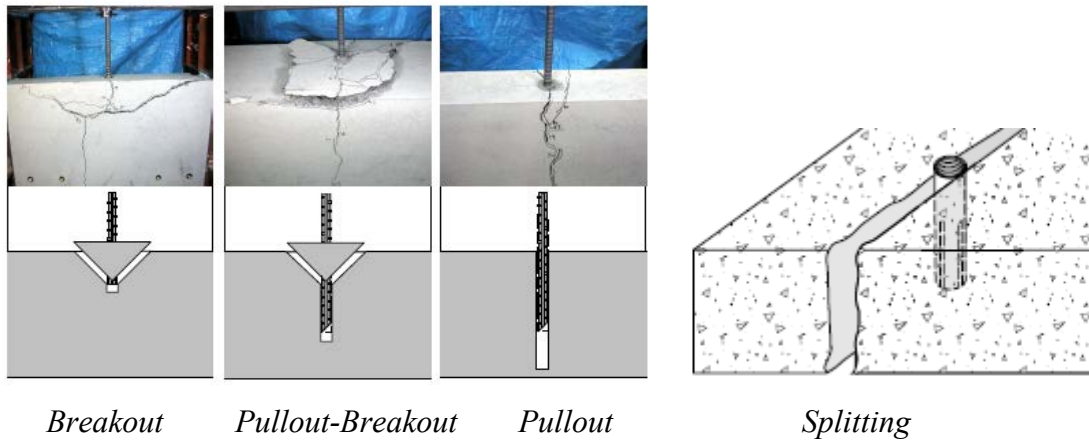


Figure 2.4 Modes potentiels de rupture des ancrages adhésifs  
[Powers Fasteners, 2010; Nakano *et al.*, 2012].

## 2.4 Modèles de design.

Les modèles de design sont adaptés aux différents modes de rupture. Voici un exposé sommaire des modèles présentement validés. [Hivin, 2012 ; AC308 (ISS ES), 2010 ; ETAG 001 Annex C (EOTA), 2010 ; Robinson et Said, 2011 ; El Menoufy, 2010] :

- Adhérence uniforme (pullout failure) : Ce modèle a montré sa validité aussi expérimentalement que numériquement. Il établit que la valeur de  $\tau$  reste uniforme dans toute la section d'ancrage  $A = \pi * d * h_{ef}$  (Figure 2.5) ;  $d$  est le diamètre de la barre (tige) d'ancrage et  $h_{ef}$  est la longueur effective d'ancrage. Le modèle est valide si le rapport  $d_o / d$  ( $d_o$  est le diamètre du trou d'ancrage) est inférieur à 1,5 ; si le rapport  $h_{ef} / d$  est compris entre 4 et 20, et si la section  $A \leq 580 \text{ cm}^2$ . Dans ce cas, la contrainte d'adhérence entre le substrat et l'adhésif ( $\tau_0$ ), et la contrainte entre l'adhésif et l'acier ( $\tau$ ) correspondent à la même valeur (Figure 2.3). La valeur de  $N_U$  est estimée avec l'équation 2.1 [McVay *et al.*, 1996; Eligehausen *et al.*, 2006] :

$$N_U = \tau * \pi * d_o * h_{ef} \quad (2.1)$$

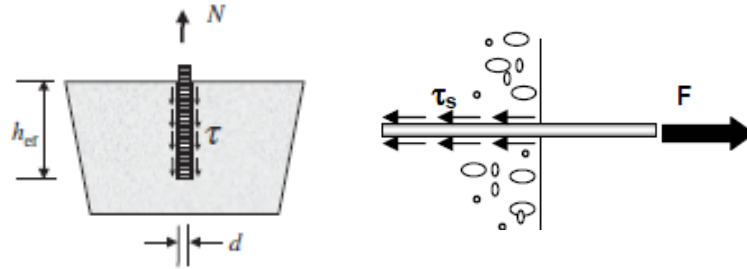


Figure 2.5 Modèle d'adhérence uniforme dans les ancrages adhésifs [NCHRP (N° 639), 2009 ; Hivin, 2012].

- Rupture conique (*breakout failure*) : Ce modèle dépend de la résistance à la compression du substrat et de la longueur effective de l'ancrage. Il a été vérifié expérimentalement dans les ancrages au rapport  $h_{ef} / d \approx 9$  [McVay *et al.*, 1996; Robinson et Said, 2011]. La valeur de  $N_U$  est calculée avec l'équation 2.2 :

$$N_U = 0,92 * h_{ef}^2 * \sqrt{f'_c} \quad (2.2)$$

- Rupture de bord (*splitting failure*) : Ce modèle dépend de l'épaisseur de l'élément de béton, de la distance de l'ancrage aux rives de l'élément, de la résistance à la compression du substrat et de la longueur effective de l'ancrage. Le développement d'un modèle de calcul peut être consulté dans la référence [Asmus, 2012].

## 2.5 Paramètres d'influence sur la performance

### 2.5.1 Paramètres géométriques

Les modèles de design et les méthodes de calcul d'ancrages adhésifs sont dépendants du dimensionnement de l'ancrage (Figure 2.6).

- Les valeurs de  $d$  sont comprises entre  $3/8 \gg (10M)$  et  $1 \ 1/4 \gg (35M)$ . La valeur de  $N_U$  augmente avec le diamètre des barres d'ancrage, puisqu'on a plus de surface d'adhérence barre – adhésif si le diamètre de la barre augmente [Thota, 2010; Robinson et Said, 2011].
- Le rapport  $h_{ef} / d$  détermine le mode de rupture prédominant. Si  $4 < h_{ef} / d < 20$ , on obtiendra la rupture de l'adhérence par arrachement, ou la rupture combinée arrachement – substrat en cône : Il faut remarquer que plus  $h_{ef}$  augmente, plus la valeur de  $N_U$  augmente [Robinson et Said, 2011]. Le rapport  $h_{ef} / d < 4$  produira la rupture du substrat en cône, tandis que  $h_{ef} / d > 20$  produira la rupture du substrat, ou de la barre,

ou de l'adhérence. Dans le cas des grandes longueurs d'ancrage, la valeur de  $N_U$  ne varie pas de façon significative [Powers Fasteners, 2010; CALTRANS, 2012 ; Çolak, 2007].

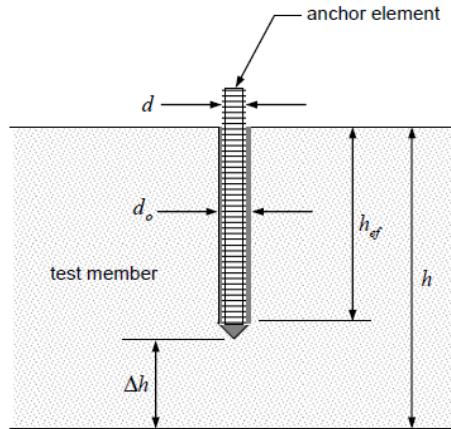


Figure 2.6 Paramètres dimensionnels d'un ancrage adhésif [AC308 (ISS ES), 2010].

- Le rapport  $d_o/d = 1,5$  sépare les ancrages adhésifs ( $d_o/d < 1,5$ ), des ancrages injectés au mortier ( $d_o/d > 1,5$ ). Plus le rapport  $d_o / d$  augmente, plus la contrainte d'adhérence  $\tau$  augmente, puisqu'on a plus de surface de contact substrat-adhésif et plus de quantité d'adhésif pour résister les charges à traction [Thota, 2010; Robinson et Said, 2011].
- Le rapport  $h_{ef} / h$  maximal est de 0,8 ( $h$  est l'épaisseur du substrat) : si  $h_{ef}$  dépasse 0,8  $h$ , l'élément de béton subira la rupture à traction.
- Ancrages en groupe : les espacements entre ancrages et les distances minimales de rive des éléments de béton sont établies par les normes et fiches techniques des adhésifs<sup>6</sup> [Powers Fasteners, 2010 ; Simpson Anchor Systems, 2010 ; ETAG 001 Annex C (EOTA), 2010 ; ACI Committee 318, 2011]. Si ces valeurs ne sont pas respectées pendant l'installation des groupes d'ancrages, la résistance du substrat contrôlera le design, plutôt que l'adhérence, et les valeurs de  $N_U$  calculées seront réduites entre 20 et 50% en conséquence [CALTRANS, 2012].

<sup>6</sup> SIKA® AnchorFix®-3CA/SIKA® AnchorFix®-3<sup>CA</sup>. Gels d'ancrage multiusages, injectables et non-affaissants. Fiche technique du produit. Edition 01, Sika Canada Inc, Pointe-Claire QC, Canada, 2012, 4 p.

HILTI™ HTE 50 Transportation Epoxy. Anchoring and Dowelling Adhesive for Transportation Applications. Supplement Rebar Information. HILTI Corp. Mississauga ON, Canada, 2012, 8 p.

## 2.5.2 Paramètres liés à l'adhésif

- Comportement mécanique : Il varie significativement entre les types d'adhésifs. Dans le cas des ancrages polymériques par exemple, des essais en laboratoire ont montré que les ancrages à base d'époxy donnent des valeurs de  $N_U$  de 1,5 à 2 fois plus élevées que ceux à base de vinylester et ceux à base d'adhésifs hybrides [Cook et Konz, 2001; Bajer et Barnat, 2012 ; Thota, 2010].
- Résistance chimique : Les adhésifs sont sensibles à la présence de plusieurs composants présents dans le milieu (huiles, produits chimiques, graisses). Il est nécessaire de conduire ou vérifier la durabilité des adhésifs vis-à-vis ces substances [NCHRP (N°639), 2009].
- Proportions et mélange des composants de l'adhésif : Il est importante de bien mélanger les composants des adhésifs polymériques, afin d'avoir un mélange complètement homogène. D'ailleurs, il est essentiel de s'assurer que l'adhésif remplit complètement tous les vides dans le trou d'ancrage, afin de produire une aire effective uniforme [NCHRP (N°639), 2009], qui résistera aux contraintes imposées en service (modèle de design d'adhérence uniforme)<sup>7</sup>.
- Temps de cure avant le premier chargement : Le temps de cure nécessaire pour développer les caractéristiques mécaniques des ancrages est plus long à basses températures, et il est plus court à températures élevées. En général, les ancrages polymériques peuvent être soumis aux charges après 24 heures de cure. Néanmoins, les essais en laboratoire sur des ancrages polymériques ont démontré que la valeur  $N_U$  après 24 heures de cure varie entre 80% et 85% de  $N_U$  obtenu après 7 jours de cure [NCHRP (N°639), 2009 ; Cook et Konz, 2001].

## 2.5.3 Propriétés des barres et tiges d'acier

Dans les systèmes d'ancrages adhésifs, la rupture de la barre ou de la tige d'acier n'est pas souhaitable, lors de sa mise en service. En ce qui concerne l'acier choisi pour l'ancrage, les

---

<sup>7</sup> La plupart des défaillances des ancrages adhésifs de l'accident du tunnel de Boston en 2006, furent reliées à la faible qualité de l'adhérence entre les tiges d'ancrage et la résine époxy. Les analyses in-situ ont montré que, malgré un design correct, les zones d'adhérence présentaient des vides, causant une réduction estimée de 40% des charges de traction calculées.



normes établissent des nuances minimales des barres, notamment selon le diamètre de la barre et la longueur effective d’ancrage [Simpson Anchor Systems, 2010]. Les fiches techniques des adhésifs incluent les nuances des aciers requis pour éviter la rupture des barres ou tiges, toujours en respectant les procédures d’installation spécifiées<sup>8</sup> (Figure 2.7).

1 ULTIMATE TENSION VALUES FOR THREADED ROD IN CONCRETE*									
ANCHOR DIAMETER (in)	BIT DIAMETER (in)	EMBEDMENT (in)	CRITICAL EDGE DISTANCE, C <sub>cr</sub> (in)	MINIMUM EDGE DISTANCE, C <sub>min</sub> (in)	ULTIMATE BOND STRENGTH (lb <sub>f</sub> )		ALLOWABLE STEEL STRENGTH (lb <sub>f</sub> )		
					CONCRETE STRENGTH (f' <sub>c</sub> ) 2300 psi	CONCRETE STRENGTH (f' <sub>c</sub> ) 4300 psi	A36/A307	A193 B7	300 SERIES STAINLESS
3/8	7/16	1 11/16	4 1/2	1 1/2	3520	5330	2110	4550	3630
3/8	7/16	3 3/8	4 1/2	1 1/2	10685	10785	2110	4550	3630
1/2	9/16	2 1/4	6	2	6435	9780	3750	8100	6470
1/2	9/16	4 1/2	6	2	15405	19985	3750	8100	6470
5/8	3/4	2 13/16	7 1/2	2 1/2	10600	17315	5870	12655	10130
5/8	3/4	5 5/8	7 1/2	2 1/2	29465	32730	5870	12655	10130
3/4	7/8	3 3/8	9	3	15780	24285	8460	18220	12400
3/4	7/8	6 3/4	9	3	28995	43460	8460	18220	12400
7/8	1	3 15/16	10 1/2	3 1/2	17425	31795	11500	24800	16860
7/8	1	7 7/8	10 1/2	3 1/2	40235	56865	11500	24800	16860
1	1 1/8	4 1/2	12	4	22980	35400	15020	32400	22020
1	1 1/8	9	12	4	54715	54945	15020	32400	22020
1 1/4	1 3/8	5 5/8	13 1/2	5	33220	54230	23480	50610	34420
1 1/4	1 3/8	11 1/4	13 1/2	5	74125	80180	23480	50610	34420

2 TENSION AND SHEAR VALUES FOR REINFORCING STEEL*									
ANCHOR SIZE	BIT DIAMETER (in)	EMBEDMENT (in)	CRITICAL EDGE DISTANCE, C <sub>c</sub> (in)	MINIMUM EDGE DISTANCE, C <sub>min</sub> (in)	TENSION ULTIMATE BOND STRENGTH (lb <sub>f</sub> )		ALLOWABLE STEEL STRENGTH TENSION OR SHEAR (lb <sub>f</sub> )		
					CONCRETE STRENGTH (f' <sub>c</sub> ) 2300 psi	CONCRETE STRENGTH (f' <sub>c</sub> ) 4300 psi	Grade 40	Grade 60	
# 3	7/16	3 3/8	4 1/2	1 1/2	6220	6220	2200	2640	
# 4	5/8	4 1/2	6	2	16430	16430	4000	4800	
# 5	3/4	5 5/8	7 1/2	2 1/2	23310	23310	6200	7440	
# 6	7/8	6 3/4	9	3	31145	31145	8800	10560	
# 7	1	7 7/8	10 1/2	3 1/2	36975	36975	12000	14400	
# 8	1 1/8	9	12	4	43320	43320	15600	18720	
# 9	1 3/8	11 1/4	13 1/2	5	61340	61340			

Figure 2.7. Valeurs de  $N_U$  de l’adhésif et  $T_{adm}$  des barres d’acier et des tiges filetées<sup>9</sup>.

#### 2.5.4 Caractéristiques du substrat (élément de béton)

- Éléments fissurés Plusieurs études expérimentales effectuées avec des ancrages adhésifs ont démontré que la valeur de  $\tau (N_U)$  dans les éléments de béton fissurés varie entre 0,3 et 0,5 fois la valeur de  $\tau (N_U)$  dans le béton non fissuré [Eligehausen et Balogh, 1995] (Figure 2.8). Les fissures détruisent partiellement l’adhérence de l’adhésif. Il faut remarquer qu’on parle ici des éléments qui ont des ouvertures de fissures autour des valeurs maximales prescrites par les codes ( $w \approx 0,3$  mm), et des fissures stables (passives).

<sup>8</sup>AC 100+ Gold®. Système d’Ancrage adhésif à Injection Vinylèster. Information du produit. POWERS Fasteners Inc. 2010, États-Unis, 18 p.  
 MAPEI®. Applications d’ancrage époxyde et d’adhésif. Guide de référence RGC0109F. MAPEI Corporation, Deerfield Beach FL, États-Unis, 2009, 4 p.

<sup>9</sup>SIKA® AnchorFix®-2CA. *Cold Weather Epoxy Acrylate Hybrid Anchoring Gel*. Product Data Sheet. Edition 01, Sika Canada Inc, Pointe-Claire QC, Canada, 2012, 3 p

En outre, on a montré que la procédure d'installation des ancrages, qui consiste à forer les éléments de béton avec une perceuse rotative, induit des contraintes de traction localisées autour des trous (microfissurations). Les charges de traction engendrées par l'ancrage en service peuvent aussi induire de la fissuration supplémentaire [Eligehausen et Balogh, 1995 ; Eligehausen *et al.*, 2001]

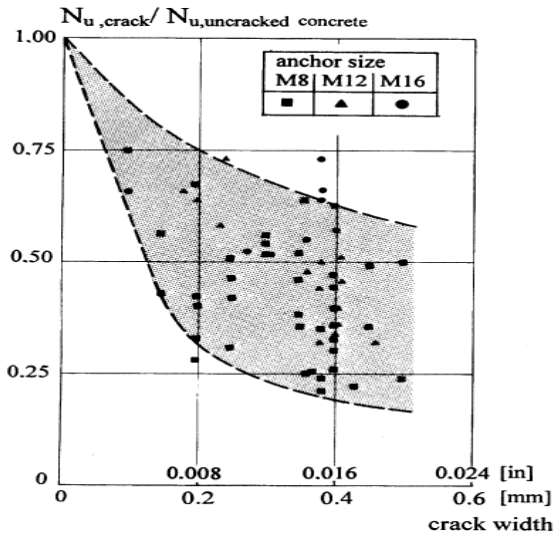


Figure 2.8 Rapport de la valeur  $N_U$  dans des éléments fissurés et non fissurés, selon la grandeur de fissures. Adhésif : résine en polyester.  $h_{ef}/d = 8$  [Eligehausen et Balogh, 1995].

- Résistance à la compression** Selon les normes concernant les ancrages adhésifs, la résistance à la compression du béton du substrat qui doit être prise en compte doit être comprise entre 20 MPa et 30 MPa [ETAG 001 Part V (EOTA), 2008 ; ACI Committee 355, 2011 ; AC308 (ISS ES), 2010]. Des essais effectués en laboratoire avec des ancrages polymériques dans des substrats de résistances diverses ont montré que la valeur de  $f'_c$  n'a pas une influence déterminante sur la performance de ce type d'ancrage (Figure 2.9) [Cook et Konz, 2001; Thota, 2010]. Par contre, d'autres essais montrent que des ancrages installés sur des substrats de béton de haute résistance (BHP,  $f'_c = 107$  MPa) ont une contrainte  $\tau$  environ 10% plus faible, par rapport aux substrats de béton conventionnel (32 MPa) [Randl et Gusella, 2011]. Cela peut résulter de la plus faible porosité des BHP, qui fait en sorte que ces substrats n'absorbent pas si bien l'adhésif, et l'adhérence diminue pour autant.

Il faut remarquer que, pour des ancrages installés dans des substrats de haute et très haute résistance, le mode de rupture prédominant est la rupture des barres d'acier, sans rupture par arrachement (*pullout*) ou conique (*breakout*) [Randl et Gusella, 2011 ; Nemes et Lubloi, 2011].

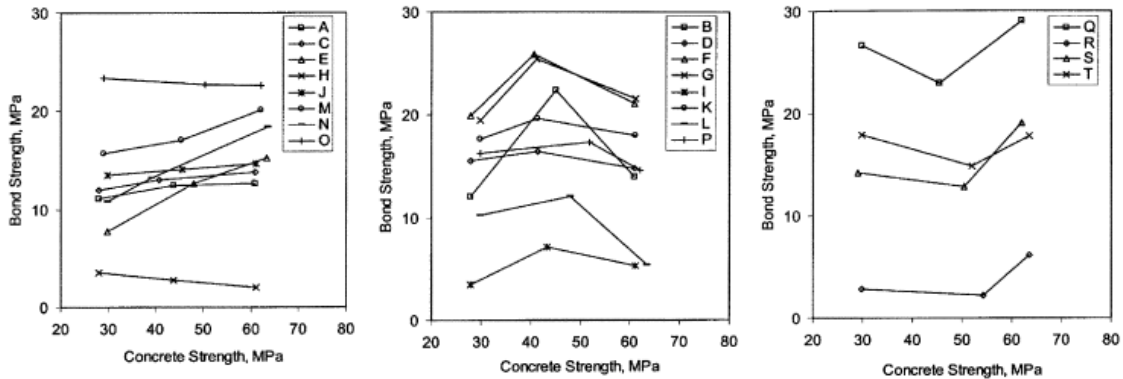


Figure 2.9 Variations de la contrainte d'adhérence  $\tau$  dans des ancrages polymériques, pour diverses valeurs de  $f'_c$  du substrat. [Cook et Konz, 2001].

- Type de béton Les normes de qualification ne portent uniquement pas sur des éléments de béton conventionnel, sans ajouts minéraux ni adjuvants. Néanmoins, des essais sur des substrats de béton avec des teneurs en fumée de silice de 25% et des ancrages à l'époxy n'ont pas montré des différences significatives dans la performance des ancrages adhésifs, par rapport au béton conventionnel [Grzesik, 2012].
- Granulats La porosité des granulats joue un rôle important dans la variation de la performance des ancrages adhésifs. (Figure 2.10). Suite au mûrissement du substrat des granulats naturels de rivière peuvent produire une interface pâte-granulat plus poreuse, ce que produit une porosité supplémentaire dans laquelle l'adhésif peut pénétrer et ainsi donner d'adhérence de l'ancrage [Cook et Konz, 2001 ; Jain, 2005].

Au moment du forage des trous d'ancrage, on a observé que les granulats les plus durs donnent des surfaces plus rugueuses, ce qui produit des contraintes d'adhérence  $\tau$  de 10% à 40% supérieures aux valeurs obtenues avec de granulats moins durs [Jain, 2005]. L'influence de la densité des granulats a été aussi vérifiée en laboratoire. Les ancrages dans des substrats de béton contenant des granulats légers donnent des valeurs de  $\tau$  de 20% à 30% inférieures à celles des substrats contenant des granulats de densité normale [Nemes et Lubloi, 2011].

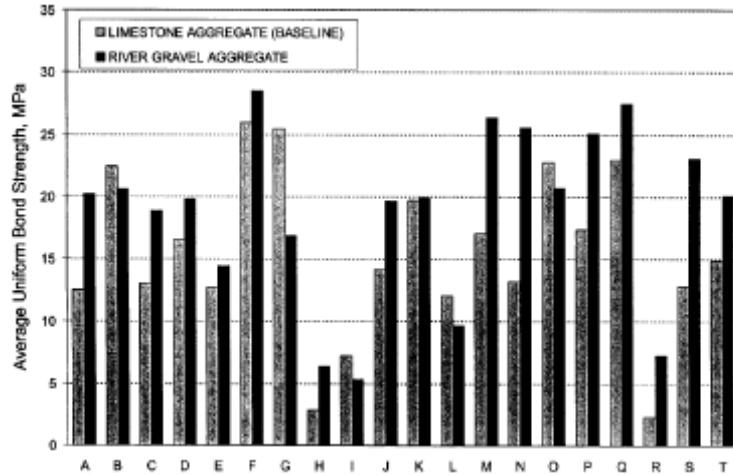


Figure 2.10 Variations de la valeur  $\tau$  dans des ancrages polymériques, selon le type de granulat du substrat [Cook et Konz, 2001].

### 2.5.5 Paramètres liés à l'installation (trou d'ancrage)

Les fiches techniques d'installation du produit « *MPII* »<sup>10,11</sup> doivent être bien respectées, afin de garantir la bonne performance de l'ancrage en service. Quant à l'installation, les facteurs les plus importants sont reliés au trou d'ancrage [Wollmershauser et Mattis, 2008 ; Cook et Konz, 2001 ; Ekenel et Gerber, 2012] :

- **Orientation** Les ancrages adhésifs peuvent être installés de façon verticale, horizontale, inclinée ou en surplomb (*overhead*). Les essais ont démontré que pour les orientations inclinées ou en surplomb, l'installation s'avère difficile car l'adhésif a tendance à s'écouler et il ne remplit donc pas complètement les vides. Par conséquent, l'ancrage ne développe pas toute la contrainte  $\tau$  prévue. Pour ce type d'installation on recommande l'utilisation d'adhésifs thixotropiques (sous forme de gel) à viscosité élevée, et aussi le support temporaire de la barre d'acier pendant le temps de cure de l'adhésif [CALTRANS, 2011 ; Eligehausen et Silva, 2008].
- **Technique de forage** Les trous peuvent être faits avec une perceuse à pointe diamantée ou avec un foret à pointe au carbure. La première méthode produit une surface arrondie lisse à l'intérieur du trou, tandis que la deuxième produit une surface plus rugueuse, ce

<sup>10</sup> *Manufacturer's Printed Installation Instructions*: contiennent notamment les procédures, outils, et séquence d'installation des adhésifs dans l'ancrage, plus des conditions d'entreposage et les limitations particulières d'installation.

<sup>11</sup> HILTI™ HIT RE-500 SD. *Epoxy Adhesive Anchoring System*. Instructions for Use. HILTI Inc, Tulsa OK, États-Unis. 2011. 11 p.

qui permet de développer une meilleure liaison mécanique pour atteindre la contrainte  $\tau$  prévue. Des essais de laboratoire ont montré l'importance d'utiliser des outils qui produisent des surfaces rugueuses, ce qui augmente l'adhérence et les valeurs de la contrainte  $\tau$  [NCHRP (N°639), 2009 ; Randl et Gusella, 2011].

- Nettoyage C'est un facteur clé de la performance des ancrages adhésifs. Il faut nettoyer soigneusement les trous à l'air comprimé et avec des brosses non métalliques. Les débris de poussière ou les résidus des boues empêchent l'adhésif d'adhérer sur toute la surface d'ancrage, ce qui réduit considérablement la contrainte  $\tau$ . Les pertes peuvent atteindre jusqu'au 40% de la valeur normale (Figure 2.11) [Randl et Gusella, 2011].

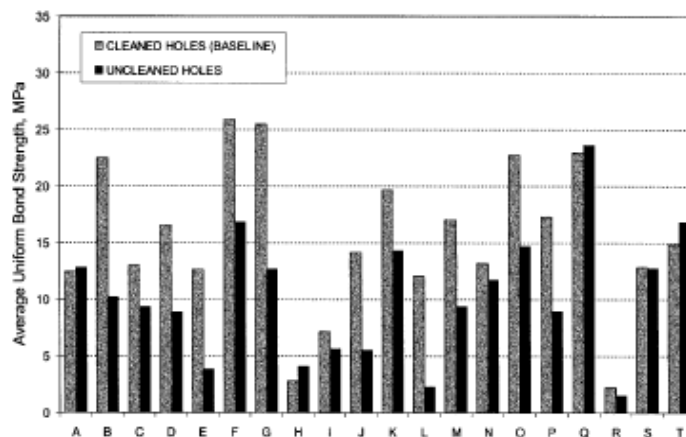


Figure 2.11 Variations de la valeur  $\tau$  dans des ancrages polymériques, selon la condition de nettoyage du trou d'ancrage [Cook et Konz, 2001].

- Humidité La performance des ancrages adhésifs est fortement influencée par le degré d'humidité du trou. Il faut installer les ancrages dans des trous complètement secs. L'humidité des trous empêche l'entrée des adhésifs dans la porosité du béton, réduisant ainsi les liaisons mécaniques qui garantissent la bonne adhérence. En laboratoire (ancrages polymériques) on a obtenu des valeurs de  $\tau$  réduites jusqu'au 25% par rapport à celles des ancrages placés dans de trous secs [Cook et Konz, 2001] (Figure 2.12). De plus, des essais sur des ancrages avec de l'eau stagnante au fond du trou ont donné des performances encore plus faibles, soit des valeurs de  $\tau$  réduites jusqu'au 45% des valeurs équivalentes pour les ancrages dans de trous secs.

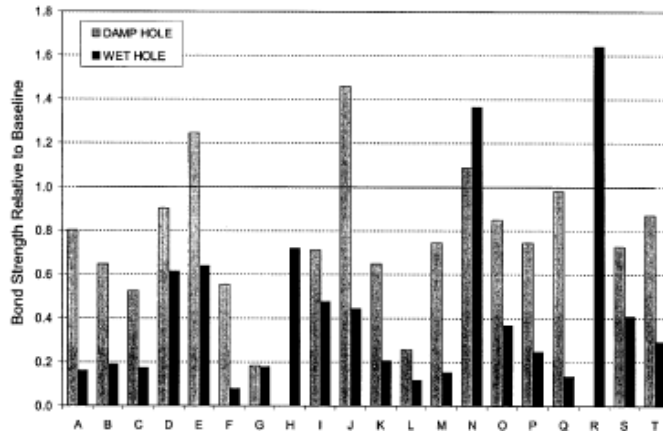


Figure 2.12 Variations de la valeur  $\tau$  dans des ancrages polymériques, selon la condition d'humidité du trou d'ancrage [Cook et Konz, 2001].

### 2.5.6 Conditions en service

L'adhérence des ancrages adhésifs en service est grandement influencée par les conditions de service. Tous les adhésifs doivent être conformes en regard de certains essais de performance qui tiennent compte de ces conditions. Les ancrages peuvent avoir des performances significativement plus faibles dans des environnements particulièrement agressifs, tels que les milieux corrosifs ou en présence des substances acides [Simpson Anchor Systems, 2010].

- Température élevée (Figure 2.13) La contrainte d'adhérence  $\tau$  des adhésifs polymériques diminue lorsque l'adhésif atteint le point de transformation thermique HDT<sup>12</sup> [Pilakoutas *et al.*, 1994]. Des essais en laboratoire ont démontré que sous des températures très élevées (au-delà de 120°C), les adhésifs à base de vinylester ont une valeur de  $\tau$  réduite de 50%, comparativement à 10% pour les adhésifs hybrides [Nemes et Lubloi, 2011].

De plus, les adhésifs polymériques sont combustibles. C'est pour cette raison que plusieurs adhésifs contiennent des fillers inorganiques qui améliorent la faible résistance au feu de ce type d'adhésifs [Pinoteau *et al.*, 2011]. La norme EOTA TR

<sup>12</sup> HDT *Heat deflection temperature*: C'est la T° ou la plage de T° dans laquelle les matériaux polymériques changent d'un état rigide (vitreux) à un état élastomérique (caoutchouteux). La HDT augmente à mesure que la polymérisation des adhésifs polymériques (leur processus de cure) augmente.

20<sup>13</sup> propose des essais de qualification des ancrages en regard de leur résistance au feu [Fuchs et Silva, 2012].

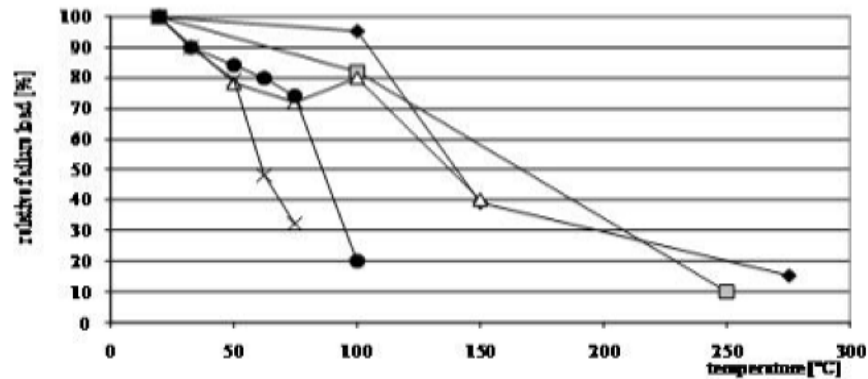


Figure 2.13 Charges relatives de rupture des ancrages adhésifs à l'époxy et polyester en fonction de la température [Nemes et Lubloi, 2011]

- Basse température Les ancrages installés à basse température nécessitent des temps de cure plus longs. Le HDT diminue par rapport à une installation à température ambiante [Alig *et al.*, 2012]. En général, les variations de performance en service ne sont pas aussi remarquables que dans le cas de l'exposition à ces températures élevées.
- Humidité La performance des ancrages installés en présence d'eau pendant la cure de l'adhésif, est plus faible par rapport à l'installation à sec. La présence d'eau dégrade la qualité des adhésifs d'ancrage, en formant une fine pellicule autour du trou d'ancrage, qui détruit l'adhésion entre le substrat et l'adhésif, ou en pénétrant dans l'adhésif et en modifiant la structure chimique de celui-ci [NCHRP (N°639), 2009 ; El Menoufy, 2010].
- Gel-dégel Les essais en laboratoire ont montré que les réductions de performance des ancrages adhésifs soumis aux conditions de gel-dégel ne sont pas uniformes dans tous les cas [El Menoufy, 2010]. Lors des cycles de gel-dégel, la plupart des matériaux éprouvent des expansions et contractions. De plus, les adhésifs, les barres d'acier et les substrats présentent des différences de comportement structural. Par exemple, les adhésifs à base d'époxy montrent moins de variation que ceux à base de méthacrylate [El Menoufy, 2010], mais il faut effectuer des essais spécifiques pour chaque adhésif d'ancrage à utiliser dans des milieux exposés aux cycles de gel-dégel.

<sup>13</sup> EOTA. Technical Report 020 (2004). *Evaluation of Anchorages in Concrete concerning Resistance to Fire*. European Organization for Technical Approvals, Bruxelles, Belgique.

## 2.6 Ancrages adhésifs sous chargement soutenu

Les essais sous chargement soutenu sont conçus pour évaluer la performance d'un système d'ancrage adhésif soumis à des charges de traction à moyen et à long terme. Ils prennent notamment en compte des paramètres d'installation et des conditions de service mentionnées dans les sections 2.5.5 et 2.5.6 de ce rapport. Les systèmes d'ancrages adhésifs destinés à résister à des charges soutenues à court et à long terme doivent passer les essais de la norme ASTM E1512, ainsi que les essais de qualification de la norme ACI 355.4-11 ou des normes équivalentes [ETAG 001 Part V (EOTA), 2008 ; Simpson Anchor Systems, 2010 ; ASTM E1512-01, 2011 ; Davis et Cook, 2011].

Les ancrages polymériques sous chargement statique se comportent comme des structures rigides, tandis que sous chargement soutenu, tous les ancrages présentent divers degrés de fluage : déformation de façon lente et continue. [Simpson Anchor Systems, 2010 ; Thota, 2010]. Des graphiques déplacement – temps en condition de chargement soutenu, montrent trois phases. La première non-linéaire et courte, la deuxième ascendante et à faible pente (la plus longue des trois), et la troisième à pente forte (qui mène à la rupture) (Figure 2.14). La contrainte initiale de l'adhérence  $\tau$  (estimée par calcul ou lors des essais statiques), peut être réduite d'un pourcentage compris entre de 20% et 50% pour tenir compte du comportement des ancrages à long terme [ETAG 001 Part V (EOTA), 2008 ; NCHRP (N°639), 2009 ; ACI Committee 355, 2011]. En effet, certains adhésifs éprouvent une réduction très importante de la performance suite aux chargements soutenus.

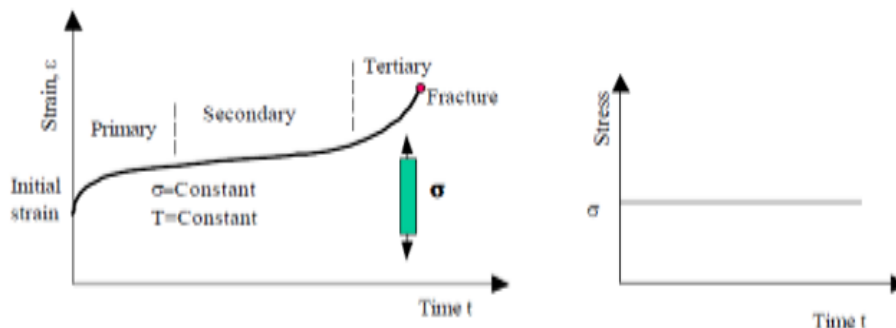


Figure 2.14 Comportement sous chargement soutenu, charge de traction constante [Thota, 2010].



### 2.6.1 ASTM E1512-01 (2007). *Standard Test Methods for Testing Bond Performance of Bonded Anchors*

Les méthodes proposées dans cette norme s'appliquent à des éléments de béton et de maçonnerie. Les essais proposés sont en conditions confinées ou non confinées. Le nombre minimal de spécimens pour chaque type d'essai est de 3. Les spécifications suivantes s'appliquent aux essais statiques, aussi qu'aux essais sous chargement soutenu (section 7.4.8 de la norme) :

- Substrat de béton :  $17 \text{ MPa} < f_c < 24 \text{ MPa}$ . Temps de cure minimum : 28 jours.
- Temps de cure des adhésifs :  $7 \pm 5$  jours.
- Température d'installation des ancrages :  $24^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ . Respecter le *MPII*.
- Tige d'acier filetée : ASTM A193 grade B7.  $d_{\min} = \frac{1}{2}$ " (12M).
- Longueur minimale d'ancrage :  $115 \pm 2,5$  mm
- Essais statiques de traction (selon la norme ASTM E488<sup>14</sup>) afin de déterminer les charges pour les essais de chargement soutenu. On effectue deux types d'essais : à la température ambiante ( $24^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ) et à température élevée ( $43^\circ\text{C}$ ).
- Essais de chargement soutenu : On applique 40% de la charge moyenne statique à la température ambiante. Durée des essais : 1000 heures (42 jours).

Une relation expérimentale déplacement en fonction du temps est obtenue à partir de 20 points minimum, mesurés durant les derniers 20 jours d'essai. On extrapole la relation jusqu'à 600 jours. Le déplacement prévu  $\Delta(t)$  est calculé avec l'équation 2.3, où le temps  $t$  est indiqué en heures, et les constants  $c$  et  $b$  sont déterminés par la méthode de moindres carrés (Figure 2.15) :

$$\Delta(t) [\text{mm}] = c * \ln(t) + b \quad (2.3)$$

### 2.6.2 AASHTO TP 84-10. *Evaluation in Adhesive Anchors in Concrete Under Sustained Loading Conditions*

Cette norme est basée dans la norme ASTM E1512. Voici les différences et les spécifications additionnelles par rapport à cette norme [NCHRP (N°639), 2009].

---

<sup>14</sup> ASTM E488/E488M-10. *Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Elements*. ASTM International, West Conshohocken PA, États-Unis, 2010, 21 p.

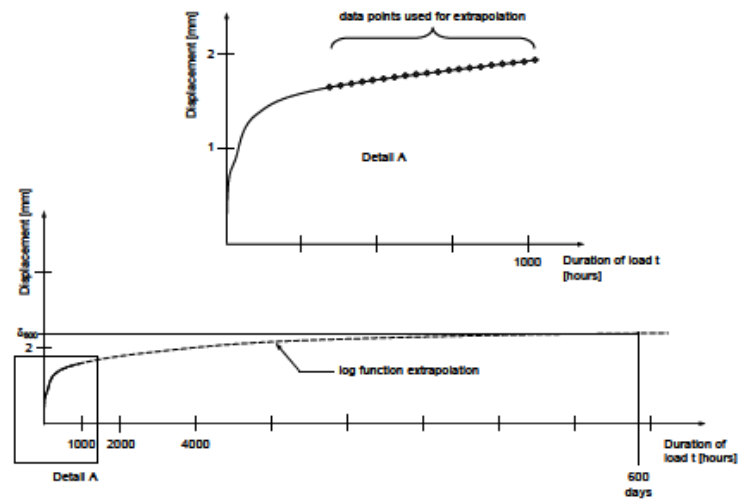


Figure 2.15 Graphique déplacement – temps (d-t) ASTM E1512-01  
[Eligehausen et Silva, 2008]

- Le nombre minimal de spécimens pour chaque type d'essai est de 5.
- Tous les essais sont confinés.
- Le béton du substrat ne contient ni ajouts minéraux ni adjuvants.
- Les essais statiques de traction sont effectués à température élevée ( $43^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ).
- La charge moyenne statique est déterminée selon la réponse de la courbe charge – déplacement<sup>15</sup> [NCHRP (N°639), 2009].
- Pour les essais de chargement soutenu, on applique entre 60% et 80% de la charge moyenne statique.
- La mesure du temps de rupture est estimée par l'amorce du fluage tertiaire dans les graphiques contrainte – temps (méthode de la norme ASTM D2990<sup>16</sup>).
- À partir des graphiques « % charge moyenne statique – log temps de rupture » (*% stress – log time-to-failure*), on extrapole les valeurs à long terme, à l'aide d'une régression linéaire, pour divers intervalles de temps (Figure 2.16) [NCHRP (N°639), 2009 ; Davis et Cook, 2011].

<sup>15</sup> AASHTO TP 84-10, Annexe 2: Lors des essais statiques de traction, on dessine des graphiques charge – déplacement qui peuvent montrer l'un des trois comportements suivants: Contrôlé par la résistance (*Strength-controlled*), Contrôlé par la raideur (*Stiffness-controlled*), Contrôlé par le déplacement (*Displacement-controlled*).

<sup>16</sup> ASTM D2990-01. *Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics*. ASTM International, West Conohocken PA, États-Unis, 2001, 20 p.

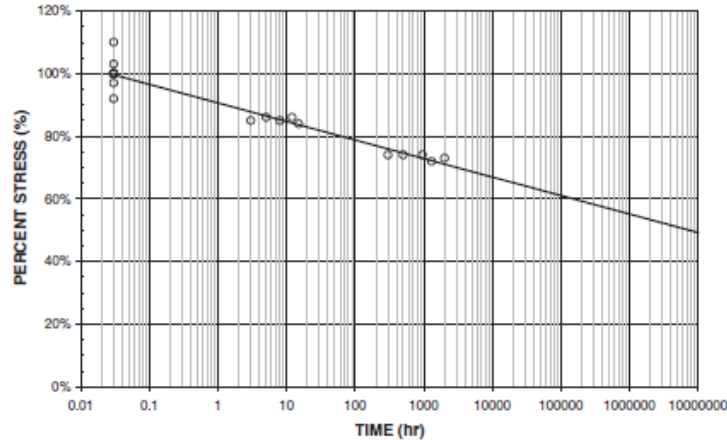


Figure 2.16 Graphique % charge moyenne statique – temps de rupture ( $s-t$ ), AASHTO TP 84-10 [NCHRP (N°639), 2009].

## 2.7 Essais et qualification

Les caractéristiques de performance exigées pour les ancrages adhésifs comportent notamment des essais de traction et cisaillement pour ancrages isolés, espacement critique pour groupes d’ancrages, distance critique de rive pour des ancrages isolés sous traction, et sensibilité aux conditions de température des ancrages en service.

### 2.7.1 ACI 355.4-11: *Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete*

Cette norme est basée sur la norme ICC-ES AC308 [AC308 (ICC ES), 2010] et contient des références à diverses normes ASTM<sup>17</sup> [ACI Committee 355, 2011].

- La norme est valide pour des ancrages où  $4d < h_{ef} < 20d$ , et  $\frac{1}{4}'' (6M) < d < 2'' (50M)$ , et pour un rapport  $d_o < 1,5 d$ . L’épaisseur minimale de l’élément de béton est égal à  $h_{min} = h_{ef} + \Delta h > 2'' (50M)$ , où  $\Delta h > 2 d > 1 \frac{1}{4}'' (30M)$  (Voir Figure 2.6).

<sup>17</sup> ASTM International, West Conohocken PA, États-Unis.

ASTM E1512-01. *Standard Test Methods for Testing Bond Performance of Bonded Anchors*. 5 p.

ASTM E488/E488M-10 *Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Elements*. 21 p.

ASTM C881/C881M-10. *Standard Specification for Epoxy-Resin-Base Bonding Systems for Concrete*. 5 p.

ASTM D1151-00. *Standard Practice for Effect of Moisture and Temperature on Adhesive Bonds*. 3 p.

- Les critères de design suivent les directives de la norme ACI 318, Annexe D [ACI Committee 318, 2011].
- Le Tableau 3.1 de la norme contient tous les essais de qualification pour les ancrages placés dans des éléments de béton non fissurés. Les Tableaux 3.2 et 3.3 concernent les éléments fissurés et non fissurés. La norme explique les procédures à suivre pour l'exécution de tous les essais.
- Les essais de fiabilité comportent ceux de la norme ASTM E1512, avec les modifications établies dans la norme AASHTO TP 84-10. Concernant les essais sous chargement soutenu, la charge à appliquer correspond au 55% de la charge moyenne statique (établie selon la norme ICC-ES AC308).
- Les adhésifs d'ancrage doivent passer une série d'essais pour être validés, notamment des essais de viscosité, de contrainte d'adhérence et masse volumique.
- La valeur de la contrainte caractéristique  $\tau_k$  est calculée avec l'équation 2.4 (équation 11.11 de la norme ICC-ES AC308) :

$$\tau_k \text{ [MPa]} = \alpha * N_{Uk} / \pi * d * h_{ef} \quad (2.4)$$

$N_{Uk}$  est la résistance caractéristique obtenue des essais de traction, pour un substrat de béton de  $f'_c = 17,2\text{MPa}$ . Le facteur  $\alpha$  est 1,0 si les essais sont non confinés, et varie entre 0,70 (béton fissuré) et 0,75 (béton non fissuré) pour les essais confinés.

En plus, des facteurs de réduction  $\alpha$  sont appliqués à  $\tau_k$  et  $N_k$ , qui tiennent compte des résultats des essais de fiabilité en service, des effets du gel-dégel, des températures élevées et basses, de la durabilité des ancrages, des charges cycliques, des charges sismiques de cisaillement et des catégories d'ancrage (sections 11.3.5 et 11.4.8 de la norme ICC-ES AC308).

- L'évaluation de la performance des ancrages sous chargement soutenu est basée sur l'extrapolation du graphique déplacement – temps, contenue dans la norme ICC-ES AC308 (Figure 2.17).

## 2.7.2 ETAG 001, Part 5: *Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. Chapitre 5: Bonded Anchors*

Cette norme contient des références aux normes ETA et EN<sup>18</sup>, en regard des exigences minimales de qualité des barres ou tiges d'acier, du substrat et des adhésifs d'ancrage.

- La longueur minimale d'ancrage est 40 mm et le rapport  $h_{ef} / d$  minimal est de 4. L'épaisseur minimale de l'élément de béton (substrat)  $h_{min}$  est 100 mm.
- La température ambiante des essais est de  $21^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ .
- On considère 2 catégories d'ancrages : ceux installés dans un substrat sec ou humide comportant un trou sec (catégorie 1) et un trou immergé dans l'eau (catégorie 2).
- Le Tableau 5.2 de la norme présente tous les essais de qualification pour les ancrages placés dans des éléments de béton non fissurés. Le Tableau 5.1 de la norme présente les éléments fissurés et non fissurés.
- L'Annexe A de la norme présente les détails des essais à effectuer, l'Annexe B inclut les détails des essais pour des conditions admissibles de service des ancrages (affichés dans les Tableaux 5.5 et 5.6).
- Les adhésifs d'ancrage organiques et inorganiques doivent passer une série d'essais pour être validés, notamment des essais de viscosité, résistance en traction et compression, réactivité chimique, densité, granulométrie et retrait.
- Le temps de cure minimal des adhésifs pour les essais en traction est de 24 heures pour les adhésifs polymériques, et de 14 jours pour les adhésifs cimentaires.
- La valeur de la contrainte caractéristique  $\tau_{Rk}$  est calculée avec l'équation 2.5 (équation 6,17 de la norme) :

$$\tau_{Rk} \text{ [MPa]} = N_{Rk} (C20/25) / \pi * d * h_{ef} \quad (2.5)$$

---

<sup>18</sup> CEN: Eurocode N°2. *Design of Concrete Structures. Part 1. General rules and rules for buildings*. The European Committee for Standardization, Bruxelles, Belgique, 1992.

CEN: Eurocode N°3. *Design of Steel Structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings*. The European Committee for Standardization, Bruxelles, Belgique, 1993.

ENV 206. *Concrete – Performance, Production, Placing and Compliance Criteria*. 1990-1993.

DIN 8035. *Hammer Drills*. 1976-11.

$N_{Rk}$  (C20/25) est la contrainte caractéristique pour un substrat de béton de  $f'_c = 21\text{MPa}$ , obtenue des essais de traction. Cette valeur doit être réduite par un facteur  $\alpha$  de 0,7 (béton fissuré) ou 0,8 (béton non fissuré), et en plus on applique des facteurs  $\alpha$  qui tiennent compte des effets du gel-dégel, températures élevées et basses, durabilité des ancrages, charges cycliques et résultats des essais de fiabilité en service.

- L'évaluation de la performance des ancrages sous chargement soutenu est basée sur l'extrapolation du graphique déplacement – temps : à 50 ans pour les essais à température ambiante et à 10 ans pour ceux à température élevée. Le déplacement à un temps donné  $\Delta(t)$  est calculé avec l'équation 2.6 (équation 11.12.1 de la norme), nommée approche Findley, où  $\Delta_{t=0}$  (mm) est le déplacement mesuré au début des essais de chargement soutenu,  $t$  (heures) est le temps projeté – soit 10 ou 50 ans – et  $a$  et  $b$  sont des constants déterminés expérimentalement par régression (Figure 2.17).

$$\Delta(t) [\text{mm}] = \Delta_{t=0} + a \cdot t^b \quad (2.6)$$

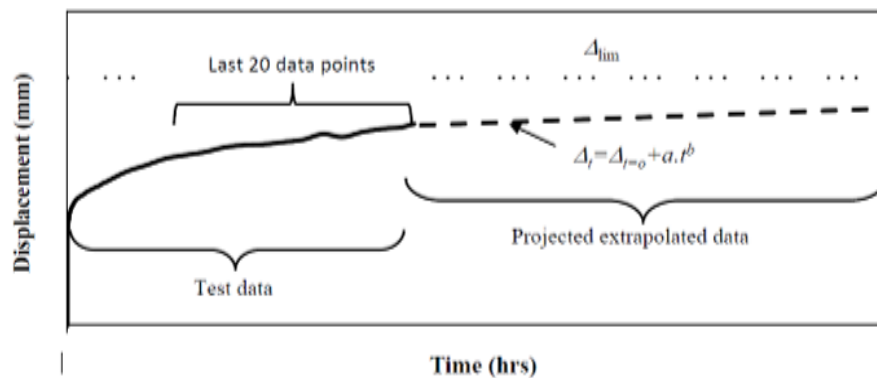


Figure 2.17 Graphique déplacement – temps (d-t) ETAG 001, Part 5 [El Menoufy, 2010]

## 2.8 Méthodes de calcul

Cette section expose brièvement les méthodes de calcul des normes en vigueur, considérant exclusivement le mode de rupture du lien adhésif (*pullout*), aussi que des charges en traction sur des ancrages isolés. Bien entendu, les normes incluent des calculs des forces de cisaillement, des autres modes potentiels de rupture et des considérations à suivre dans le cas des ancrages en groupe. Il faut mentionner que les plus grandes compagnies d'adhésifs d'ancrage aux États-Unis offrent des logiciels de calcul d'ancrages mécaniques et liés, basés sur normes existantes [Simpson Anchor Systems, 2010].

### 2.8.1 ACI 318-11. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Annexe D: Anchoring to Concrete*

Cette norme établit les critères de design des ancrages installés in-situ, des ancrages mécaniques post-installés et des ancrages adhésifs (suivant la norme ICC-ES AS308), selon la méthode *LRFD*<sup>19</sup> [ACI Committee 318, 2011 ; Elgehausen *et al.*, 2012]. Le design des ancrages doit satisfaire la relation :

$$\alpha * \phi N_n > N_U \quad (2.7)$$

Le facteur  $\alpha = 0,55$  tient compte de la réduction de la contrainte  $\tau$  à long terme, le facteur  $\phi$  (0,5 à 0,8) varie selon des critères reliés à l'installation de l'ancrage (sections D.4.4. et D.4.5). La résistance nominale en traction  $N_n$  est calculée avec l'équation  $N_n = \psi_c * N_p$  (section D.5.3), où  $N_p$  est la valeur obtenue des essais effectués conformément à la norme ACI 355.4-11, et le facteur  $\psi_c$  varie entre 1,0 (béton fissuré en service) et 1,4 (béton non fissuré en service).

### 2.8.2 ICC-ES AC308. *Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements*

Cette norme contient des additions à l'Annexe D de l'ACI 318 pour le calcul des ancrages adhésifs (section 3.3) [Simpson Anchor Systems, 2010 ; AC308 (ISS ES), 2010]. Le facteur  $\alpha$  de la norme ACI 318 est égal à 0,75, appliqué juste dans le cas des ancrages installés en surplomb. La résistance nominale en traction  $N_n$  est calculée avec l'équation 2.8 (section 3.3.1) :

$$N_n [N] = N_{n0} * (A_N / A_{N0}) * \psi_p * \psi_{ed} \quad (2.8)$$

La valeur initiale de la résistance nominale  $N_{n0}$  ne doit pas excéder  $N_{n0} = \tau_k * \pi * d * h_{ef}$ , où la valeur de  $\tau_k$  [MPa] =  $(k_1 / \pi * d) * \sqrt{h_{ef} * f'_c}$  :  $k_1$  varie de 17 (béton fissuré) à 24 (béton non fissuré). Le rapport  $A_N / A_{N0}$  tient compte des effets de la distance de l'ancrage aux rives du substrat et de la présence d'autres ancrages à proximité de l'ancrage à calculer. Le facteur  $\psi_p$  est appliqué lors de l'analyse si l'on considère que la section du substrat dans lequel sera

---

<sup>19</sup> *Load and Resistance Factor Design* : design des éléments considérant les charges limites ultimes, en appliquant des facteurs de réduction.

installé l'ancrage n'aura pas de fissuration en conditions de service ;  $\psi_{ed}$  est relié aux effets de rive lors de l'application des charges de traction.

### 2.8.3 ETAG 001. *Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. Annex C: Designed Methods for Anchorages*

Cette norme considère tous les types d'ancrages et 4 modes de rupture distincts (en incluant la rupture de la barre d'acier) [ETAG 001 Annex C (EOTA), 2010]. La résistance de design est calculée avec l'équation 2.9 (section 3.2) :

$$N_{Sd} = N_{Rk} / \gamma_M \quad (2.9)$$

$N_{Rk}$  est la résistance nominale (caractéristique) de l'ancrage et  $\gamma_M = \gamma_C + \gamma_2$  est le facteur partiel de sécurité, où  $\gamma_C = 1,5$  est associé au substrat de béton, et  $\gamma_2$  (variant entre 1,0 et 1,4) tient compte de la qualité de l'installation de l'ancrage.

La résistance caractéristique d'un ancrage en traction  $N_{Rk}$  est calculée avec l'équation 2.10 (section 5.2.2.3) :

$$N_{Rk} [N] = N_{Rk}^0 * (A_N / A_N^0) * \psi_s * \psi_{ec} * \psi_{re} \quad (2.10)$$

La valeur initiale de la résistance caractéristique  $N_{Rk}^0$  est égal à :  $N_{Rk}^0 [N] = k_1 * h_{ef} [mm]^{1,5} * \sqrt{f_c}$ , où la valeur de  $k_1$  varie de 7,2 (béton fissuré) à 10,1 (béton non fissuré). Le rapport  $A_N / A_N^0$  tient compte des effets de la distance de l'ancrage aux rives du substrat et de la présence d'autres ancrages à proximité de l'ancrage à calculer. Le facteur  $\psi_s$  est relié aux modifications dans la distribution de contraintes, dues à l'existence des rives dans le substrat ;  $\psi_{ec}$  tient compte de l'effet de groupe lors de l'application de diverses charges de traction sur l'ancrage individuel dans un groupe d'ancrages ;  $\psi_{re}$  concerne l'effet des barres d'armature du substrat.

## 2.9 Sommaire

- Les ancrages adhésifs sont conçus principalement pour les applications où les forces statiques de traction sont prédominantes. Dans les cas où les forces dynamiques (i.e. sismiques) sont considérées, dans les milieux vulnérables au feu ou dans les éléments



sous l'eau, les adhésifs d'ancrage doivent être vérifiés expérimentalement avant d'être mis en place.

- Des méthodes de design d'ancrages adhésifs ont été développés selon les modes de rupture vérifiés in-situ. Pour ce projet de recherche on appliquera le modèle d'adhérence uniforme, relié à la rupture du lien adhésif. Il s'agit du modèle le plus étudié pour le cas des ancrages adhésifs à base polymérique. Dans ce projet, on effectuera des essais de validation appliqués aux cas des ancrages adhésifs à base cimentaire.
- La contrainte d'adhérence  $\tau$ , est la valeur qui détermine la performance structurale d'un ancrage adhésif. Elle est estimée à partir de la valeur de la résistance ultime d'adhérence en traction  $N_U$ , obtenue des essais statiques de traction.
- Parmi les facteurs d'influence sur la performance des ancrages adhésifs, ceux qui concernent les conditions en service (environnement), et ceux reliés à l'installation (caractéristiques et nettoyage du trou d'ancrage) ont une incidence décisive. La performance d'un ancrage adhésif est nettement réduite si l'ancrage est exposé à des milieux extrêmes pour lesquels celui-ci n'a pas été calculé, ou pendant l'installation si l'on n'a pas suivi rigoureusement les spécifications et procédures d'installation des fabricants des adhésifs.
- Les essais sous chargement soutenu évaluent la performance des ancrages adhésifs aux charges de traction à moyen et à long terme, en considérant notamment des facteurs liés aux conditions de service. Ces essais sont encadrés par les normes ASTM E1512 et AASHTO TP 84-10.
- Les essais de qualification d'ancrages adhésifs des normes ACI 355.4-11 (ICC-ES AC308) et ETAG001 (*Part 5*) permettent une évaluation très complète de l'influence de nombreux paramètres sur la performance des ancrages adhésifs. Tous les codes de design d'ancrages appliquent des facteurs de réduction sur les charges de traction admissibles, notamment en ce qui concerne les paramètres géométriques, du substrat de béton, d'installation et de service.

### 3. BUT DE LA RECHERCHE – PROGRAMME D’ESSAIS

Les objectifs de la recherche sont décrits dans le premier chapitre du rapport. Le but de la recherche est présenté dans le premier de ces objectifs :

- Etudier, caractériser en laboratoire et évaluer la performance des cartouches d’ancrages cimentaires AAC et ARC de la compagnie AMBEX sous chargement soutenu pour différents niveaux de charge et conditions de température en service.

La Figure 3.1 montre le cadre de référence qui permettra d’accomplir ce but, plus les objectifs détaillés exposés au Chapitre 1.

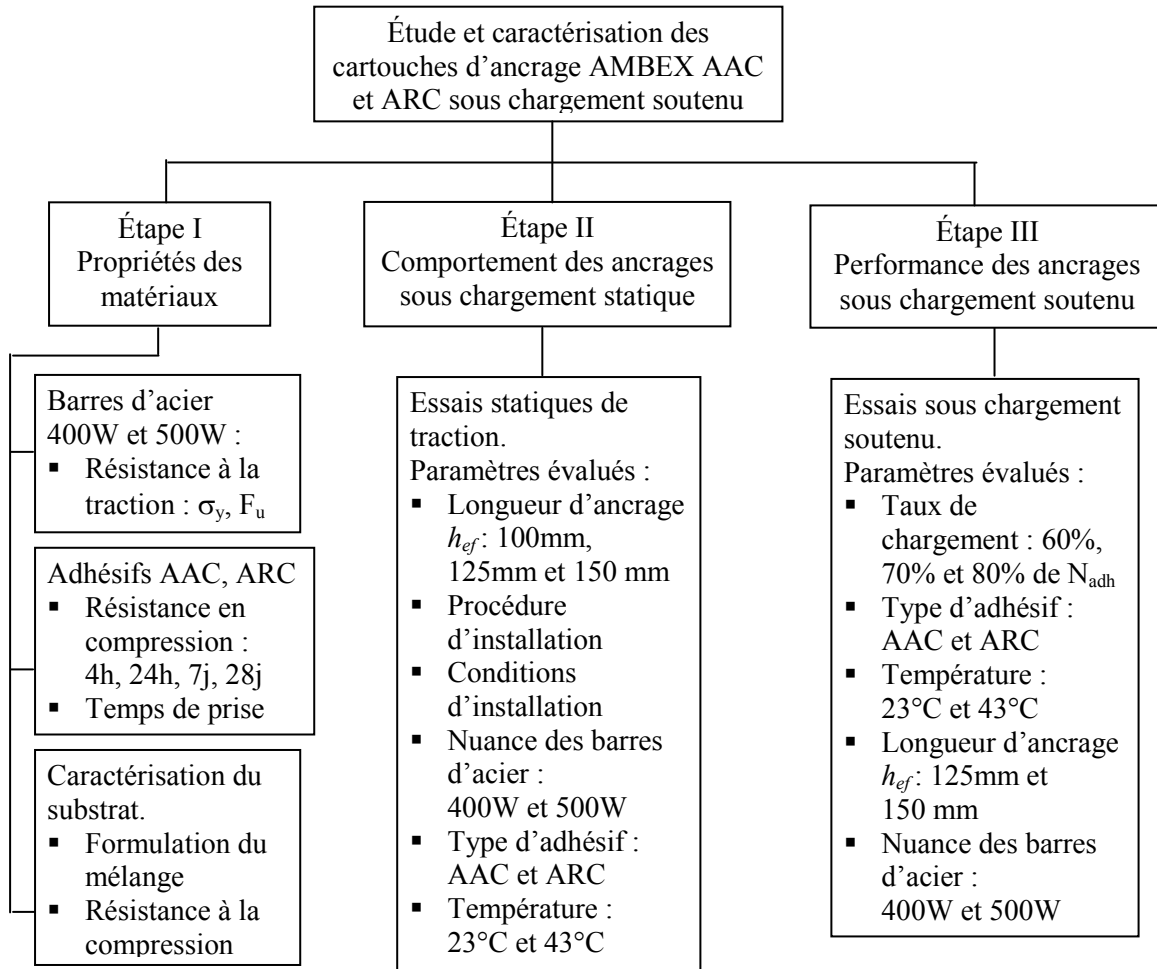


Figure 3.1 Cadre de référence du projet de recherche.

Le programme d'essais comporte deux parties :

- La compagnie AMBEX a effectué dans son laboratoire de R&D les essais de caractérisation des substrats de béton, du même que la préparation de ces substrats et l'installation de tous les ancrages testés pendant l'exécution du projet.
- Le département de génie civil (groupe béton) de l'Université de Sherbrooke a effectué des essais spécifiques sur les cartouches d'ancrage et les barres d'acier, plus les essais de traction et de performance en service des ancrages cimentaires, organisés selon 3 étapes (Tableaux 3.1 à 3.3).

Les essais exécutés par la compagnie AMBEX comportent notamment :

- La caractérisation des substrats de béton : formulation de mélange, granulométries, type de ciment, masse volumique, résistance en compression.
- Le comportement des ancrages sous traction statique, aux conditions d'installation diverses (voir résultats dans la section 5.6).

### 3.1 Etape I. Propriétés des matériaux

Les essais de traction directe sur les barres d'acier servent à déterminer les valeurs in-situ de la limite d'élasticité  $F_y$  et de la charge ultime  $F_U$  (norme ASTM A370-12a<sup>20</sup>), pour deux résistances d'acier. Dans chaque série de 5 barres, la valeur moyenne de  $F_y$  sert à établir l'instant où le comportement des ancrages sous traction est contrôlé par la résistance des barres, lors de la plastification de celles-ci.

Les essais de compression sur les deux adhésifs cimentaires complètent les essais de caractérisation effectués par l'Université. Dans des séries de 3 échantillons chacune (norme ASTM C109/109M-12<sup>21</sup>) on a déterminé la valeur moyenne de  $f'_C$  à 4 heures, 24 heures, 7

---

ASTM International, West Conshohocken PA, États-Unis.

<sup>20</sup> ASTM A370-12a. *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, 48 p.

<sup>21</sup> ASTM C109/C109M-12. *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, 10 p.

jours et 28 jours, ainsi que les temps de prise initiale et finale, en séries de 2 spécimens par série (norme ASTM C191-04a<sup>22</sup>).

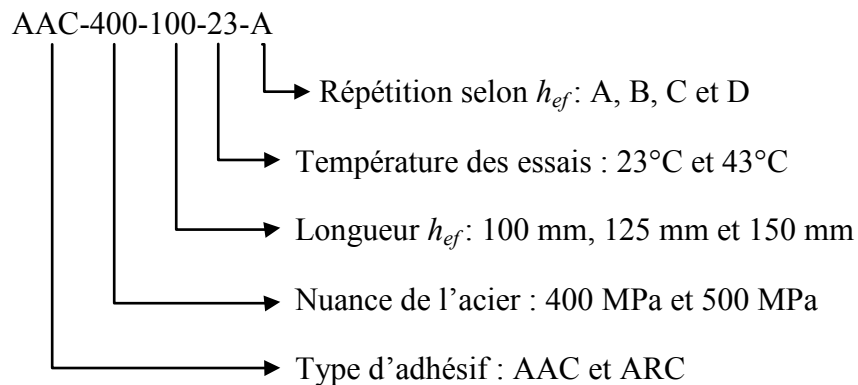
Tableau 3.1 Programme d'essais du projet de recherche – UdeS – Étape I.

Étape	Essais spécifiques UdeS	Barres et adhésifs	
I. Propriétés des matériaux. Barres d'acier et adhésifs	Traction barres d'acier	5 barres 400 W	5 barres 500 W
	Résistance en compression des adhésifs : 4 h, 24h, 7j, 28j	12 cubes AAC (4 séries de 3 cubes chacune)	12 cubes ARC (4 séries de 3 cubes chacune)

### 3.2 Etape II : Comportement des ancrages sous chargement statique

Les essais statiques de traction servent à établir les pourcentages de charge statique à appliquer dans les essais sous chargement soutenu. On a testé 5 ancrages par série (Tableau 3.2), suivant la norme ASTM E488/E488M-10, en plusieurs séries à différentes longueurs d'ancrage, avec des périodes de cure de 4 et 24 heures (adhésif ARC seulement) et 7 jours et 28 jours, afin de trouver les valeurs moyennes des charges ultimes ( $N_U$ ) et à la perte d'adhérence ( $N_{adh}$ ). Avec ces données, on a calculé la contrainte moyenne d'adhérence  $\tau$  des deux adhésifs cimentaires testés (norme ACI 355.4-11). De plus, on a mesuré les déplacements des ancrages par rapport aux substrats, dans le but d'analyser le comportement des adhésifs, suite à l'application des charges incrémentales de traction.

La nomenclature des séries (Tableaux 3.2 et 3.3, Chapitres 4, 5 et 6, Annexes) correspond aux critères suivants :



<sup>22</sup> ASTM C191-04a. *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. 10 p.

### 3.3 Etape III : Performance des ancrages sous chargement soutenu

Pour chaque série de 3 à 5 ancrages, on a effectué des essais de chargement soutenu à la température ambiante (23°C), d'une durée de 1000 heures pour chaque série, selon les normes ASTM E1512-01 et ICC-ES AC308, en mesurant les variations de charge et de déplacement, afin d'évaluer le comportement des ancrages sous une charge constante à long terme.

Tableau 3.2 Programme d'essais du projet de recherche – UdeS – Étape II.

Étape	Essais spécifiques UdeS	Séries	
		AAC	ARC
II. Comportement des ancrages sous chargement statique	Traction 4 heures – 23°C	-	ARC-500-125-23-A ARC-500-150-23-A
	Traction 24 heures – 23°C	-	ARC-500-125-23-A ARC-500-150-23-A *ARC-500-150-23-B
	Traction 7 jours – 23°C	AAC-400-100-23-A AAC-400-125-23-A *AAC-400-125-23-B AAC-500-125-23-C AAC-500-150-23-B AAC-500-150-23-C AAC-500-150-23-D	ARC-500-125-23-A ARC-500-150-23-A ARC-500-150-23-B ARC-500-150-23-C
	Traction 14 jours – 23°C	-	ARC-500-150-23-B
	Traction 28 jours – 23°C	AAC-400-100-23-A AAC-400-125-23-A AAC-400-125-23-B AAC-500-125-23-C **AAC-400-150-23-A AAC-500-150-23-B AAC-500-150-23-C	ARC-500-125-23-A ARC-500-150-23-A
	Traction 28 jours – 43°C	AAC-500-150-43-D	ARC-500-150-43-C

\*Série à 4 spécimens.      \*\*Série à 8 spécimens.

On a considéré trois niveaux de charge : 60%, 70% et 80% de la charge  $N_{adh}$  (norme AASHTO TP 84-10), afin de réaliser des prédictions de la performance des deux adhésifs cimentaires à long terme. On a conduit 3 séries d'essais avec l'adhésif AAC et une série avec l'adhésif ARC.

Lors de la période de 1000 heures des essais de chargement soutenu, les ancrages testés ont été soumis aux essais statiques de traction (nommés essais *post-creep*), suivant la même procédure de l'étape II, afin de trouver la résistance résiduelle des ancrages.

Suivant la même procédure des essais à 23°C et les normes correspondantes, on a effectué des essais à température élevée (43°C) en 2 séries de 5 ancrages chacune, pour l'adhésif AAC et l'adhésif ARC, en considérant juste un niveau de chargement : 55%  $N_{adh}$ . On a mis les ancrages dans une chambre de conditionnement, permettant la tenue d'une température contrôlée pendant la durée des essais (1000 heures). Le temps des essais écoulé, on a fait des essais *post-creep* sur les ancrages testés.

Tableau 3.3 Programme d'essais du projet de recherche – UdeS – Étape III.

Étape	Essais spécifiques UdeS	Séries - Nombre d'ancrages			
		AAC	#	ARC	#
III. Performance des ancrages sous chargement soutenu	Charge : 80% $N_{adh}$ - 23°C	AAC-400-150-23-A	3	ARC-500-150-23-B	3
		AAC-400-125-23-B	4		
		AAC-500-150-23-C	5		
	Charge : 70% $N_{adh}$ - 23°C	AAC-400-150-23-A	3	ARC-500-150-23-B	3
		AAC-400-125-23-B	5		
		AAC-500-150-23-C	4		
	Charge : 60% $N_{adh}$ - 23°C	AAC-400-150-23-A	3	ARC-500-150-23-B	3
	Charge : 55% $N_{adh}$ - 43°C	AAC-500-150-43-D	5	ARC-500-150-43-C	4

$N_{adh}$  est la moyenne des charges à la perte d'adhérence de l'adhésif d'ancrage.

## 4. MATÉRIAUX ET PROCÉDURES

### 4.1 Eléments d'ancrage

#### 4.1.1. Blocs de béton

Les blocs pour les essais de traction et de chargement soutenu ont été préparés par les techniciens de la compagnie AMBEX à Laval et transportés au laboratoire de béton de l'UdeS, après une cure minimale de 28 jours. Les blocs ont 1500 mm de longueur, 450 mm de largeur et 500 mm de profondeur. Les caractéristiques du ciment, sable et granulats utilisés sont détaillées au Tableau 4.1. La formulation du mélange et les propriétés du béton sont indiquées au Tableau 4.2 La résistance moyenne ( $f'_c$ ) déterminée par des cylindres est de 20 MPa à 28 jours.

Tableau 4.1 Composants des substrats de béton

<b>Matériaux</b>	<b>Nom (Type)</b>
Ciment	10-GU
Sable	5-80
Granulats	14-5 mm
Agent entraîneur d'air (AEA)	Micro Air
Superplastifiant (SP)	Glenium 7500

Tableau 4.2 Formulation typique des substrats de béton  
Température : 23°C ± 2 °C

<b>Matériaux</b>	<b>Dosage</b>
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	285
Sable (kg/m <sup>3</sup> )	918
Granulats (kg/m <sup>3</sup> )	915
Eau (l/m <sup>3</sup> )	171
AEA (ml/m <sup>3</sup> )	180
SP (ml/m <sup>3</sup> )	750
<b>Propriétés</b>	<b>Valeurs</b>
Rapport E/C	0,60
Air entraîné (%)	5 – 8
Affaissement (mm)	95 – 110
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2250

#### 4.1.2. Barres d'ancrage

Les barres d'acier fournies par la compagnie AMBEX sont conformes à la spécification ASTM A615 nuance 60, faiblement allié (W), et possèdent une limite d'élasticité nominale de

400 MPa (Figure 4.1) et 500 MPa. Toutes les barres ont un diamètre  $d = 15\text{M}$  (5/8'') et une longueur de 70 à 75 cm. Les longueurs d'ancrage  $h_{ef}$  sont comprises entre 100 mm et 150 mm.



Figure 4.1 Barres d'acier 400 W – 15M

#### 4.1.3. Adhésifs cimentaires

Les deux adhésifs étudiés sont produits par la compagnie AMBEX (Figure 4.2) :

- Cartouche AAC<sup>®</sup> : C'est un coulis de ciment à retrait compensé, pré-mélangé à sec et enrobé dans une gaine perméable à l'eau. Le matériau cimentaire contient un liant à base d'aluminate de calcium, mélangé avec du sable et des adjuvants [AMBEX, 2012].
- Cartouche ARC<sup>®</sup> : C'est un coulis de ciment à retrait compensé, pré-mélangé à sec et enrobé dans une gaine perméable à l'eau. Le matériau cimentaire est un mélange de ciments à prise rapide, de sable très fin et d'adjuvants [AMBEX, 2012].



Figure 4.2 Cartouches AMBEX AAC<sup>®</sup> 19 mm (gauche) et ARC<sup>®</sup> 19 mm (droite).



## 4.2 Installation des ancrages

### 4.2.1 Géométrie – espacement des ancrages

Deux configurations des ancrages ont été utilisées. Les espacements indiqués sur la Figure 4.3 satisfont les distances minimales de rive et les distances entre ancrages, afin de négliger des effets de groupe sur chaque ancrage individuel (norme ICC-ES AC308) :

- Bloc à 10 barres : essais statiques de traction ( $h_{ef} = 100$  mm, 125 mm et 150 mm).
- Bloc à 6 barres : essais de traction et de chargement soutenu ( $h_{ef} = 125$  mm et 150 mm).

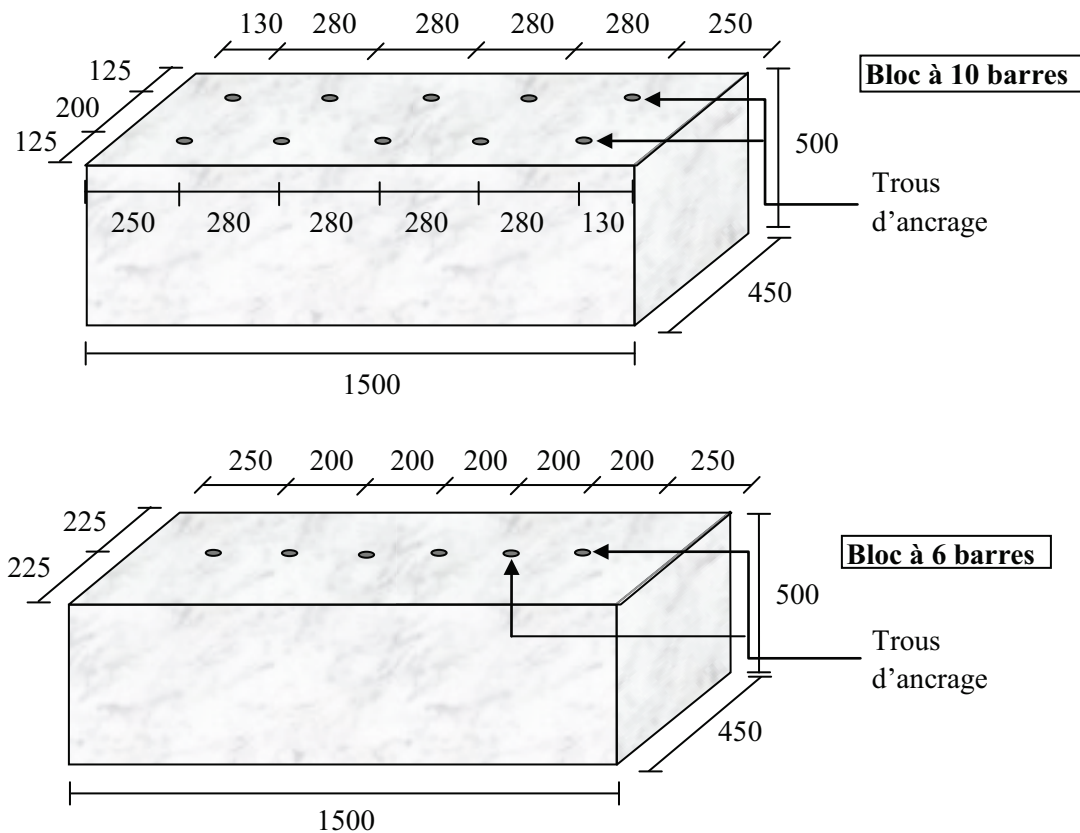


Figure 4.3 Configuration des ancrages dans les substrats de béton. Distances en mm.

### 4.2.2 Procédure d'installation

La procédure d'installation des ancrages a été exécutée par un technicien de la compagnie AMBEX, suivant le *MPII (Manufacturer's Printed Installation Instructions)*<sup>23</sup>.

<sup>23</sup> Voir Note 10 au Chapitre 2.

- Préparation des trous : Ils sont percés à l'aide d'un foret rotatif avec percussion et à pointe au carbure. Le diamètre des trous est  $d_o = 22\text{M}$  (7/8"). Durant le perçage, on s'est servi d'un trépied pour garantir la verticalité des trous tout le long de la longueur d'ancrage établie au préalable. Ensuite, les trous sont nettoyés à l'aide d'un jet d'air comprimé, pour éliminer les débris et les poussières. Par la suite, les trous sont remplis d'eau, pour produire une surface sèche et saturée (SSS) qui permet une bonne adhérence des cartouches d'ancrage. Les trous sont laissés en repos pendant 5 minutes, pour ensuite retirer l'eau résiduelle à l'aide d'un jet d'air comprimé.
- Installation des cartouches cimentaires : Celles-ci ont été immergées dans un seau d'eau propre, pendant 1:30 minutes. Ensuite, elles sont placées dans les trous, sans enlever la gaine protectrice. Étant donné que chaque cartouche a une longueur de 300 mm, la longueur excédentaire est déchirée à la main et jetée.
- Insertion des barres : Elles sont enfoncées les barres dans chaque trou à l'aide d'une masse, sans les tourner, jusqu'aux longueurs  $h_{ef}$  choisies.

La Figure 4.4 illustre les principales étapes de l'installation des ancrages. Les temps de cure minimaux ont été de 7 jours et 28 jours à la température ambiante (plus 4 heures et 24 heures pour l'adhésif ARC). Le nombre total d'ancrages installés est indiqué au Tableau 4.3. Les dates d'installation et d'essai sont indiquées au Tableau 4.4.



Figure 4.4 Procédure d'installation des ancrages

Tableau 4.3 Sommaire des ancrages installés.

Séries	Nombre d'ancrages	Substrat	Blocs
AAC-400-150-23-A	24	Bloc à 6 barres	4
AAC-400-125-23-A	10	Bloc à 10 barres	1
AAC-400-100-23-A	10	Bloc à 10 barres	1
AAC-400-125-23-B	24	Bloc à 6 barres	4
AAC-500-150-23-B	10	Bloc à 10 barres	1
AAC-500-125-23-C	10	Bloc à 10 barres	1
AAC-500-150-23-C	24	Bloc à 6 barres	4
AAC-500-150-23-D	6	Bloc à 6 barres	1
AAC-500-150-43-D	10	Bloc à 10 barres	1
ARC-500-150-23-A	20	Bloc à 10 barres	2
ARC-500-125-23-A	20	Bloc à 10 barres	2
ARC-500-150-23-B	24	Bloc à 6 barres	4
ARC-500-150-23-C	6	Bloc à 6 barres	1
ARC-500-150-43-C	10	Bloc à 10 barres	1

Tableau 4.4 Dates d'installation et d'essai des ancrages.

Séries AAC	Installation	Traction 7 jours	Traction 28 jours	Chargement soutenu
AAC-400-150-23-A	10-07-2012	-	08-08-2012	13-09-2012
AAC-400-125-23-A	30-08-2012	06-09-2012	27-09-2012	-
AAC-400-100-23-A	30-08-2012	06-09-2012	27-09-2012	-
AAC-400-125-23-B	20-09-2012	27-09-2012	18-10-2012	8-11-2012
AAC-500-150-23-B	04-10-2012	11-10-2012	01-11-2012	-
AAC-500-125-23-C	04-10-2012	11-10-2012	01-11-2012	-
AAC-500-150-23-C	15-11-2012	22-11-2012	13-12-2012	21-12-2012
AAC-500-150-23-D	28-02-2013	07-03-2013	-	-
AAC-500-150-43-D	28-02-2013	-	28-03-2013	05-04-2013
Séries ARC	Installation	Traction 4 h et 24 h	Traction 7 j et 28 j	Chargement soutenu
ARC-500-150-23-A	25-10-2012	26-10-2012	01-11-2012	-
		26-10-2012	22-11-2012	-
ARC-500-125-23-A	22-11-2012	22-11-2012	29-11-2012	-
		23-11-2012	20-12-2012	-
ARC-500-150-23-B	29-01-2013	-	05-02-2013	12-02-2013
		30-01-2013	12-02-2013*	
ARC-500-150-23-C	28-02-2013	-	07-03-2013	05-04-2013
ARC-500-150-43-C	28-02-2013	-	28-03-2013	

\*Essais à 14 jours.

## 4.3 Appareils et instrumentation

### 4.3.1 Essais sur les barres et les adhésifs

- Résistance à la compression des adhésifs cimentaires (ASTM C109/109M-12): Les cartouches sont immergées dans un contenant d'eau propre pendant 2 minutes. Ensuite, les gaines protectrices sont enlevées pour préparer les cubes de coulis cimentaire dans une moule normalisée (50 mm x 50 mm x 50 mm).

Environ 3 cartouches sont utilisées pour produire chaque cube (Figure 4.5). Les cubes sont conservés en chambre humide pendant 4 heures et 24 heures, 7 jours et 28 jours. Les essais de compression sont réalisés à l'aide d'une presse RIEHLE, dont la charge maximale a été ajustée à 133,5 kN (30000 lb). Le taux d'application de la charge a été fixé à 11,1 kN (2500 lb) à tous les 10 secondes (Figure 4.6).

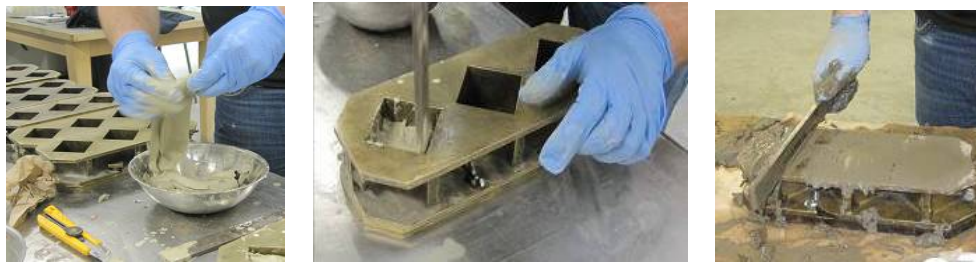


Figure 4.5 Préparation des spécimens pour les essais sur cubes.



Presse RIEHLE



Rupture d'un spécimen

Figure 4.6 Essais de compression sur des cubes.

- Temps de prise – adhésifs cimentaires (ASTM C191-04a): On a immergé les cartouches dans un contenant d'eau propre pendant 2 minutes. Ensuite, on a enlevé les gaines protectrices et on a placé les coulis cimentaires dans un moule normalisé, en emmenant le tout dans une chambre à 23°C et à 50% d'humidité relative. Le temps de prise initial et final a été mesuré à l'aide de l'appareil Vicat manuel pour chaque échantillon (Figure 4.7) et on a trouvé la valeur moyenne des temps de prise.

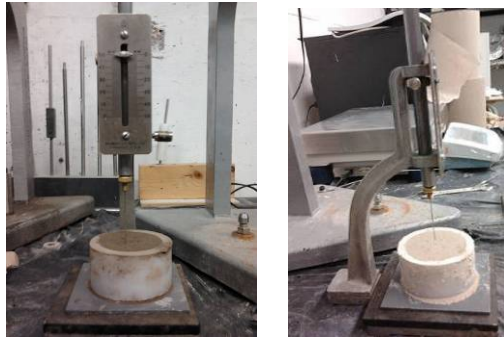


Figure 4.7 Essais de temps de prise sur les adhésifs et appareil Vicat

- Traction sur les barres d'acier (ASTM A370-12a) : Les essais ont été effectués à l'aide d'une machine MTS810, en utilisant un taux de déplacement de 1,5 mm / min (les premières 3 minutes de chargement), et de 12 mm / min (après 3 minutes), jusqu'à la rupture des barres (Figure 4.8). Les elongations et les charges appliquées sont enregistrées afin de produire les graphiques charge – déplacement.

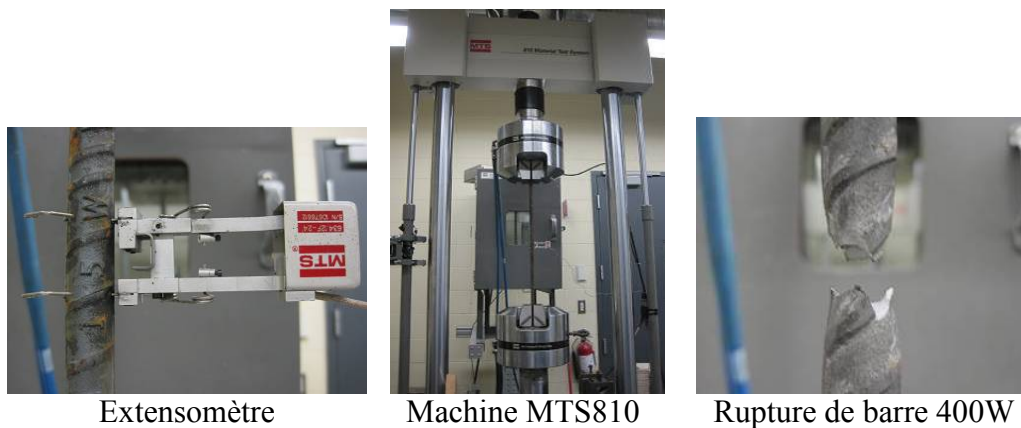


Figure 4.8 Essais de traction directe sur les barres d'ancrage

#### 4.3.2 Essais statiques d'arrachement des ancrages

Pour chaque longueur d'ancrage et nuance d'acier, on a effectué 5 essais (ASTM E488/E488M-10), en utilisant une pompe hydraulique portable ENERPAC (modèle ZE3440LB-HL) de 888 MPa (200 kips) de capacité. La pompe est connectée à un vérin hydraulique ENERPAC RCH202 d'une capacité maximale de 20 tonnes.

Le système est équipé d'une cellule de charge *Tovey Engineering* 2134, d'une capacité maximale de 888 MPa (200 kips) et d'un dispositif de mesure de déplacement, comportant

deux capteurs résistifs BEI-Duncan 9600. La cellule et le capteur de déplacement sont branchés au système d'acquisition des données (section 4.3.4), pour afficher à tous les secondes les charges appliquées et les déplacements correspondants. Tous les essais d'arrachement sont effectués selon le mode confiné de la norme ASTM E488/E488M-10.

Pour assurer un bon contact entre la pointe des capteurs de déplacement et la surface du béton, on a placé une lame plastique de 0,5 mm d'épaisseur. La Figure 4.9 illustre le montage complet et les composants de l'essai d'arrachement d'un ancrage.

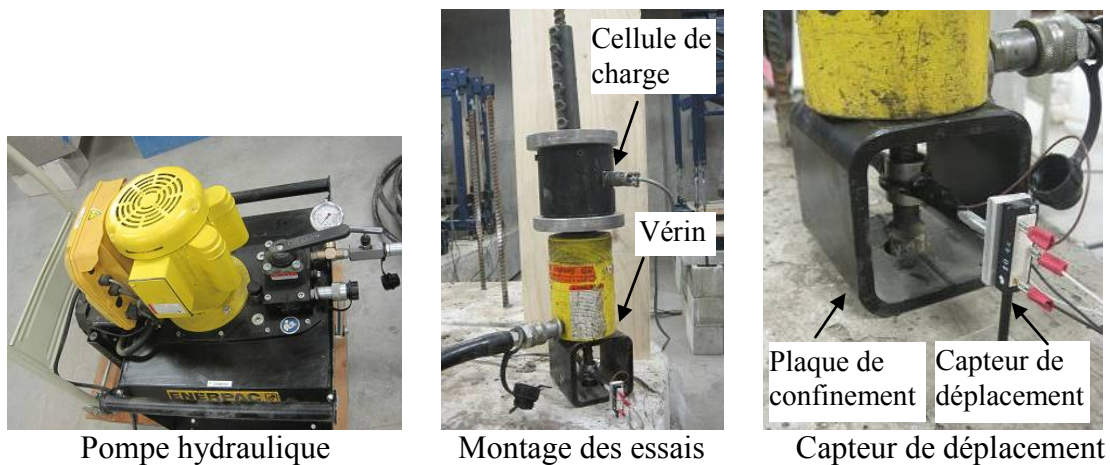


Figure 4.9 Détails du montage des essais statiques de traction

Mise en charge : Le taux d'application de la charge a été fixé à 1kN par seconde, ce qui fixe la durée totale d'un essai à 3 à 5 minutes pour les ancrages à  $h_{ef} = 150$  mm, et à 1 à 3 minutes pour  $h_{ef} = 125$  mm et 100 mm. La charge à la perte d'adhérence  $N_{adh}$  et la charge  $N_U$  ont été notées pour chaque ancrage à partir des graphiques charge – déplacement obtenus. À la fin des essais, le type de rupture a été noté et des photos ont été prises (Annexe D, Fig. D.1 à D-5). Dans certains cas, les essais ont été poursuivis jusqu'à l'arrachement complet de l'ancrage.

Essais à 43°C : On a utilisé le montage décrit, suivant la même mise en charge, en plaçant le montage et les blocs de béton dans une chambre de conditionnement à température contrôlée.

### 4.3.3 Essais de traction sous chargement soutenu

Le montage de l'essai de traction sous chargement soutenu est constitué d'un bâti construit avec des profilés HSS en acier (Figure 4.10). Le principe de fonctionnement est un système à

double levier qui amplifie la charge appliquée par un facteur d'environ 70. Les charges appliquées sont des blocs de béton d'une masse d'environ 12,7 kg chacun. Une longue tige filetée d'acier relie l'extrémité du double levier à l'extrémité de l'ancrage. Cette tige est aussi utilisée comme capteur de charge pour mesurer la force de traction appliquée sur l'ancrage. Quatre jauges de déformation formant un pont complet, sont collées sur la tige pour mesurer la déformation de celle-ci (Figure 4.11).

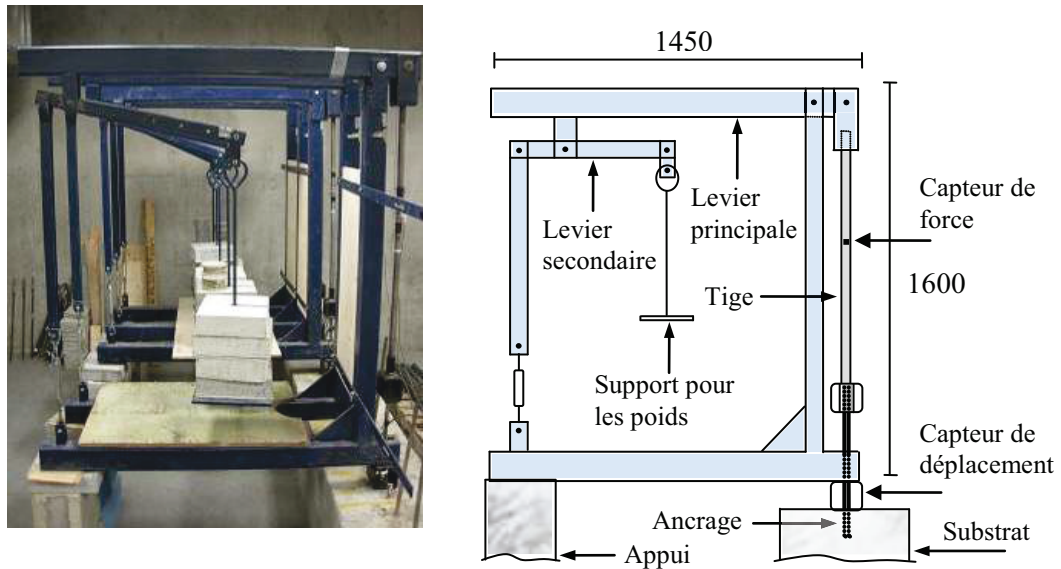


Figure 4.10 Montage des essais sous chargement soutenu. Distances en mm.

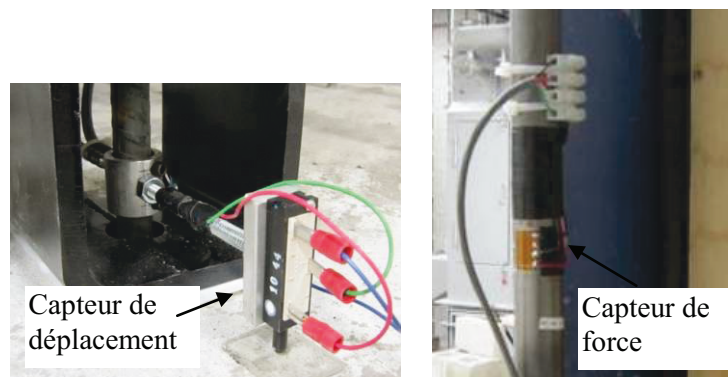


Figure 4.11 Détail des capteurs de force et de déplacement.

La base de l'ancrage est équipée de deux capteurs de déplacement BEI-Duncan 9600, localisées à environ 30 mm de la surface du substrat (Figure 4.11). Tous les capteurs ont été branchés à un système d'acquisition de données (section 4.3.4) pour enregistrer simultanément

les charges et les déplacements. Un total de 10 bâtis permettent tester 10 ancrages ensemble. D'autres détails du montage d'essai sont montrés à l'Annexe D, Fig. D-10.

Mise en charge : Celle-ci a été exécutée selon une procédure fixe. Le pré-chargement des ancrages produit une charge d'environ 9 kN. Ce pré-chargement correspond au moment où les deux leviers sont en position horizontale, lorsque l'extrémité du levier principale est reliée par la tige calibrée (dessin de la Figure 4.10). La charge totale requise pour chaque condition de chargement (voir Chapitre 5, section 5.3) est ensuite appliquée durant les 2 minutes suivant le pré-chargement, à l'aide des blocs de béton de 12,7 kg (voir Annexe D, Figures D-6 à D-8). Durant cette étape, les mesures de charge et de déplacement sont enregistrées à tous les secondes. Une fois la mise en charge accomplie, les mesures sont enregistrées à toutes les 15 minutes, jusqu'à la fin des essais de chargement soutenu (1000 heures, environ 42 jours).

Essais à 43°C : On a utilisé le montage décrit, suivant la même mise en charge, en plaçant les montages et les blocs de béton dans une chambre de conditionnement à température contrôlée (Annexe D, Figure D-8).

#### 4.3.4 Système d'acquisition de données

Le système d'acquisition des données est constitué d'un module logiciel VISHAY 5100B et du logiciel StrainSmart. Le système est branché sur les tiges (capteurs de charge) et les tandems des capteurs de déplacement (Figure 4.12). Le système enregistre automatiquement un fichier de sauvegarde à toutes les 12 heures, pendant la durée des essais de chargement soutenu. Les fichiers de données peuvent être exportés dans une feuille Excel pour un traitement mathématique ultérieur.

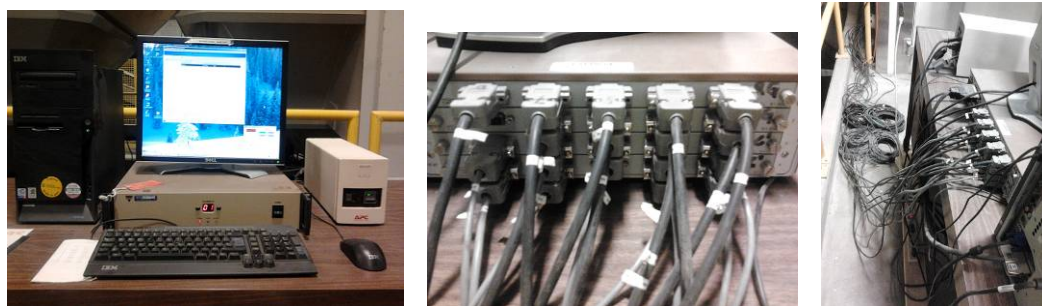


Figure 4.12 Système d'acquisition des données VISHAY 5100B.



#### 4.3.5 Calibration des capteurs de force et de déplacement

Une procédure de calibration a été utilisée pour les capteurs de charge et déplacement. Les appareils de calibration des tiges filetées, des tandems (Figure 4.13) et de la cellule de charge sont expliqués sommairement :

- Cellule de charge – essais d’arrachement : Elle a été calibrée à l’aide de la presse hydraulique Baldwin, sur un rang de 0 – 100 kN (force maximale de traction sur les tiges).
- Tiges filetées d’acier – capteurs de force : La calibration permet de mesurer les charges appliquées à partir de la déformation des tiges, à l’aide des jauges de déformation installées sur chaque tige (Figure 4.11). Pour la calibration des jauges on a utilisé la machine MTS810 (Figure 4.13), sur un rang de 100 kN. Chaque capteur a une précision  $\pm 0,1$  kN.
- Tandems – capteurs de déplacement : On place chaque capteur dans un système attaché à un micromètre (de précision  $\pm 1$   $\mu\text{m}$ ) spécialement conçu pour la calibration sur un rang de 15 mm (Figure 4.13). On prend des lectures de déplacement pour différents marques du micromètre, à tous les 2 mm, et on construit une courbe de calibration. Chaque capteur a une précision  $\pm 10$   $\mu\text{m}$ .

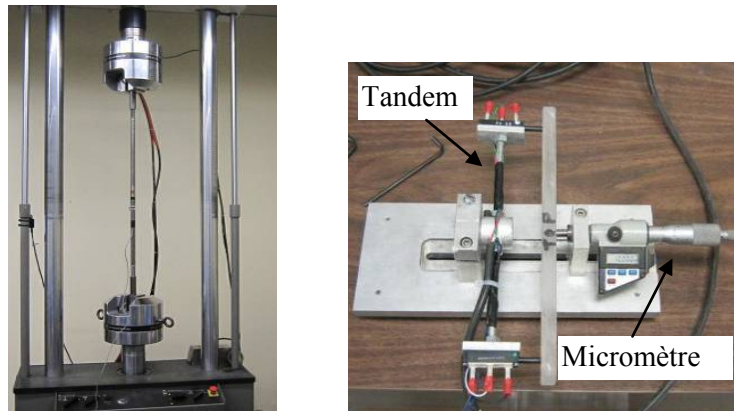


Figure 4.13 Appareils de calibration des tiges filetées (gauche) et des tandems (droite).

## 5. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les graphiques issus des essais statiques d'arrachement sont présentés à l'Annexe A. Dans ce chapitre, on présentera quelques graphiques représentatifs de ces essais, plus le sommaire des résultats numériques (tableaux) et les graphiques obtenus lors des essais de chargements soutenu et des essais *post-creep*.

### 5.1 Essais sur les barres et les adhésifs

#### 5.1.1 Résistance à la traction des barres d'ancrage

Le Tableau 5.1 présente les résultats des essais de traction directe sur les barres d'ancrage. Les valeurs moyennes de  $F_y = 82$  kN (400 W) et 116 kN (500 W) ont été considérées comme les valeurs minimales de plastification desdites barres au moment de l'application des charges statiques de traction sur les ancrages. Les valeurs moyennes de la limite d'élasticité  $\sigma_y = 414$  MPa (400 W) et  $\sigma_y = 586$  MPa (500 W) confirment que les deux types de barres testées ont atteint la performance spécifiée par le fabricant. La Figure 5.1 montre le comportement typique charge – déplacement des barres testées.

Tableau 5.1 Résultats des essais directs de traction sur les barres d'ancrage.

Barres 400 W				Barres 500 W			
Barre	$F_y$ (kN)	$\sigma_y$ (MPa)	$F_u$ (kN)	Barre	$F_y$ (kN)	$\sigma_y$ (MPa)	$F_u$ (kN)
1	82,4	416,3	120,2	1	117,0	591,2	161,2
2	81,0	409,0	121,1	2	116,2	587,2	160,8
3	82,8	418,4	121,0	3	116,2	587,3	160,7
4	81,0	409,1	117,7	4	115,5	583,4	160,8
5	82,5	416,9	115,7	5	115,4	583,1	160,6
<b>Moyenne</b>	<b>82</b>	<b>414</b>	<b>119</b>	<b>Moyenne</b>	<b>116</b>	<b>586</b>	<b>161</b>
<b>COV</b>	1%	2%	1%	<b>COV</b>	1%	0%	1%

#### 5.1.2 Résistance à la compression et temps de prise : AAC et ARC

Le Tableau 5.2 montre les résultats des essais de résistance à la compression des deux adhésifs cimentaires étudiés. La résistance à la compression moyenne à 28 jours pour l'adhésif AAC est  $f'_c = 55$  MPa. Celle de l'adhésif ARC est  $f'_c = 46$  MPa. Ces valeurs sont compatibles avec celles des fiches techniques de la compagnie AMBEX. Les temps de prise initial et final des

adhésifs AAC et ARC sont présentés au Tableau 5.3. Ces résultats indiquent que les adhésifs ont des temps de prise très courts pour des matériaux cimentaires. Le temps de prise final de l'adhésif AAC est de 31 minutes. Celui de l'adhésif ARC est cependant de 35 minutes. C'est l'adhésif AAC qui présente le temps de prise initial le plus court (12 minutes). Globalement, ces résultats concordent avec les spécifications des fiches techniques du fabricant.

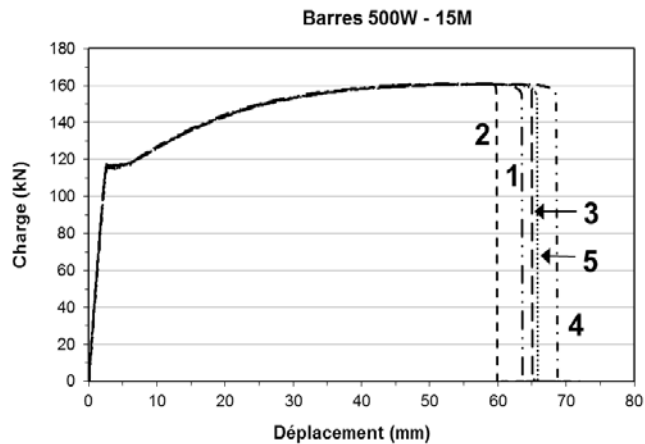


Figure 5.1 Graphiques charge – déplacement typiques des barres d'acier utilisées.

Tableau 5.2 Résistance à la compression des adhésifs d'ancrage AAC et ARC.

Temps de cure	Adhésif AAC				Adhésif ARC				
	$f'_c$ (MPa)			Moyenne	$f'_c$ (MPa)			Moyenne	
	1	2	3		1	2	3		
4 heures	16,6	18,8	20,7	19	4 heures	31,3	33,6	30,9	32
1 jour	44,4	24,8	42,6	37	1 jour	34,6	41,7	34,2	37
7 jours	46,6	53,6	55,2	52	7 jours	44,7	44,8	43,1	44
28 jours	54,1	56,0	54,2	<b>55</b>	28 jours	43,6	45,7	48,1	<b>46</b>

Tableau 5.3 Temps de prise des adhésifs d'ancrage AAC et ARC.

Éprouvette	Adhésif AAC		Éprouvette	Adhésif ARC	
	Temps de prise (min)			Temps de prise (min)	
	Initial	Final		Initial	Final
1	10	30	1	31	34
2	14	32	2	29	36
<b>Moyenne</b>	<b>12</b>	<b>31</b>	<b>Moyenne</b>	<b>30</b>	<b>35</b>

## 5.2 Calcul des propriétés mécaniques des ancrages

### 5.2.1 Charge maximale $N_u$

La norme AASHTO TP 84-10 décrit trois tendances de comportement des graphiques charge - déplacement, mentionnés dans le Chapitre 2 (section 2.6.2). Tous les graphiques obtenus lors des essais, correspondent au type « contrôlé par la résistance » (Figure 5.2), où les déplacements augmentent de façon proportionnelle aux charges appliquées, jusqu'au maximum (pic), appelé charge maximale  $N_u$ , après lequel l'ancrage ne prend plus de charge et celle-ci commence à diminuer, dans certains cas de manière abrupte – forte pente négative – et dans d'autres cas de façon lente – plateau dans les graphiques – (Figure 5.3). En conséquence, les valeurs de  $N_u$  ont été déterminées par observation directe des graphiques charge - déplacement.

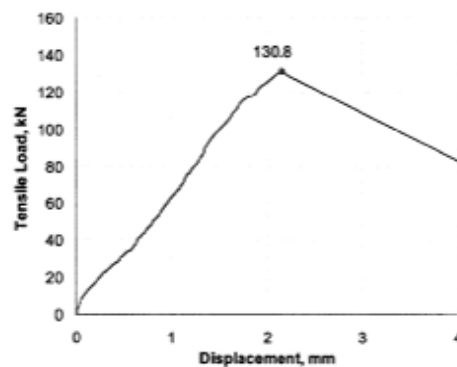


Figure 5.2 Graphique typique charge - déplacement contrôlée par la résistance. AASHTO TP 84-10 [NCHRP (N°639), 2009].

### 5.2.2 Charge à la perte d'adhérence $N_{adh}$

Selon les normes ACI 355.4-11 (section 10.4.4.3) et ICC-ES AC308, cette charge correspond au premier changement brusque de la pente des graphiques charge - déplacement, c'est-à-dire, à la perte de raideur du système d'ancrage. Ce moment correspond au premier glissement de la barre dans le trou. Les valeurs de  $N_{adh}$  sont établies par observation directe des graphiques charge - déplacement (Figure 5.3). On a constaté que la méthode alternative pour déterminer  $N_{adh}$  (normes ACI 355-11 et ICC-ES AC308), lorsque cette charge ne peut pas être repérée par observation directe, ne s'applique pas aux cas des ancrages cimentaires, puisque les courbes charge-déplacement desdits ancrages montrent toujours un changement brusque de pente à la fin de la limite élastique du système d'ancrage (Figure 5.3).

Les charges  $N_{adh}$  ont été utilisées pour le calcul de la contrainte d'adhérence  $\tau$ , puisque le premier glissement des ancrages dans les trous est observé juste à l'atteinte de  $N_{adh}$ . Lorsque les ancrages atteignent la charge à la perte d'adhérence  $N_{adh}$ , on observe ensuite une diminution plus ou moins brusque du niveau de charge. Cette diminution peut disparaître par la suite, en raison d'un phénomène de renforcement (écrouissage) qui sera décrit plus tard.

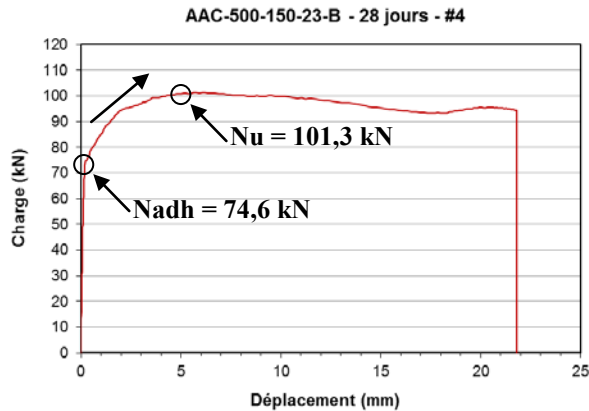


Figure 5.3 Valeurs de  $N_u$  et  $N_{adh}$  indiquées dans un des graphiques typiques charge - déplacement.

### 5.2.3 Contrainte d'adhérence $\tau$

Pour le calcul de la contrainte d'adhérence  $\tau$ , l'équation 5.1 de la norme ACI 355.4-11, section 10.4.5.1 (norme ETAG 001, part 5, section 6.1.2.2.1, équation 6.17.1) a été utilisée. Celle-ci est basée sur le modèle d'adhérence uniforme (Chapitre 2, section 2.4), qui s'applique au cas de la rupture des ancrages testés. La rupture correspond à la défaillance de la liaison adhésif-substrat<sup>24</sup>, selon le mode de rupture typique présenté à l'équation 5.1.

$$\tau = \alpha_{setup} * N_{adh} / \pi * d * h_{ef} \quad (5.1)$$

La valeur de  $\alpha_{setup} = 0,75$  s'applique dans le cas des essais confinés. La contrainte d'adhérence  $\tau$  n'est fonction que des paramètres géométriques de la barre d'acier, soit le diamètre de la barre ( $d$ ) et sa longueur d'ancrage ( $h_{ef}$ ).

<sup>24</sup> Environ 5% des ancrages avec l'adhésif AAC et 15% des ancrages avec l'adhésif ARC (la plupart après 4 et 24 heures de cure) ont montré une défaillance adhésif-barre d'acier, qui correspond également au modèle d'adhérence uniforme.

### 5.3 Essais statiques d'arrachement des ancrages

Les résultats des essais statiques de traction sont présentés aux Tableaux 5.4 à 5.9 et aux Figures 5.5 à 5.9. Les résultats sont regroupés selon le type d'adhésif et selon la nuance de l'acier des barres. La Figure 5.4 montre deux graphiques typiques charge – déplacement pour les adhésifs AAC et ARC. On peut y observer des grandes différences dans les spécimens testés avec l'AAC, et une relative homogénéité dans le cas de l'ARC. L'ensemble des graphiques charge – déplacement pour toutes les séries d'essais sont regroupés à l'Annexe A. Pour chacune des séries, on a obtenu les valeurs moyennes de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$ . La moyenne des charges  $N_{adh}$  est la valeur utilisée pour le calcul de la charge à appliquer dans les essais de chargement soutenu à la température ambiante (23°C) et élevée (43°C).

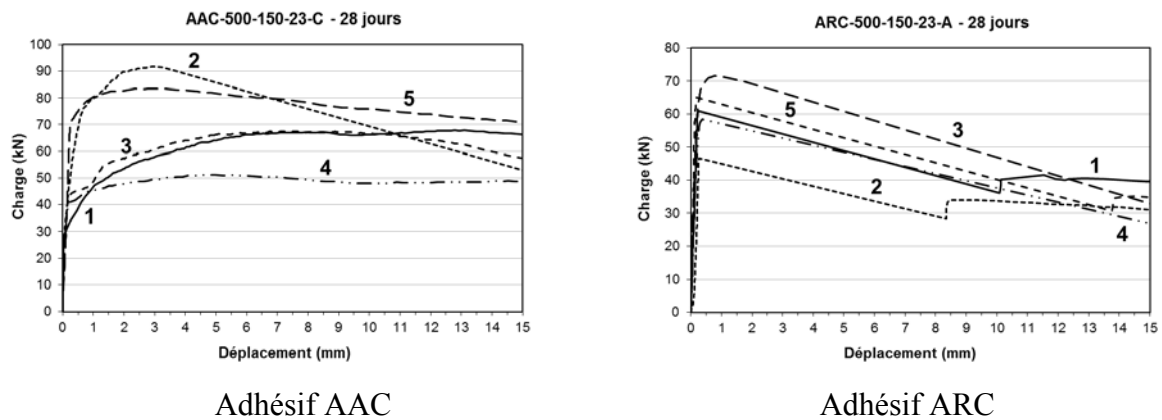


Figure 5.4 Graphiques typiques charge - déplacement par série. Essais statiques de traction.

#### 5.3.1 Adhésif AAC (400W et 500W)

Les résultats des essais sont montrés aux Tableaux 5.4 et 5.5 et dans les Figures 5.5 et 5.6. Les données du Tableau 5.4 (séries AAC-400-23) montrent que les valeurs de  $N_u$  des ancrages à  $h_{ef} = 100$  mm et 125 mm ont des coefficients de variation (COV) relativement élevés (18% - 30%). Cette variabilité est observée à 7 jours et à 28 jours. Elle est expliquée principalement par la faible longueur d'ancrage qui amplifie les effets des défauts potentiels d'installation. Quant à la charge  $N_{adh}$ , les COV sont encore plus élevés (20% - 54%). Les mesures de ces charges semblent encore plus sensibles aux conditions d'installation et à la longueur d'ancrage. Les COV des contraintes  $\tau$  sont les mêmes que ceux de  $N_{adh}$ , puisque la valeur de  $\tau$  est calculée à partir de  $N_{adh}$ .

Les COV obtenus pour  $h_{ef} = 150$  mm (Tableau 5.4) sont nettement plus faibles (12% - 16%) que ceux obtenus à  $h_{ef} = 100$  mm et 125 mm. Cette moindre variabilité découle probablement du fait que lorsqu'on ancre les barres à une plus grande longueur d'ancrage, les effets relatifs aux conditions d'installation diminuent.

Les données du Tableau 5.5 (séries AAC-500-23), montrent aussi des COV relativement élevés pour les charges  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et la contrainte  $\tau$ . Les valeurs de COV les plus élevées (48% - 61%) sont obtenues pour  $h_{ef} = 125$  mm. Quant à  $h_{ef} = 150$  mm, les valeurs de COV sont plus faibles, et diminuant progressivement dans chaque série testée (série B : 30% - 47%, série C : 22% - 43%, série D : 20% - 21%).

Globalement, les COV des séries à l'acier 500W sont plus grands que ceux des séries aux barres 400W. Dans la plupart de ces séries, une valeur très faible par rapport aux autres 4 valeurs de chaque série (5 ancrages) fait en sorte que les COV augmentent. L'origine de ces valeurs très basses est due probablement à une variabilité liée à l'adhésif d'ancrage (AAC) et / ou à des défauts locaux d'installation. En fait, les meilleurs résultats à  $h_{ef} = 150$  mm (AAC-400-150-23-A-28j et AAC-500-150-23-D-7j) ont été obtenus lorsque l'installation a été effectuée par un technicien expérimenté qui a suivi rigoureusement la procédure recommandée par le fabricant.

De plus, on a remarqué que les valeurs moyennes de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  des ancrages à l'acier 400W sont supérieures à celles obtenues aux ancrages à l'acier 500W, pour une même longueur d'ancrage  $h_{ef}$  (Tableaux 5.4 et 5.5). Avec les autres paramètres invariables (type de substrat et d'adhésif, installation, géométrie, température), il se peut que la résistance des barres conditionne la performance de l'adhésif, étant celui-ci plus performant si les barres d'acier ont une nuance de 400 MPa, par rapport aux barres de nuance 500 MPa.

On a pu constater que les charges  $N_u$  sont fortement dépendantes de la longueur d'ancrage, les valeurs les plus élevées étant obtenues avec  $h_{ef} = 150$  mm.

Tableau 5.4 Ancrages avec l'adhésif AAC. Valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$ . Acier 400 W, 23°C

<b>Essais statiques de traction – AAC-400W-23°C</b>							
<b>Séries</b>	<b>AAC-400-100-23-A</b>		<b>AAC-400-125-23-A</b>		<b>AAC-400-125-23-B</b>		<b>AAC-400-150-23-A</b>
<b>T. cure</b>	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours	28 jours
<b>Ancrage</b>	<b>Charges <math>N_u</math> (kN)</b>						
1	44,3	39,8	41,2	57,1	38,8	57,1	112,4
2	49,9	72,3	61,1	78,7	85,9	78,3	112,6
3	48,4	50,2	40,3	52,0	96,3	78,5	90,3
4	58,8	33,8	54,0	83,2	56,7	96,9	110,2
5	69,1	28,0	58,7	51,2	-	84,8	67,0
6	-	-	-	-	-	-	92,6
7	-	-	-	-	-	-	98,2
8	-	-	-	-	-	-	99,9
<b>Moyennes</b>	<b>54</b>	<b>45</b>	<b>51</b>	<b>64</b>	<b>69</b>	<b>79</b>	<b>98</b>
<b>COV</b>	18%	39%	19%	24%	38%	18%	16%
<b>Ancrage</b>	<b>Charges <math>N_{adh}</math> (kN)</b>						
1	35,8	35,7	38,2	49,8	36,7	51,9	88,4
2	20,7	69,3	41,0	52,2	85,3	76,8	80,4
3	47,4	39,0	23,9	34,3	82,8	77,1	86,0
4	53,4	27,3	40,3	59,6	50,2	80,2	86,8
5	40,4	15,6	32,9	37,6	-	79,6	63,8
6	-	-	-	-	-	-	80,9
7	-	-	-	-	-	-	65,2
8	-	-	-	-	-	-	86,9
<b>Moyennes</b>	<b>40</b>	<b>37</b>	<b>35</b>	<b>47</b>	<b>64</b>	<b>73</b>	<b>80</b>
<b>COV</b>	32%	54%	20%	23%	38%	16%	12%
<b>Ancrage</b>	<b>Contrainte d'adhérence <math>\tau</math> (MPa)</b>						
1	5,4	5,4	4,6	6,0	4,4	6,2	8,9
2	3,1	10,4	4,9	6,3	10,3	9,2	8,1
3	7,1	5,9	2,9	4,1	10,0	9,3	8,6
4	8,0	4,1	4,8	7,2	6,0	9,7	8,7
5	6,1	2,3	4,0	4,5	-	9,6	6,4
6	-	-	-	-	-	-	8,1
7	-	-	-	-	-	-	6,5
8	-	-	-	-	-	-	8,7
<b>Moyennes</b>	<b>5,9</b>	<b>5,6</b>	<b>4,2</b>	<b>5,6</b>	<b>7,7</b>	<b>8,8</b>	<b>8,0</b>
<b>COV</b>	32%	54%	20%	23%	38%	16%	13%



Tableau 5.5 Ancrages avec l'adhésif AAC. Valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$ . Acier 500 W, 23°C

Essais statiques de traction – AAC-500W-23°C							
Séries	AAC-500-125-23-C		AAC-500-150-23-B		AAC-500-150-23-C		AAC-500-150-23-D
T. cure	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours	7 jours
<b>Ancrage</b>	<b>Charges <math>N_u</math> (kN)</b>						
1	19,1	91,1	99,5	45,1	83,4	68,0	89,5
2	63,6	26,9	37,5	89,2	62,8	91,6	89,3
3	53,2	37,7	115,4	118,1	64,2	83,5	95,0
4	49,4	85,9	106,7	101,3	52,5	51,3	64,9
5	92,5	67,9	85,1	101,3	40,7	67,6	58,0
<b>Moyennes</b>	<b>56</b>	<b>62</b>	<b>89</b>	<b>91</b>	<b>61</b>	<b>72</b>	<b>79</b>
<b>COV</b>	48%	46%	35%	30%	26%	22%	21%
<b>Ancrage</b>	<b>Charges <math>N_{adh}</math> (kN)</b>						
1	15,1	73,3	94,8	14,3	77,5	28,8	84,2
2	43,9	7,7	31,0	63,2	46,5	76,4	66,3
3	44,1	28,9	70,9	92,9	37,6	70,8	84,8
4	23,4	60,8	87,7	74,6	32,2	40,5	63,8
5	79,8	51,2	66,9	80,3	30,2	44,3	53,1
<b>Moyennes</b>	<b>41</b>	<b>44</b>	<b>70</b>	<b>65</b>	<b>45</b>	<b>52</b>	<b>70</b>
<b>COV</b>	61%	59%	35%	47%	43%	39%	20%
<b>Ancrage</b>	<b>Contrainte d'adhérence <math>\tau</math> (MPa)</b>						
1	1,8	8,8	9,5	1,4	7,8	2,9	8,4
2	5,3	0,9	3,1	6,3	4,7	7,7	6,6
3	5,3	3,5	7,1	9,3	3,8	7,1	8,5
4	2,8	7,3	8,8	7,5	3,2	4,1	6,4
5	9,6	6,2	6,7	8,1	3,0	4,4	5,3
<b>Moyennes</b>	<b>5,0</b>	<b>5,3</b>	<b>7,0</b>	<b>6,5</b>	<b>4,5</b>	<b>5,2</b>	<b>7,1</b>
<b>COV</b>	61%	59%	35%	47%	43%	39%	20%

La Figure 5.5 présente l'évolution de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  en fonction du temps et de la profondeur d'ancrage pour les séries AAC-400W à 23°C. La valeur de  $N_u$  tend à augmenter entre 7 et 28 jours. Cependant, l'augmentation est difficile à quantifier en raison de la variabilité importante de la valeur  $N_u$ . On constate que plus la longueur d'ancrage augmente, plus  $N_u$  augmente. Pour  $h_{ef} = 150$  mm, lorsque l'installation est conforme, la charge  $N_{adh}$  correspond à la charge de plastification des barres 400W.

Les valeurs de  $\tau$  ne suivent pas nécessairement les mêmes tendances que celles de  $N_{adh}$ . Elles sont comprises entre 4,2 et 8,0 MPa. Les valeurs plus faibles résultent des défauts locaux

d'installation et de l'utilisation d'une faible longueur d'ancrage ( $h_{ef} \leq 125$  mm). Les résultats suggèrent que la valeur de 8 MPa est la valeur la plus représentative obtenue à  $h_{ef} = 150$  mm et à 28 jours de cure.

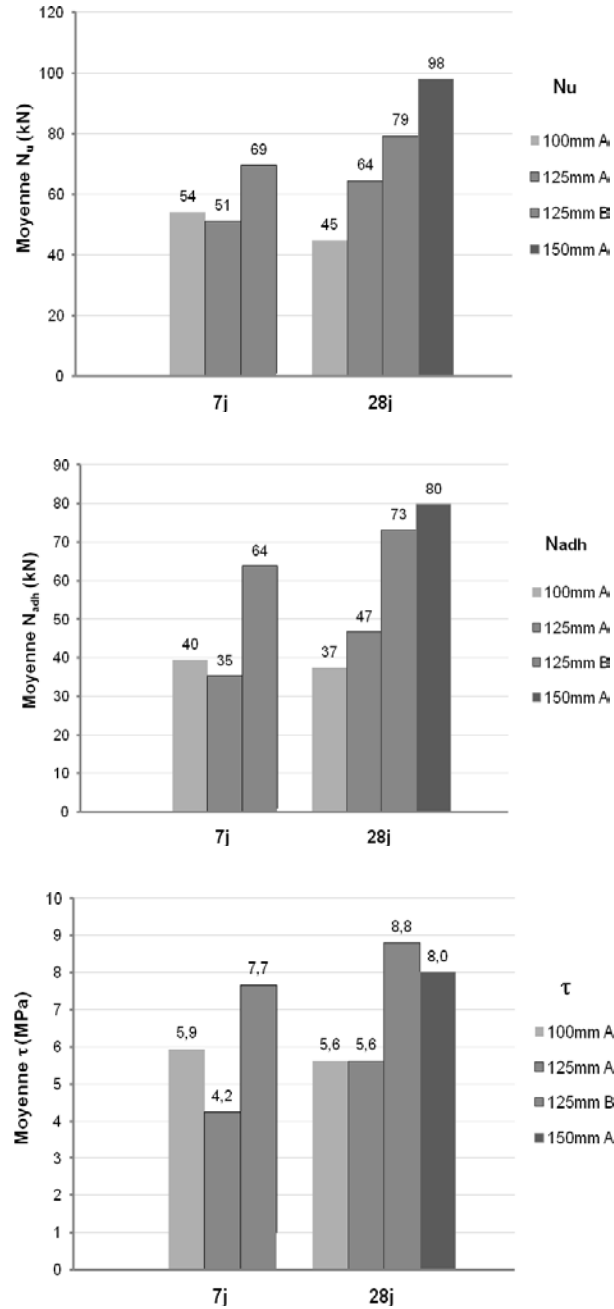


Figure 5.5 Essais statiques de traction. AAC - 400 W – 23°C  
Valeurs moyennes de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  selon le temps de cure.

La Figure 5.6 présente les valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  pour les séries AAC-500W à 23°C. Il faut rappeler que les résultats sont caractérisés pour une variabilité importante. Il est difficile d'en sortir des conclusions sur l'effet des paramètres évalués.

La charge  $N_u$  ne semble pas varier de manière importante entre 7 jours et 28 jours. On constate que dans le cas des barres 500W, la plastification n'est pas atteinte ( $N_u \text{ max} = 91 \text{ kN} < F_y = 116 \text{ kN}$ ). L'utilisation des barres 500W fait en sorte que la défaillance de l'ancrage se produit suite à la rupture de l'adhérence et non par la plastification de l'acier.

Du même que pour  $N_u$ , il est difficile de conclure sur l'influence de la longueur  $h_{ef}$  et du temps de cure sur la valeur de  $N_{adh}$ . On constate cependant que les valeurs maximales de  $N_{adh}$  sont toujours inférieures à la valeur de  $F_y$ . La rupture est toujours contrôlée par l'adhérence. Les valeurs de  $\tau$  sont comprises entre 5,6 et 8,8 MPa. Les résultats montrent que la valeur de 7 MPa est la valeur la plus représentative : elle est dans la plage des valeurs habituellement obtenues avec ce type d'adhésif (entre 6 et 8 MPa).

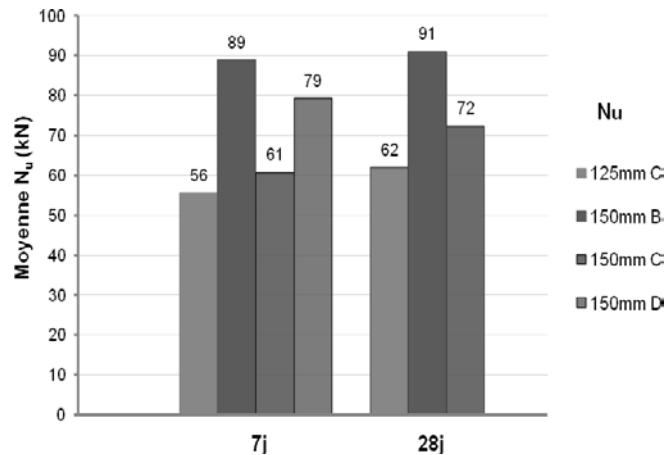


Figure 5.6 Essais statiques de traction. AAC - 500 W – 23°C  
Valeurs moyennes de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  selon le temps de cure.

Le Tableau 5.6 présente les valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  pour l'adhésif AAC testé à 43°C (barres 500W). On observe d'abord que les coefficients de variation sont relativement faibles, étant compris entre 12% et 17%. Cette plus faible variabilité découle de la plus grande expérience technique pour la mise en place des barres. De plus une longueur  $h_{ef} = 150 \text{ mm}$  contribue à diminuer la variabilité des résultats.

La charge moyenne  $N_u$  à 28 jours est de 102 kN. Cette valeur est légèrement supérieure à la valeur maximale de 91 kN obtenue à 28 jours (23°C) avec la série AAC-500-150-23-B (Tableau 5.5).

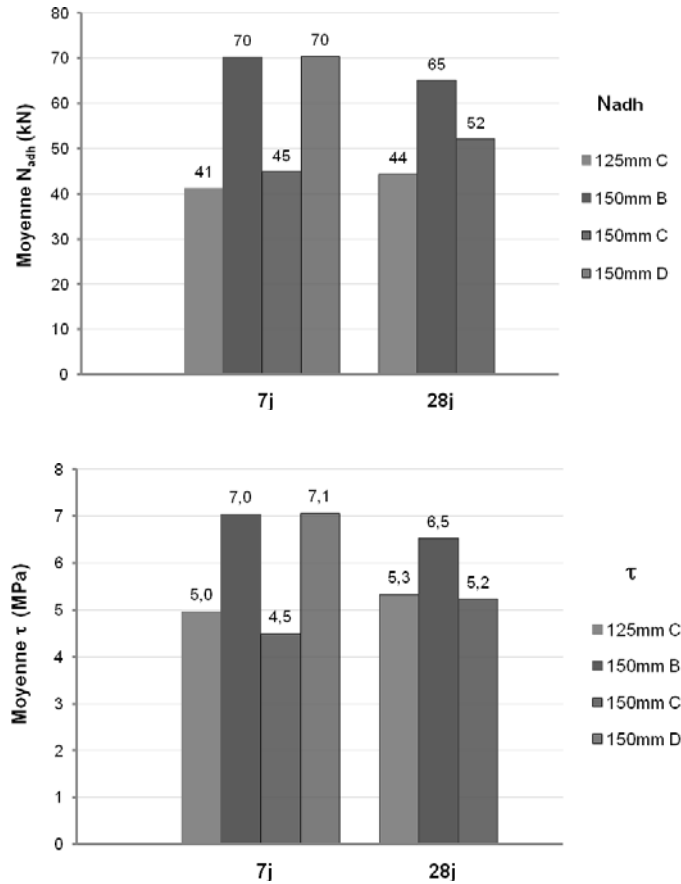


Figure 5.6 (suite) Essais statiques de traction. AAC - 500 W – 23°C  
Valeurs moyennes de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  selon le temps de cure.

Tableau 5.6 Ancrages avec l'adhésif AAC. Valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$ .  
Acier 500 W, 43°C

<b>Essais statiques de traction - AAC-500W-43°C</b>			
<b>Série – T. cure</b>	<b>AAC-500-150-43-D – 28 jours</b>		
<b>Ancrage</b>	<b><math>N_u</math> (kN)</b>	<b><math>N_{adh}</math> (kN)</b>	<b><math>\tau</math> (MPa)</b>
1	117,2	85,2	8,5
2	89,3	72,3	7,2
3	103,0	99,9	10,0
4	121,5	88,9	8,9
5	80,3	79,3	8,0
<b>Moyenne</b>	<b>102</b>	<b>85</b>	<b>8,5</b>
<b>COV</b>	<b>17%</b>	<b>12%</b>	<b>12%</b>

La charge  $N_{adh}$  et la contrainte  $\tau$  moyennes sont respectivement de 85 kN et 8,5 MPa. Ces deux valeurs sont, elles aussi, légèrement supérieures à celles obtenues à 23°C.

### 5.3.2 Adhésif ARC

Le Tableau 5.7 présente les résultats des essais d'arrachement pour l'adhésif AAC utilisé avec des barres 500W à 23°C. Deux séries d'essais ont été réalisées avec une longueur  $h_{ef} = 150$  mm (ARC-500-150-23-A et ARC-500-150-23-B).

Ces deux séries ont pour but d'évaluer la résistance de l'ancrage en fonction du temps. Les premiers essais ont été réalisés après seulement 4 heures ; les derniers après 28 jours de cure.

D'abord, on constate que les coefficients de variation (COV) sont compris entre 15% et 26%. Globalement, il semble que la variabilité de l'adhésif ARC soit un peu plus faible que celle de l'adhésif AAC.

L'adhésif ARC permet d'obtenir environ 50% des charges  $N_u$  et  $N_{adh}$  après seulement 4 heures (Tableau 5.7). C'est une des caractéristiques les plus remarquables de ce produit. Pour  $h_{ef} = 150$  mm, la défaillance de l'ancrage se produit suite à la perte d'adhérence : la valeur maximale de  $N_{adh} = 80$  kN est inférieure à la charge de plastification de la barre ( $F_y = 116$  kN). Les résultats du Tableau 5.7 montrent que la valeur maximale de  $\tau$  est d'environ 8 MPa, ce qui est similaire à la valeur obtenue avec l'adhésif AAC ( $7 \text{ MPa} < \tau < 8 \text{ MPa}$ ).

Le Tableau 5.8 présente les résultats des essais d'arrachement pour l'adhésif AAC avec une  $h_{ef} = 125$  mm. Globalement, les mêmes tendances de  $h_{ef} = 150$  mm sont observées. Cependant, comme pour les séries AAC, les COV sont plus élevés en raison de la plus grande variabilité due à la faible longueur d'ancrage.

La Figure 5.7 présente l'évolution de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  en fonction du temps de cure (âge au chargement) et de la longueur d'ancrage pour les séries ARC-500-150-23 (A et B) et ARC-500-125-23-A.

Tableau 5.7 Ancrages avec l'adhésif ARC. Valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$ .  $h_{ef} = 150$  mm,  $23^\circ\text{C}$

<b>Essais statiques de traction – ARC-500W-23°C</b>							
<b>Séries</b>	<b>ARC-500-150-23-A</b>				<b>ARC-500-150-23-B</b>		
<b>T. cure</b>	4 heures	24 heures	7 jours	28 jours	24 heures	7 jours	14 jours
<b>Ancrage</b>	<b>Charges <math>N_u</math> (kN)</b>						
1	36,5	45,8	102,8	60,9	72,3	115,0	85,4
2	49,1	42,2	104,7	46,6	49,3	97,9	71,0
3	50,5	68,1	48,3	71,7	61,2	98,2	100,1
4	30,7	60,2	99,1	58,3	95,0	75,9	66,8
5	38,4	74,4	96,5	65,0	-	71,6	84,4
<b>Moyenne</b>	<b>41</b>	<b>58</b>	<b>90</b>	<b>60</b>	<b>69</b>	<b>92</b>	<b>81</b>
<b>COV</b>	21%	24%	26%	15%	28%	19%	16%
<b>Ancrage</b>	<b>Charges <math>N_{adh}</math> (kN)</b>						
1	34,1	44,4	75,6	58,7	60,8	101,7	83,6
2	47,4	41,1	86,1	45,3	48,3	73,6	68,9
3	42,5	67,0	45,4	67,7	59,8	89,9	98,1
4	30,0	59,1	98,4	57,2	87,3	73,8	66,2
5	37,0	71,8	93,9	64,3	-	70,5	83,4
<b>Moyenne</b>	<b>38</b>	<b>57</b>	<b>80</b>	<b>59</b>	<b>64</b>	<b>82</b>	<b>80</b>
<b>COV</b>	18%	24%	26%	15%	26%	16%	16%
<b>Ancrage</b>	<b>Contrainte d'adhérence <math>\tau</math> (MPa)</b>						
1	3,4	4,5	7,6	5,9	6,1	10,2	8,4
2	4,8	4,1	8,6	4,5	4,8	7,4	6,9
3	4,3	6,7	4,5	6,8	6,0	9,0	9,8
4	3,0	5,9	9,9	5,7	8,8	7,4	6,6
5	3,7	7,2	9,4	6,4	-	7,1	8,4
<b>Moyenne</b>	<b>3,8</b>	<b>5,7</b>	<b>8,0</b>	<b>5,9</b>	<b>6,4</b>	<b>8,2</b>	<b>8,0</b>
<b>COV</b>	18%	24%	26%	15%	26%	16%	16%

Pour les trois séries testées avec l'adhésif ARC, les courbes montrent que les valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  augmentent entre 4 heures et 7 jours, mais elles commencent à diminuer au-delà de 7 jours. A 28 jours, la perte de résistance moyenne est d'environ 20% par rapport aux valeurs à 7 jours. Cette perte de résistance à l'arrachement n'est pas corrélée avec la résistance à la compression. En effet, les résultats du Tableau 5.2 ne montrent pas de perte de  $f'_c$  entre 7 et 28 jours. Il est possible que la perte d'adhérence pendant cette période résulte d'un retrait qui pourrait diminuer l'adhérence au substrat, mais sans influencer la valeur de  $f'_c$  de l'adhésif.

Tableau 5.8 Ancrages avec l'adhésif ARC. Valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$ .  $h_{ef}$  = 125 et 150 mm, 23°C

<b>Essais statiques de traction – ARC-500W-23°C</b>					
<b>Séries</b>	<b>ARC-500-125-23-A</b>				<b>150-23-C</b>
<b>T. cure</b>	4 heures	24 heures	7 jours	28 jours	7 jours
<b>Ancrage</b>	<b>Charges <math>N_u</math> (kN)</b>				
1	32,2	88,9	63,0	99,8	88,9
2	10,5	69,3	64,0	32,2	69,3
3	8,1	35,3	86,8	55,7	35,3
4	9,1	88,6	50,5	88,2	88,6
5	19,4	67,6	89,0	54,8	67,6
<b>Moyenne</b>	<b>16</b>	<b>42</b>	<b>71</b>	<b>66</b>	<b>70</b>
<b>COV</b>	64%	28%	24%	41%	31%
<b>Ancrage</b>	<b>Charges <math>N_{adh}</math> (kN)</b>				
1	15,3	45,8	62,7	95,8	75,8
2	9,8	23,5	62,2	25,0	65,8
3	7,8	53,7	86,2	52,1	20,8
4	8,4	36,7	48,6	86,0	79,3
5	18,4	47,4	87,7	51,9	67,0
<b>Moyenne</b>	<b>12</b>	<b>41</b>	<b>69</b>	<b>62</b>	<b>62</b>
<b>COV</b>	39%	28%	24%	46%	38%
<b>Ancrage</b>	<b>Contrainte d'adhérence <math>\tau</math> (MPa)</b>				
1	1,8	5,5	7,5	11,5	7,6
2	1,2	2,8	7,5	3,0	6,6
3	0,9	6,5	10,4	6,3	2,1
4	1,0	4,4	5,8	10,3	7,9
5	2,2	5,7	10,6	6,2	6,7
<b>Moyenne</b>	<b>1,4</b>	<b>5,0</b>	<b>8,4</b>	<b>7,5</b>	<b>6,2</b>
<b>COV</b>	39 %	28%	24%	46%	38%

Le Tableau 5.9 présente les valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  pour l'adhésif ARC testé à 43°C (barres 500W). On observe d'abord que les coefficients de variation sont faibles, étant compris entre 8% et 10%. Du même que dans le cas de l'adhésif AAC, la plus faible variabilité découle de la plus grande expérience technique pour la mise en place des barres. Egalement, une longueur  $h_{ef}$  = 150 mm contribue à diminuer la variabilité des résultats.

La charge moyenne  $N_u$  à 28 jours est de 115 kN. Cette valeur est nettement supérieure aux valeurs obtenue à 28 et 14 jours (23°C) avec les séries ARC-500-150-23-A et ARC-500-150-23-C respectivement (Tableau 5.7).

La charge  $N_{adh}$  et la contrainte  $\tau$  moyennes sont respectivement de 106 kN et 10,7 MPa. Ces deux valeurs sont, elles aussi, supérieures à celles obtenues à 23°C.

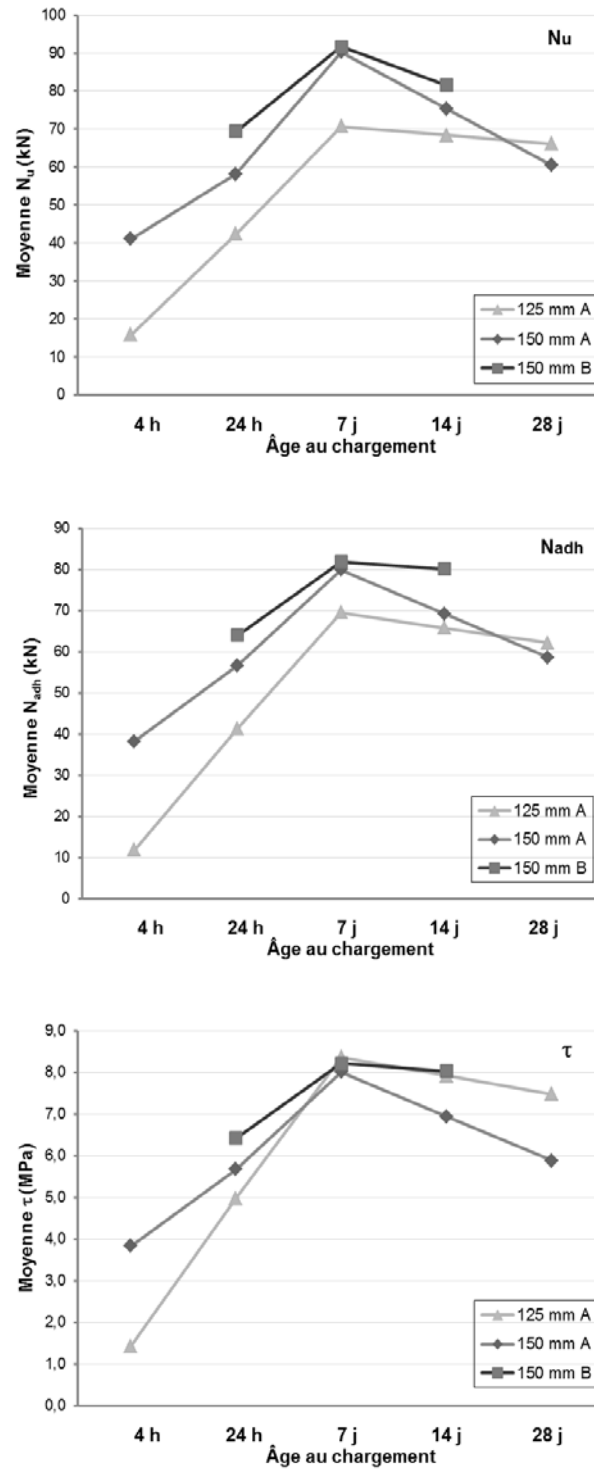


Figure 5.7 Variabilité des moyennes de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  selon le temps de cure. Essais statiques de traction ARC - 500 W - 23°C -  $h_{ef}$  = 125 mm et 150 mm



Tableau 5.9 Ancrages avec l'adhésif ARC. Valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$   
 $h_{ef} = 150 \text{ mm}$ ,  $43^\circ\text{C}$

<b>Essais statiques de traction - ARC-500W-43°C</b>			
<b>Série – T. cure</b>	<b>ARC-500-150-43-C – 28 jours</b>		
<b>Ancrage</b>	<b><math>N_u</math> (kN)</b>	<b><math>N_{adh}</math> (kN)</b>	<b><math>\tau</math> (MPa)</b>
1	102,3	95,9	9,6
2	127,1	118,6	11,9
3	111,2	94,5	9,5
4	118,1	113,3	11,4
5	116,1	109,4	11,0
<b>Moyenne</b>	<b>115</b>	<b>106</b>	<b>10,7</b>
<b>COV</b>	<b>8%</b>	<b>10%</b>	<b>10%</b>

La Figure 5.8 présente les valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  en fonction du temps de cure et de la longueur d'ancrage pour les séries ARC-500-150-23 (A, B et C) et ARC-500-125-23-A. Globalement, tel que mentionné précédemment, les valeurs de  $N_u$  et  $N_{adh}$  sont maximales à 7 jours. Elles tendent à diminuer à 14 et 28 jours. Il faut à nouveau souligner que la grande variabilité rend plus difficile l'analyse des résultats.

A 7 jours, les valeurs de  $N_u$  et  $N_{adh}$  sont inférieures à la charge de plastification des barres (116 kN). La défaillance des ancrages est contrôlée par la perte d'adhérence avec le substrat. Les valeurs de  $N_{adh}$  à 7 jours sont comprises entre 62 kN et 82 kN. La plus faible valeur (62 kN) a été obtenue avec des ancrages à  $h_{ef} = 150 \text{ mm}$  ; cette valeur est plus faible que celle obtenue à  $h_{ef} = 125 \text{ mm}$ . Ce résultat surprenant découle nécessairement de la variabilité des essais. La moyenne de 62 kN résulte d'une seule valeur très faible (21 kN) qui abaisse fortement cette valeur moyenne. Les analyses visuelles des ancrages aux valeurs très faibles, n'ont pas montré des différences dans la qualité de l'adhérence, par rapport aux ancrages aux valeurs typiques.

En général, les résultats de la Figure 5.8 suggèrent que la valeur de  $N_{adh}$  est d'environ 80 kN, pour une  $h_{ef} = 150 \text{ mm}$ , et lorsque l'installation est bien exécutée. Cette valeur est similaire à celle estimée par l'adhésif AAC utilisé dans les mêmes conditions (température, acier et  $h_{ef}$ ).

La figure 5.8 montre que la valeur de  $\tau$  est comprise entre 8,0 et 8,4 MPa (7 jours). Après 7 jours, la valeur moyenne de  $\tau$  diminue ( $6 \text{ MPa} < \tau < 7,5 \text{ MPa}$  à 28 jours). L'origine de cette baisse ne peut pas être précisée pour le moment.

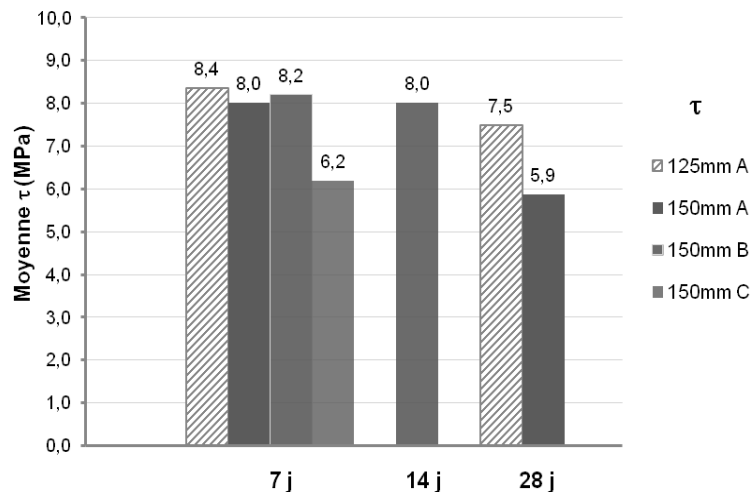
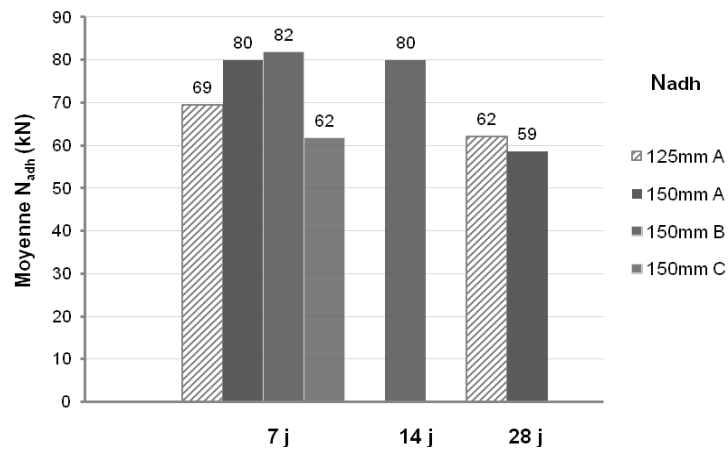
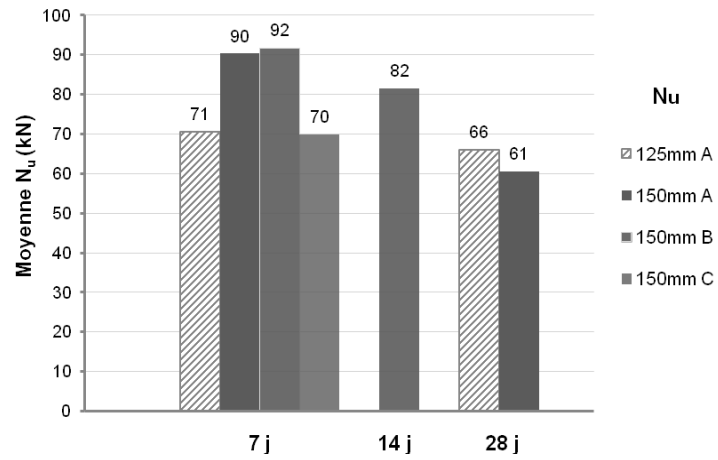


Figure 5.8 Essais statiques de traction. ARC - 500 W – 23°C  
Valeurs moyennes de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  selon le temps de cure.

## 5.4 Essais sous chargement soutenu

Six groupes d'ancrages ont été soumis aux essais de chargement soutenu. Parmi ces 6 groupes, 4 groupes ont été réalisés avec l'adhésif AAC et 2 groupes ont été réalisés avec l'adhésif ARC. Les Tableaux 5.10 et 5.11 présentent les caractéristiques des configurations testées (adhésif AAC), à savoir : type d'adhésif, longueur d'ancrage, température des essais.

Le Tableau 5.10 présente la charge  $N_{adh}$  moyenne utilisée pour calculer la charge soutenue de chacun des groupes d'essais. Cette charge a été mesurée sur un groupe d'ancrages installés en même temps que les ancrages soumis aux essais de chargement soutenu. C'est à partir de la charge  $N_{adh}$  indiquée au Tableau 5.10 qu'on a ensuite calculé les charges soutenues à utiliser (selon le pourcentage de  $N_{adh}$ , entre 55% et 80%). Les valeurs en caractères gras du Tableau 5.10 ont été ignorées lors du calcul des moyennes. Elles ont été jugées trop écartées pour être considérées représentatives de l'adhérence réelle des adhésifs.

Tableau 5.10 Moyennes des charges  $N_{adh}$  pour les chargements soutenus à appliquer aux ancrages.

Charges $N_{adh}$ (kN)						
Groupe	1	2	3	4	5	6
T. cure	28 jours	48 jours	28 jours	28 jours	14 jours	28 jours
Ancrage	AAC-400-150-23-A	AAC-400-125-23-B*	AAC-500-150-23-C	AAC-500-150-43-D	ARC-500-150-23-B	ARC-500-150-43-C
1	88,4	65,2	<b>28,8</b>	85,2	83,6	95,9
2	80,4	<b>14,1</b>	76,4	72,3	68,9	<b>118,6</b>
3	86,0	76,8	70,8	99,9	98,1	94,5
4	86,8	76,0	40,5	88,9	66,2	113,3
5	63,8	81,8	44,3	79,3	83,4	109,4
6	80,9	-	-	-	-	-
7	65,2	-	-	-	-	-
8	86,9	-	-	-	-	-
Moyenne	<b>80</b>	<b>75</b>	<b>58</b>	<b>85</b>	<b>80</b>	<b>103</b>

\* Résultats équivalents à la série AAC- 400-125-23-B à 28 jours (Tableau 5.4).

Le Tableau 5.11 présente le déplacement moyen ( $\Delta_{lim}$ ) correspondant à la perte d'adhérence des ancrages. Ce déplacement a été mesuré lors des essais d'arrachement utilisés pour déterminer les charges à la perte d'adhérence  $N_{adh}$  (Tableau 5.10). Les valeurs de  $\Delta_{lim}$  de

chaque groupe d'essai, seront utilisées pour vérifier la conformité du fluage selon les critères des normes ASTM E1512 et ACI 355.4. Les valeurs en gros indiquées au Tableau 5.11 n'ont pas été incluses dans le calcul des moyennes des déplacements. Ces valeurs ont été jugées trop écartées pour être considérées représentatives du déplacement moyen des ancrages.

Tableau 5.11 Moyennes des déplacements associés aux charges  $N_{adh}$  du Tableau 5.10.

<b>Déplacements (mm) à <math>N_{adh}</math></b>						
<b>Groupe</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>T. cure</b>	28 jours	48 jours	28 jours	28 jours	14 jours	28 jours
<b>Ancrage</b>	AAC-400-150-23-A	AAC-400-125-23-B	AAC-500-150-23-C	AAC-500-150-43-D	ARC-500-150-23-B	ARC-500-150-43-C
1	<b>1,348</b>	0,231	<b>0,056</b>	0,231	0,267	0,275
2	0,522	<b>0,042</b>	0,698	0,486	0,242	0,410
3	0,436	0,315	0,246	0,320	0,293	0,297
4	0,474	0,149	0,193	0,430	0,204	0,326
5	0,160	0,297	0,293	0,483	0,322	0,403
6	0,397	-	-	-	-	-
7	0,226	-	-	-	-	-
8	0,356	-	-	-	-	-
<b>Moyenne</b>	<b>0,367</b>	<b>0,248</b>	<b>0,358</b>	<b>0,390</b>	<b>0,266</b>	<b>0,340</b>

Le Tableau 5.12 présente un résumé des caractéristiques expérimentales des 6 groupes d'essais de chargement soutenu. Pour chaque groupe, on y indique la charge moyenne  $N_{adh}$ , ainsi que les niveaux de charges soutenues utilisés pour les essais. Selon les groupes, les charges soutenues ont été choisies parmi les valeurs suivantes : 80%, 70% et 60% (adhésif AAC) et 55% (adhésif ARC). Pour chaque configuration d'essai, le nombre d'ancrages testés est indiqué entre parenthèses.

#### 5.4.1 Adhésif AAC (23°C et 43°C)

L'adhésif AAC a été testé selon 4 configurations d'essais (groupes 1 à 4). Les trois premiers groupes ont été réalisés à 23°C et le quatrième à 43°C. Le groupe 1 comporte 9 ancrages avec l'acier 400W et  $h_{ef} = 150$  mm. Le groupe 2 comporte 9 ancrages avec l'acier 400W et  $h_{ef} = 125$  mm, et le groupe 3 comporte 9 ancrages avec l'acier 500W et  $h_{ef} = 150$  mm. Le groupe 4 comporte 5 ancrages avec l'acier 500W et  $h_{ef} = 150$  mm (chargés à une température de 43°C).

La Figure 5.9 présente l'évolution des déplacements à long terme des barres du groupe 1 (AAC-400-150-23-A). Les ancrages 8, 9 et 10 ont été soumis à une charge soutenue de 60%  $N_{adh}$ . On remarque que le déplacement initial des 3 ancrages est compris entre 0,1 et 0,17 mm. Il évolue ensuite très faiblement ( $\pm 0,01$  mm) durant les 1000 heures de chargement.

Tableau 5.12 Groupes et charges appliquées par spécimen d'ancrage.  
Essais de chargement soutenu

Groupes	Valeurs et % de $N_{adh}$ appliqués (kN)				
	$N_{adh}$	80% $N_{adh}$	70% $N_{adh}$	60% $N_{adh}$	55% $N_{adh}$
1 AAC-400-150-23-A	80	64 (3 ancrages)	56 (3 ancrages)	48 (3 ancrages)	-
2 AAC-400-125-23-B	75	60 (4 ancrages)	52 (5 ancrages)	-	-
3 AAC-500-150-23-C	58	46 (5 ancrages)	41 (4 ancrages)	-	-
4 AAC-500-150-43-D	85	-	-	-	47 (5 ancrages)
5 ARC-500-150-23-B	80	64 (3 ancrages)	56 (3 ancrages)	48 (3 ancrages)	-
6 ARC-500-150-43-C	103	-	-	-	55 (4 ancrages)

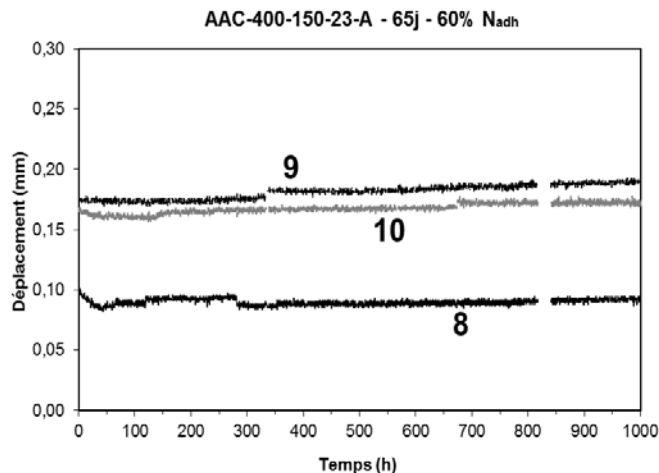


Figure 5.9 Graphiques de chargement soutenu Groupe 1. AAC-400-150-23-A.

Les ancrages 5, 6 et 7 ont été soumis à une charge de 70%  $N_{adh}$ . Le déplacement initial (élastique) des ancrages 5 et 7 est compris entre 0,22 et 0,23 mm. Durant les 1000 heures de l'essai, il augmente lentement et régulièrement d'environ 0,02 mm. L'ancrage 6 montre un fluage très important d'environ 1 mm après 1000 heures de chargement. Cet ancrage présente

probablement un défaut de mise en place. La charge  $N_{adh}$  de cet ancrage est probablement inférieure à la charge moyenne mesurée pour le groupe 1 (80 kN). Par conséquent, la charge soutenue de 56 kN correspond vraisemblablement à bien plus que 70% de la  $N_{adh}$  réelle de cet ancrage. C'est la raison probable qui peut expliquer ce fluage plus important.

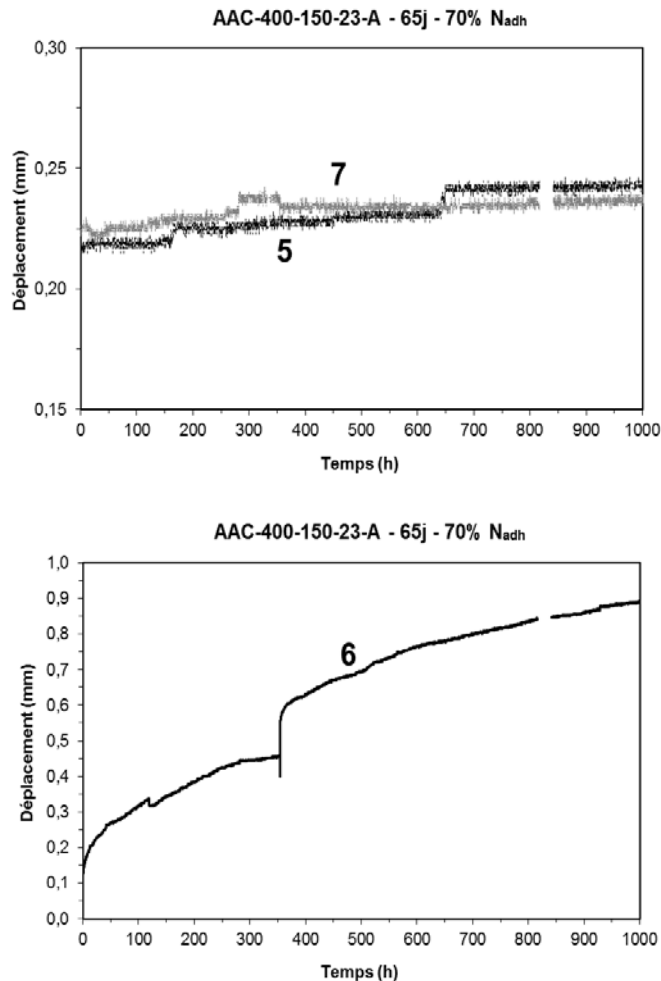


Figure 5.9 (suite) Graphiques de chargement soutenu Groupe 1. AAC-400-150-23-A.

Les ancrages 1 et 4 ont été chargés à 80%  $N_{adh}$ . Leur déplacement initial (élastique) est plus important et il est compris entre 0,4 et 0,5 mm. Durant les 1000 heures des essais, le déplacement de fluage augmente constamment pour terminer avec environ 0,05 mm d'augmentation à la fin des essais. Finalement, l'ancrage 2 a lui aussi été chargé à 80%  $N_{adh}$ . Il a subi un très grand déplacement initial lors du chargement ( $> 3$  mm). Il a malgré tout été en mesure de supporter la charge de 64 kN. Durant l'essai, le déplacement de fluage a été important, atteignant 0,25 mm après 1000 heures d'essai.

Comme dans le cas de l'ancrage 6, l'ancrage 2 présente probablement un défaut d'installation qui a eu pour effet de diminuer la charge  $N_{adh}$  de cet ancrage en particulier. La charge soutenue de 64 kN correspond probablement à plus de 80% de la  $N_{adh}$  réelle de cet ancrage.

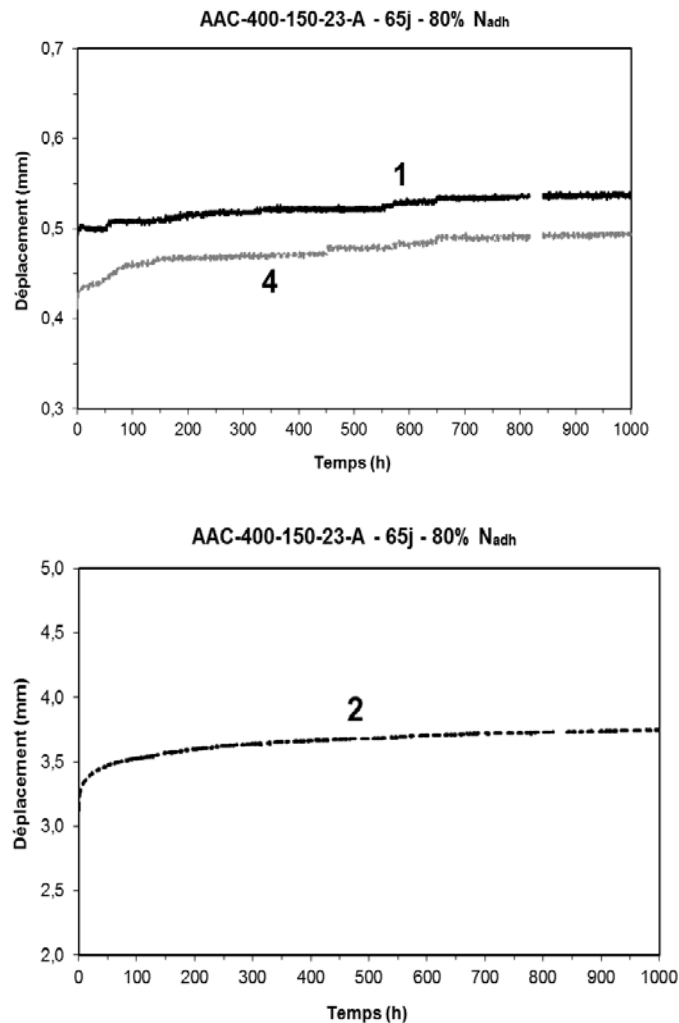


Figure 5.9 (suite) Graphiques de chargement soutenu Groupe 1. AAC-400-150-23-A.

Globalement, cette série de résultats (groupe 1) montre qu'aucun des ancrages testés ne s'est rompu sous un chargement soutenu de 80%, 70% et 60% de  $N_{adh}$  après 1000 heures de chargement. A la fin des essais, le fluage est plus important à mesure qu'augmente la charge soutenue appliquée. Parmi les 9 ancrages testés, 2 ancrages ont subi un fluage plus important (ancrages 2 et 6); ils ne se sont cependant pas rompus totalement, puisqu'ils ont toujours été en mesure de supporter la charge appliquée. Le fluage de ces 2 ancrages découle probablement de la variabilité du matériau de l'adhésif AAC ou d'un défaut local d'installation.

La Figure 5.10 présente l'évolution, en fonction du temps, des déplacements des ancrages du groupe 2 (AAC-400-125-23-B). Cette série d'essais est similaire à la précédente, sauf que la longueur  $h_{ef} = 125$  mm. Les ancrages 1 à 5 ont été chargés à 70%  $N_{adh}$ . Les ancrages 1 et 2 ont subi un très grand déplacement (3,8 mm et 4,5 mm respectivement) avant l'atteinte de la charge soutenue prévue (41 kN); on a décidé de les décharger complètement. Les ancrages 3, 4 et 5 ont pu être chargés avec la charge prévue. Les déplacements initiaux élastiques sont compris entre 0,15 et 0,26 mm. Les ancrages 3 et 5 maintiennent un faible déplacement de fluage à 1000 heures ( $< 0,02$  mm). L'ancrage 4 a subi un fluage d'environ 0,05 mm après 1000 heures d'essai.

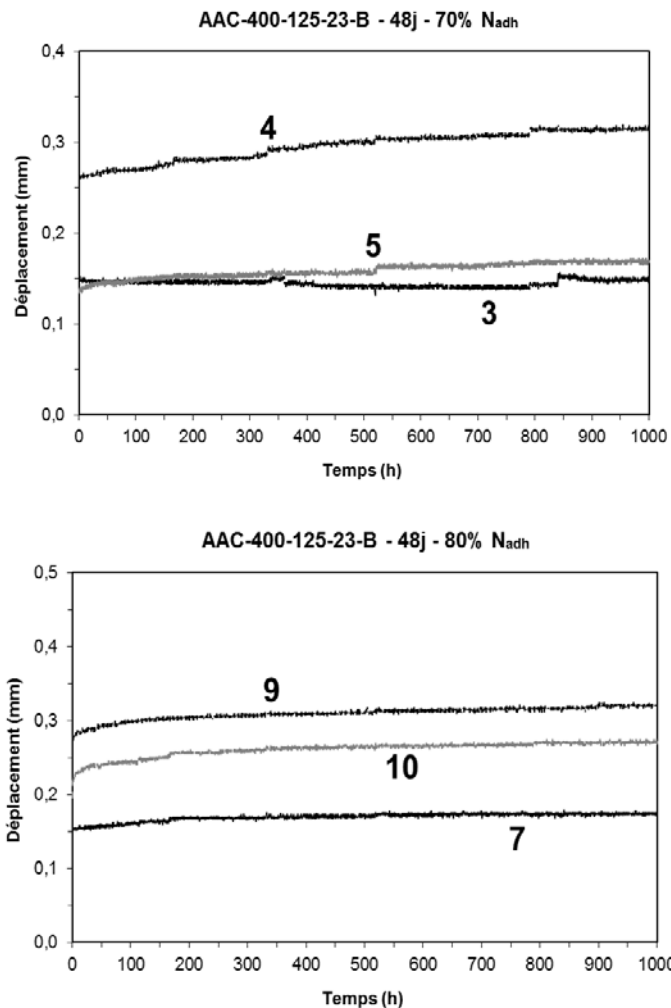


Figure 5.10 Graphiques de chargement soutenu Groupe 2. AAC-400-125-23-B.

Les ancrages 7 à 10 ont été chargés à 80%  $N_{adh}$ . Les ancrages 7, 9 et 10 maintiennent un déplacement initial compris entre 0,15 et 0,30 mm. Durant les 1000 heures de chargement le



déplacement de fluage est d'environ 0,03 mm. L'ancrage 8 montre un comportement particulier. D'abord, le déplacement initial est très important (1,25 mm). Puis, le déplacement de fluage progresse relativement rapidement et régulièrement jusqu'à 1000 heures. Ce fluage résulte probablement de la variabilité de l'adhésif AAC ou d'un défaut local d'installation.

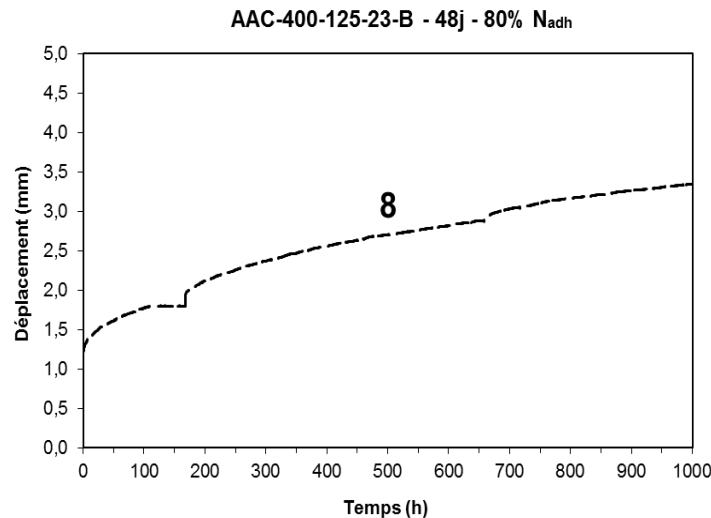


Figure 5.10 (suite) Graphiques de chargement soutenu Groupe 2. AAC-400-125-23-B.

Globalement, il faut remarquer que pour 7 des 9 ancrages testés (70%  $N_{adh}$  et 80%  $N_{adh}$ ), aucun d'entre eux ne s'est brisé sous la charge soutenue pendant 1000 heures. Même pour une longueur plus faible de 125 mm, les ancrages bien installés sont en mesure de résister à la rupture pendant 1000 heures d'essai.

La Figure 5.11 présente l'évolution, en fonction du temps, des déplacements des ancrages du groupe 3 (AAC-500-150-23-C). Cette série comporte 9 ancrages avec l'acier 500W et  $h_{ef} = 150$  mm. Il faut rappeler que, selon les résultats présentés au Tableau 5.10, cette série montre une grande variabilité. La charge moyenne  $N_{adh}$  est relativement faible (58 kN), notamment en raison de deux résultats faibles de 40,5 kN et 44,3 kN. Cette variabilité découle probablement de la variabilité de l'adhésif utilisé pour cette série, ou des défauts locaux d'installation.

A 70%  $N_{adh}$ , l'ancrage 5 a montré un déplacement de fluage important (1,2 mm), tandis qu'à 80%  $N_{adh}$ , l'ancrage 7 a subi un très grand déplacement initial lors du chargement (> 5 mm), mais il a été en mesure de supporter toute la charge appliquée (46 kN). Quant aux ancrages 1 et 10 (80%  $N_{adh}$ ), le déplacement de fluage est significatif : 1 mm et 2,5 mm respectivement.

Globalement, tous les ancrages testés au groupe 3 ont pu résister le chargement soutenu de 80%  $N_{adh}$  et 70% de  $N_{adh}$  après 1000 heures de chargement.

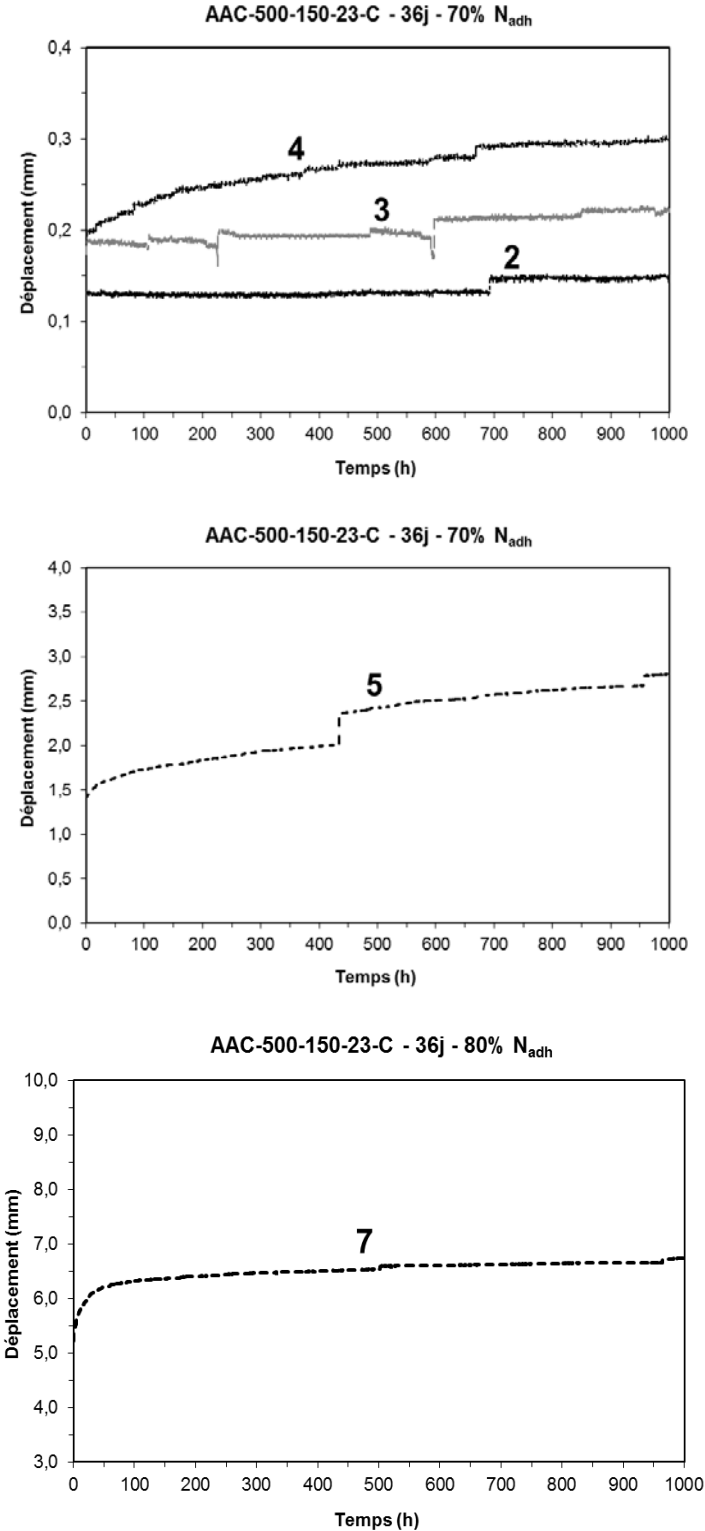


Figure 5.11 Graphiques de chargement soutenu Groupe 3. AAC-500-150-23-C.

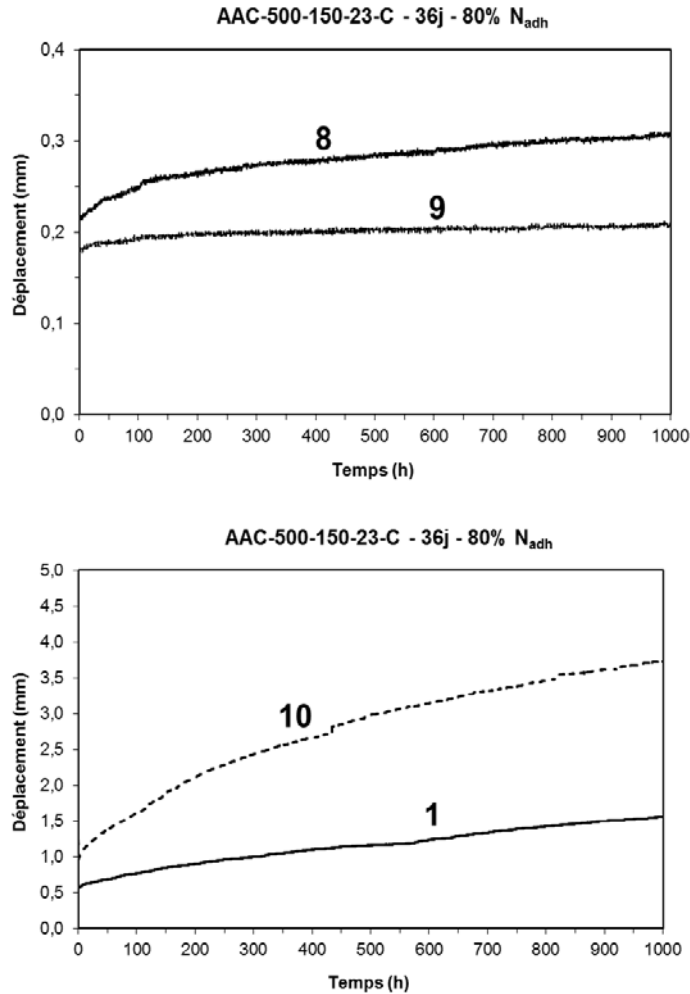


Figure 5.11 (suite) Graphiques de chargement soutenu Groupe 3. AAC-500-150-23-C.

La Figure 5.12 présente l'évolution des déplacements à long terme des barres du groupe 4 (AAC-500-150-43-D). Tous les ancrages ont été chargés à 55%  $N_{adh}$ . Les déplacements initiaux élastiques sont compris entre 0,05 mm et 0,2 mm. Les ancrages 1, 5 et 10 montrent une évolution très faible des déplacements ( $< 0,05$  mm) durant les 1000 heures de chargement, comparable à celle des ancrages du groupe 1 à 60%  $N_{adh}$ . Pour les ancrages 3 et 8, le déplacement de fluage augmente de façon soutenue, en atteignant 0,17 mm et 0,08 mm respectivement. Ces valeurs sont supérieures à celles des ancrages du groupe 1 à 80%  $N_{adh}$  (Figure 5.9) et du groupe 3 à 70%  $N_{adh}$  (Figure 5.11), ce qui montre de façon évidente l'influence de la température élevée des essais sur la performance des ancrages avec l'adhésif AAC, pour une longueur d'ancrage spécifique (150 mm).

Il faut remarquer qu'aucun des 5 ancrages testés ne s'est rompu lors de la période de 1000 heures des essais.

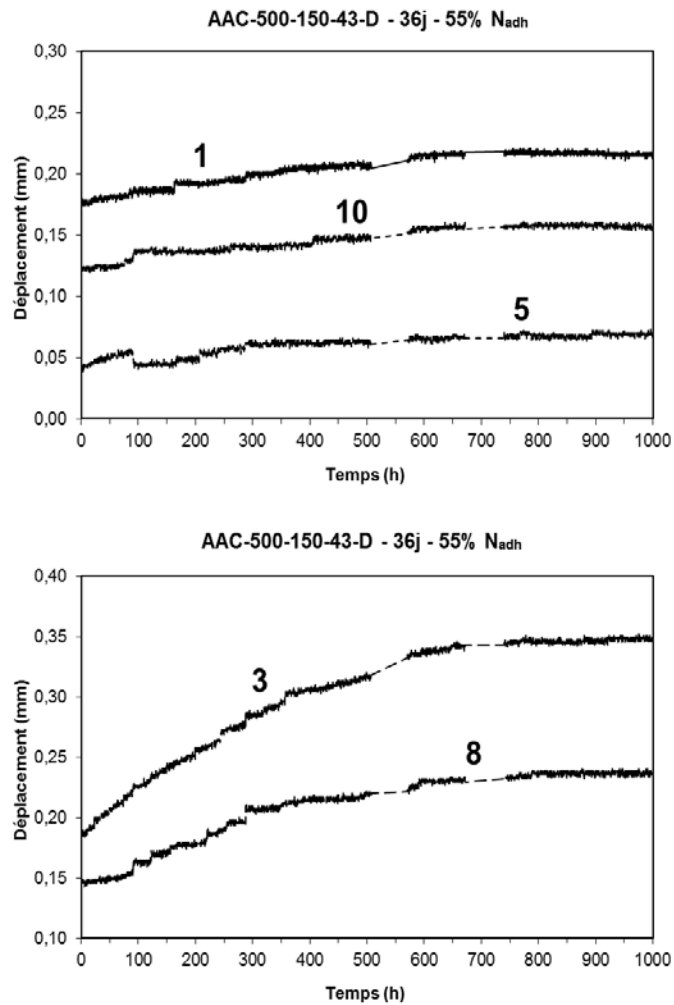


Figure 5.12 Graphiques de chargement soutenu Groupe 4. AAC-500-150-43-D

#### 5.4.2 Adhésif ARC (23°C et 43°C)

L'adhésif ARC a été testé selon 2 configurations d'essais. Le groupe 5 a été réalisé à 23°C et le groupe 6 à 43°C. Le groupe 5 comporte 9 ancrages avec l'acier 500W et  $h_{ef} = 150$  mm. Le groupe 6 comporte 4 ancrages avec l'acier 500W et  $h_{ef} = 150$  mm. Aucun des ancrages testés avec l'ARC (23°C et 43°C) ne s'est rompu lors du chargement, ni lors de la période de 1000 heures d'essai.

La Figure 5.13 présente l'évolution des déplacements à long terme des barres du groupe 5 (ARC-500-150-23-B). Les ancrages 1, 3 et 5 ont été soumis à une charge soutenue de 60%  $N_{adh}$ . On remarque que le déplacement initial des 3 ancrages est compris entre 0,1 et 0,14 mm. Il évolue ensuite très faiblement ( $\pm 0,02$  mm) durant les 1000 heures de chargement.

Les ancrages 2, 4 et 7 ont été soumis à une charge de 70%  $N_{adh}$ . Le déplacement initial (élastique) des ancrages est compris entre 0,13 et 0,17 mm. Durant les 1000 heures de l'essai, il augmente de façon très faible, d'environ 0,02 mm.

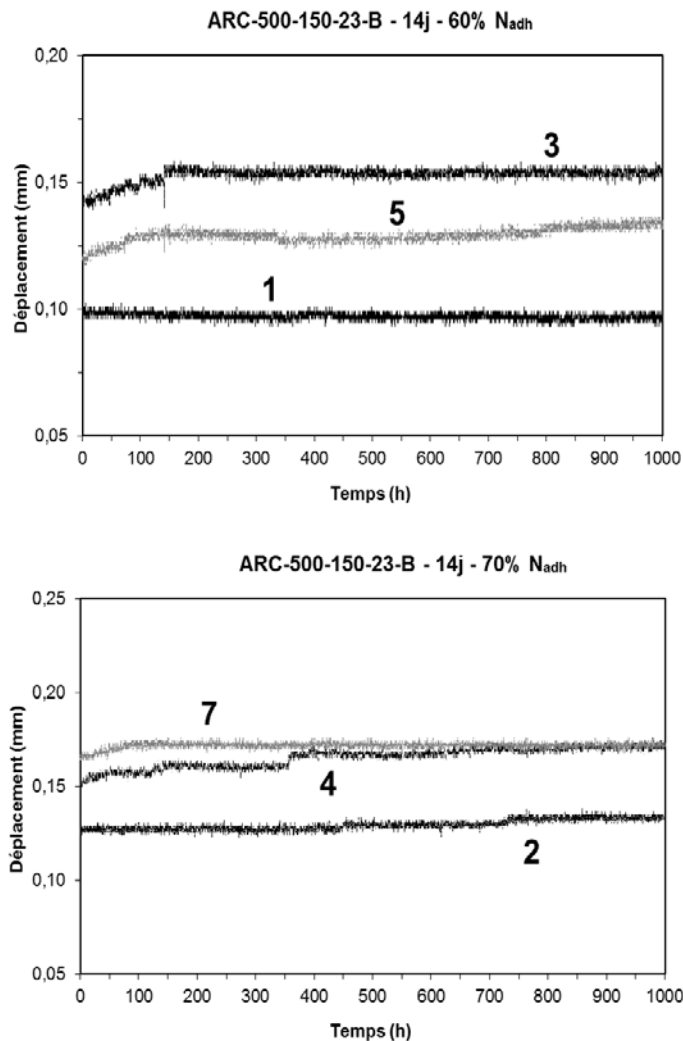


Figure 5.13 Graphiques de chargement soutenu Groupe 5. ARC-500-150-23-B.

Les ancrages 8, 9 et 10 ont été chargés à 80%  $N_{adh}$ . Leur déplacement initial (élastique) est légèrement supérieur aux autres ancrages; il est compris entre 0,15 et 0,23 mm. Durant les

1000 heures des essais, le déplacement de fluage augmente constamment pour terminer avec environ 0,05 mm d'augmentation à la fin des essais.

En général, on vérifie que les ancrages avec l'adhésif ARC (23°C) présentent des déplacements initiaux inférieurs à ceux observés dans les ancrages avec l'adhésif AAC, pour  $h_{ef} = 150$  mm (Figures 5.9 et 5.11), mais les déplacements de fluage sont équivalents entre les deux adhésifs, selon les pourcentages de  $N_{adh}$  appliqués.

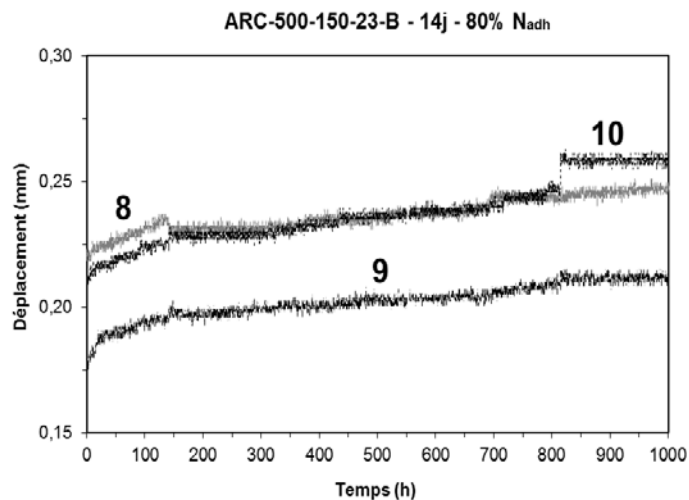


Figure 5.13 (suite) Graphiques de chargement soutenu Groupe 5. ARC-500-150-23-B.

La Figure 5.14 présente l'évolution des déplacements à long terme des barres du groupe 6 (ARC-500-150-43-C). Les 4 ancrages ont été chargés à 55%  $N_{adh}$ . Les ancrages 2 et 9 présentent des déplacements initiaux élastiques compris entre 0,22 mm et 0,24 mm, tandis que les valeurs correspondantes aux ancrages 4 et 7 sont comprises entre 0,08 et 0,1 mm. Durant les 1000 heures de l'essai, le déplacement de fluage des 4 ancrages augmente lentement et régulièrement, en atteignant 0,1 mm à la fin des essais. Cette valeur est deux fois supérieure au déplacement de fluage des ancrages du groupe 5 à 80%  $N_{adh}$  (Figure 5.13), ce qui montre clairement la grande influence de la température élevée des essais sur le fluage des ancrages avec l'adhésif ARC.

Si l'on compare les déplacements de tous les ancrages testés à 43°C, on remarque que les déplacements initiaux élastiques sont équivalents entre les ancrages à l'AAC et l'ARC, mais

les déplacements de fluage des ancrages à l'ARC sont entre deux et trois fois supérieures à ceux des ancrages à l'AAC (en excluant l'ancrage 3 à l'AAC).

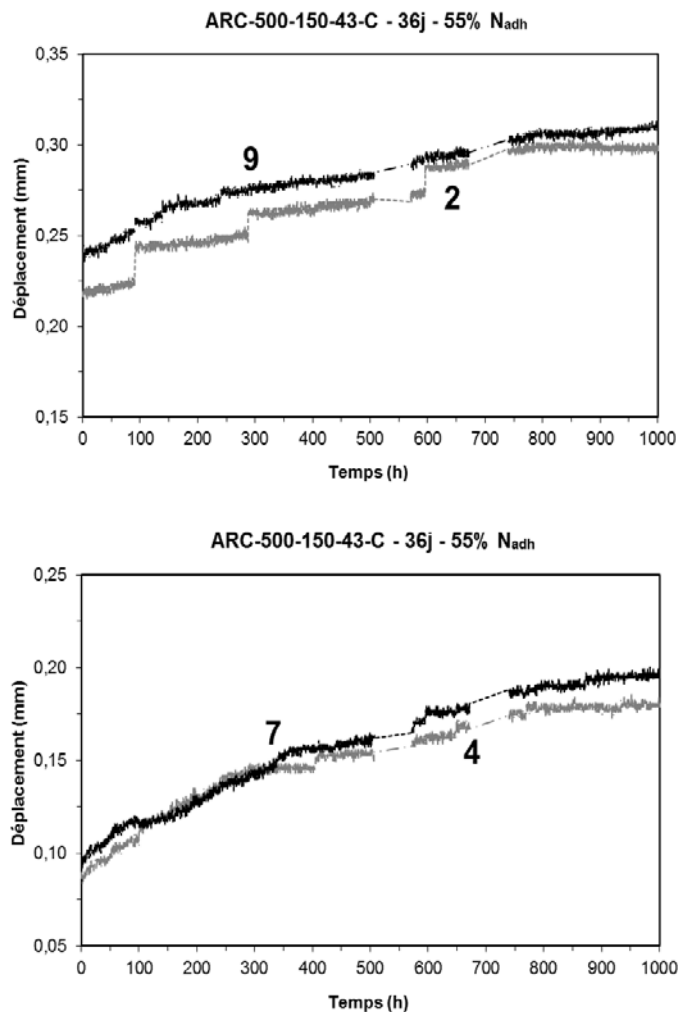


Figure 5.14 Graphiques de chargement soutenu Groupe 6. ARC-500-150-43-C.

## 5.5 Essais statiques de traction *post-creep*

Les graphiques des essais *post-creep* sont présentés à l'Annexe A. Les charges à la perte d'adhérence ( $N_{adh}(80\%, 70\%, 60\%, 55\%)$ ) des essais *post-creep* sont systématiquement plus faibles que celles mesurées juste avant le début des essais de chargement soutenu ( $N_{adh}$ ). Cela suggère que ces essais produisent un endommagement de l'adhésif.

Il est surprenant de constater que plus la charge soutenue est faible, plus la charge  $N_{adh}$  *post-creep* est faible (Figure 5.15). Cela indique qu'une charge soutenue plus faible endommage

plus l'adhésif qu'une charge soutenue plus élevée. Cela semble contraire à la logique, mais les résultats expérimentaux confirment bien cette tendance. Pour un groupe d'ancrage donné, les charges *post-creep* sont plus grandes lorsque la charge soutenue appliquée est plus élevée. Dans les groupes d'ancrage à 23°C, les rapports moyens sont :  $N_{adh(80\%)/N_{adh}} = 90\%$ ,  $N_{adh(70\%)/N_{adh}} = 81\%$ , et  $N_{adh(60\%)/N_{adh}} = 81\%$  (Tableau 5.13)

Tableau 5.13 Résultats des essais statiques *post-creep*

Groupes	Valeurs $N_{adh}$ (kN)					Rapports $N_{adh}(\%)/N_{adh}$			
	$N_{adh}$	$N_{adh}$ (80%)	$N_{adh}$ (70%)	$N_{adh}$ (60%)	$N_{adh}$ (55%)	80%	70%	60%	55%
1 AAC-400-150-23-A	80	70	62	61	-	0,87	0,78	0,77	-
2 AAC-400-125-23-B	75	71	62	-	-	0,95	0,83	-	-
3 AAC-500-150-23-C	58	46	43	-	-	0,80	0,75	-	-
4 AAC-500-150-43-D	85	-	-	-	47	-	-	-	1,06
5 ARC-500-150-23-B	80	77	71	68	-	0,96	0,89	0,86	-
6 ARC-500-150-43-C	103	-	-	-	55	-	-	-	0,89
<b>Moyennes <math>N_{adh}(\%)/N_{adh}</math></b>						<b>0,90</b>	<b>0,81</b>	<b>0,81</b>	<b>0,98</b>

Ce phénomène est difficile à expliquer, mais il pourrait décaler d'un mécanisme d'écroutissage de l'adhésif. Lors du chargement soutenu sous une charge élevée (80%  $N_{adh}$ ), l'adhésif pourrait se microfissurer. Cette microfissuration pourrait favoriser un mécanisme d'expansion et de blocage mécanique. L'ancrage endommagé pourrait devenir plus rigide et plus résistant, en raison du développement d'un mécanisme physique d'interaction avec le substrat (*interlock*). On n'a pas de référence bibliographique pour appuyer cette hypothèse. Jusqu'à date, on n'a pas trouvé des résultats publiés sur le comportement au fluage des ancrages cimentaires testés selon la procédure utilisée dans ce rapport, pour comparer leur comportement sous chargement soutenu, et dans des essais *post-creep*.

Pour les groupes d'ancrage à 43°C, le rapport moyen est :  $N_{adh(55\%)/N_{adh}} = 98\%$  (Tableau 5.13). Dans le cas du groupe 4 (AAC-500-150-43-D), la tendance observée semble être contraire à celle vérifiée à 23°C. (Figure 5.16). En fait, pour un pourcentage de chargement



soutenu encore moins élevé que ceux utilisés à 23°C, en l'occurrence 55%  $N_{adh}$ , les charges  $N_{adh}$  résiduelles sont les plus élevées, parmi tous les groupes testés à l'AAC : On a obtenu un rapport  $N_{adh(55\%)/N_{adh}} = 106\%$ ; cela veut dire que la valeur de  $N_{adh}$  moyenne résiduelle est plus grande que celle obtenue avant les essais de chargement soutenu. Il se peut que la température élevée ait eu un effet de durcissement du matériau AAC à long terme. Une autre hypothèse peut être que les 5 ancrages testés à 43°C sous chargement soutenu aient été (dès le moment de l'installation) plus performants que ceux servant au calcul de  $N_{adh}$  pré-creep.

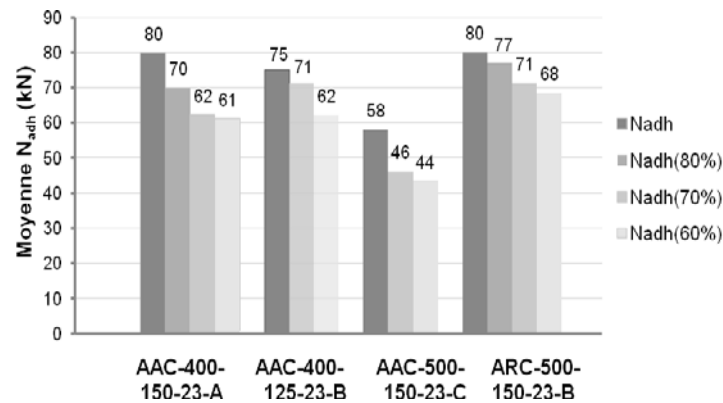


Figure 5.15 Essais statiques *post-creep* à 23°C. Valeurs moyennes de  $N_{adh}$ ,  $N_{adh(80\%)}$ ,  $N_{adh(70\%)}$  et  $N_{adh(60\%)}$ .

Quant au groupe 6 (ARC-500-150-43-C) et le rapport  $N_{adh(55\%)/N_{adh}} = 89\%$ , il a montré une performance semblable à celle du groupe 5 (ARC) à 60%  $N_{adh}$  et 23°C : Ceci indique que la température élevée n'a pas eu un effet remarquable dans les charges  $N_{adh}$  résiduelles. Néanmoins, ces résultats sont préliminaires, et d'autres séries à 43°C et à divers niveaux de  $N_{adh}$  devraient être testées pour préciser les différences de comportement par rapport à 23°C.

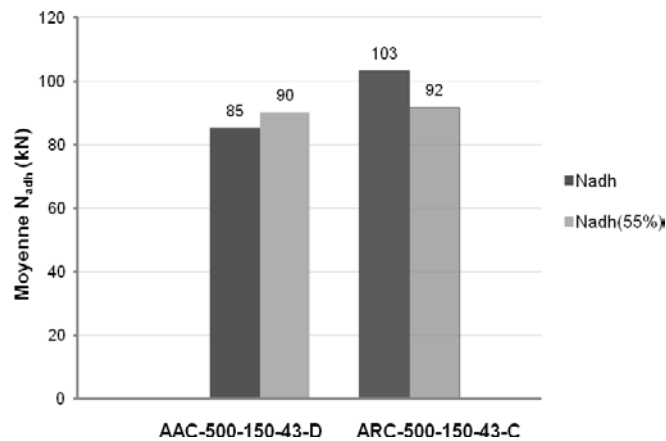


Figure 5.16 Essais statiques *post-creep* à 43°C. Valeurs moyennes de  $N_{adh}$  et  $N_{adh(55\%)}$ .

## 5.6 Essais d'arrachement chez AMBEX – Adhésif AAC – 500W

Au cours du mois de mai 2013, on a fait des essais d'arrachement chez la compagnie AMBEX. Les ancrages testés ont été installés avec l'adhésif AAC (acier 500W,  $h_{ef} = 150$  mm, 23°C), au début de l'année 2013. Chaque série de 5 ancrages présentait l'une des 8 configurations d'installation suivantes:

- X : Aucune préparation des trous. Longueurs d'ancrage  $h_{ef}$  entre 80 et 150 mm.
- L : Remplissage des trous avec de l'eau après le forage, sans élimination des poussières ni enlèvement de l'eau résiduelle (condition lavée).
- LE : Remplissage des trous avec de l'eau après le forage, sans élimination des poussières, et en enlevant l'eau résiduelle (condition lavée-eau enlevée).
- I : Installation des ancrages dans les trous remplis d'eau (condition immergée).
- S : Élimination des poussières des trous après le forage (condition soufflée).
- SLSS3 : Élimination des poussières, lavage des trous, enlèvement de l'eau, élimination des poussières, en atteignant une surface SSS (condition soufflée-lavée-soufflée-SSS).
- SLSLS3 : Élimination des poussières, lavage des trous, enlèvement de l'eau, élimination des poussières, relavage des trous et enlèvement de l'eau, pour avoir une surface SSS (condition soufflée-lavée-soufflée-lavée-SSS).
- SLE : Élimination des poussières, lavage des trous et enlèvement de l'eau résiduelle (condition soufflé-lavé-eau enlevée).

Le Tableau 5.14 présente les résultats obtenus lors des essais. Les valeurs représentatives des moyennes des séries de la section 5.3.1, Tableau 5.5 et Figure 5.6 (séries AAC-500-150-23), soit  $N_u = 90$  kN,  $N_{adh} = 70$  kN, et  $\tau = 7$  MPa, sont utilisées comme valeurs de référence pour effectuer une comparaison avec les résultats du Tableau 5.14. On remarque d'abord que la variation des valeurs moyennes est très importante, dépendant des configurations d'installation testées. Ainsi,  $N_u$  varie de 37 kN à 105 kN,  $N_{adh}$  est comprise entre 24 et 82 kN et  $\tau$  est comprise entre 2,4 et 8,2 MPa.

Condition X : Le fait d'installer les barres immédiatement après le forage, sans préparer les trous (section 4.3.2), provoque une réduction des valeurs moyennes de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  de 60% environ. Cela résulte du fait que les poussières du forage empêchent grandement l'adhérence entre l'adhésif et le substrat. De plus, les poussières s'accumulent au fond du trou, et cela empêche l'enfoncement de la barre d'ancrage jusqu'à la longueur  $h_{ef}$  souhaitée.

Conditions L, LE et S: Le lavage sommaire des trous (L et LE), ainsi que l'élimination des poussières (S), permettent d'atteindre des charges moyennes  $N_u$  proches de celles de référence, mais les valeurs de  $N_{adh}$  et  $\tau$  restent 15% inférieures. Bien qu'une partie des poussières ait été éliminée en enlevant l'eau des trous, celles-ci restent encore collées aux parois du trou, ce qui contribue à diminuer les valeurs de  $N_{adh}$  et  $\tau$ .

Tableau 5.14 Ancrages avec l'adhésif AAC. Valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$ . Acier 500 W, 23°C

Essais statiques de traction – AAC-500W-23°C								
Installation	X	L	LE	S	I	SLSS3	SLSLS3	SLE
<b>Ancrage</b>		<b>Charges <math>N_u</math> (kN)</b>						
1	30,1	66,0	109,2	44,3	63,1	109,3	108,4	96,8
2	29,2	58,3	111,6	63,0	108,2	98,7	86,8	94,2
3	47,5	114,3	85,0	99,6	112,4	39,1	97,0	111,7
4	42,1	67,6	87,4	93,1	120,0	81,6	110,9	104,5
5	70,5	114,2	89,2	87,2	-	87,2	120,9	111,1
<b>Moyennes</b>	<b>44</b>	<b>84</b>	<b>97</b>	<b>77</b>	<b>101</b>	<b>83</b>	<b>105</b>	<b>104</b>
<b>COV</b>	38%	33%	13%	30%	27%	32%	13%	8%
<b>Ancrage</b>		<b>Charges <math>N_{adh}</math> (kN)</b>						
1	21,3	63,1	51,9	25,9	62,9	78,2	70,7	80,9
2	20,3	52,3	58,1	54,7	62,7	86,5	73,1	84,5
3	29,3	70,8	64,2	82,4	77,4	38,4	71,5	78,4
4	24,9	43,0	55,4	70,1	72,9	54,7	97,1	90,9
5	54,4	51,0	53,3	64,5	-	60,1	76,1	74,3
<b>Moyennes</b>	<b>30</b>	<b>56</b>	<b>57</b>	<b>60</b>	<b>69</b>	<b>64</b>	<b>78</b>	<b>82</b>
<b>COV</b>	47%	19%	9%	36%	11%	30%	14%	8%
<b>Ancrage</b>		<b>Contrainte d'adhérence <math>\tau</math> (MPa)</b>						
1	2,1	6,3	5,2	2,6	6,3	7,8	7,1	8,1
2	2,0	5,2	5,8	5,5	6,3	8,7	7,3	8,5
3	2,9	7,1	6,4	8,3	7,8	3,8	7,2	7,9
4	2,5	4,3	5,6	7,0	7,3	5,5	9,7	9,1
5	5,5	5,1	5,3	6,5	-	6,0	7,6	7,5
<b>Moyennes</b>	<b>3,0</b>	<b>5,6</b>	<b>5,7</b>	<b>6,0</b>	<b>6,9</b>	<b>6,4</b>	<b>7,8</b>	<b>8,2</b>
<b>COV</b>	47%	19%	9%	36%	12%	30%	14%	8%

Condition I: Lorsqu'on a installé des ancrages dans des trous remplis d'eau (après avoir éliminé les poussières et lavé les trous), les moyennes sont comparables aux valeurs de référence. Ces résultats montrent qu'une installation immergée permet de développer une performance mécanique pratiquement équivalente à celle de la condition de référence.

Conditions SLSS3, SLSLS3 et SLE : Le fait d'éliminer les poussières et de laver les trous d'ancrage, permet d'atteindre des valeurs moyennes de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  semblables aux valeurs de référence. En respectant minutieusement la procédure d'installation *MPII* (section 4.3.2), les valeurs obtenues augmentent graduellement, en se rapprochant des valeurs de référence :  $N_u$  de 90 kN à 105 kN,  $N_{adh}$  de 66 kN à 80 kN et  $\tau$  de 7 MPa à 8 MPa.

La Figure 5.17 présente les résultats selon les valeurs croissantes de  $N_{adh}$ . On remarque que la série pour laquelle on n'a pas du tout préparé les trous (X), ainsi que les séries pour lesquelles on a juste lavé les trous (L, LE), donnent les valeurs moyennes de  $N_{adh}$  les plus basses. Les séries pour lesquelles on a éliminé les poussières et lavé les trous, puis enlevé l'eau résiduelle (SLSLS3, SLE), montrent des valeurs moyennes plus élevées, qui sont comparables aux valeurs de référence.

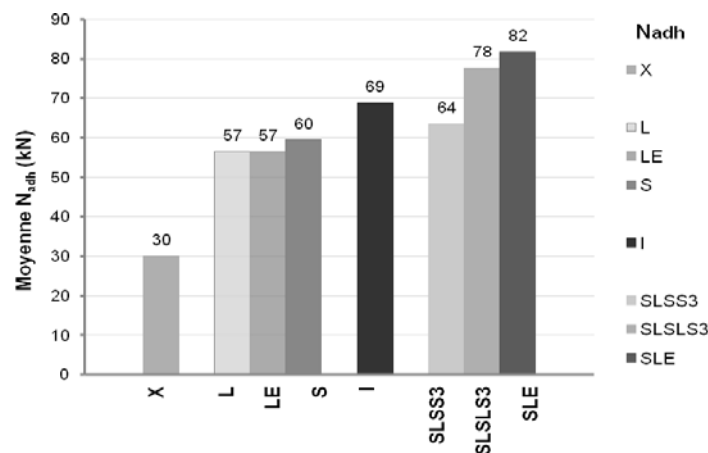


Figure 5.17 Essais statiques de traction (installation à 23°C). Valeurs moyennes de  $N_{adh}$ .

Ces résultats sont préliminaires. Il est important d'effectuer des séries d'essais équivalentes, en reproduisant les configurations d'installation présentées ici, afin de confirmer les tendances observées, et d'établir de façon plus précise les variations de performance des ancrages installés avec les adhésifs cimentaires AAC et ARC.

## 6. DISCUSSION ET ANALYSE

### 6.1 Influence de la longueur d'ancrage

Dans ce projet, on a utilisé des longueurs d'ancrage inférieures à 200 mm, parce qu'on savait déjà que pour les ancrages installés à  $h_{ef} = 200$  mm, on plastifiait les barres d'acier. Pour éviter que la défaillance de l'ancrage soit contrôlée par l'acier des barres, on a choisi de tester les ancrages avec  $h_{ef} = 100$  mm, 125 mm et 150 mm. En fait, pour  $h_{ef} \leq 150$  mm, la défaillance des ancrages se produit par une perte d'adhérence entre le substrat et l'adhésif.

Les résultats obtenus avec les essais d'arrachement montrent que plus la longueur  $h_{ef}$  est faible, plus les valeurs de  $N_u$  et  $N_{adh}$  sont faibles. De plus, plus la longueur  $h_{ef}$  est faible, plus la variabilité des résultats augmente (séries de 5 spécimens). Dans le cas de l'adhésif AAC (acier 400 W), la variabilité des charges  $N_{adh}$  est très élevée pour  $h_{ef} = 100$  mm (COV = 54%), elle diminue pour  $h_{ef} = 125$  mm (COV = 19%) et elle est plus faible à  $h_{ef} = 150$  mm (COV = 12%). C'est pour cette raison qu'on n'a fait qu'une seule série avec  $h_{ef} = 100$  mm (adhésif AAC, acier 400 W) dans le cas des essais d'arrachement. Quant à l'adhésif ARC et les charges  $N_{adh}$ , la tendance est semblable (COV = 46% avec  $h_{ef} = 125$  mm, COV = 26% avec  $h_{ef} = 150$  mm).

### 6.2 Influence de la nuance de l'acier

D'après les résultats des essais d'arrachement, le choix de la nuance d'acier doit se faire en fonction de la longueur d'ancrage. Une nuance de 400 MPa peut convenir pour des  $h_{ef} = 100$  mm et 125 mm. Cependant, pour une  $h_{ef} = 150$  mm, la plastification de l'acier de 400 MPa survient à peu près simultanément avec la perte d'adhérence ( $F_y = 81$  kN,  $N_{adh} = 80$  kN). Par conséquent, il est préférable d'utiliser un acier de 500 MPa pour les essais sur barres à  $h_{ef} \geq 150$  mm.

En général, les valeurs de  $N_{adh}$  avec l'acier de 400 MPa sont plus élevées que celles avec l'acier de 500 MPa. L'écart entre les valeurs de  $N_{adh}$  selon la nuance de l'acier, est de 26% pour les deux longueurs d'ancrage testées. Il y a eu des défauts locaux d'installation dans le cas de certains ancrages avec l'acier 500 MPa qui pourraient expliquer en partie cet écart, mais aussi il pourrait résulter de l'influence du module d'élasticité de l'acier sur les contraintes et

les déformations dans les barres et dans le matériau adhésif. Pour pouvoir fournir une explication plus précise, il faudrait faire une étude par éléments finis de la défaillance des ancrages, en étudiant notamment l'influence du module d'élasticité sur le champ de contraintes et de déformations le long de l'ancrage.

## 6.3 Influence du type d'adhésif : AAC vs ARC

### 6.3.1 Valeur de la contrainte $\tau$

Dans les séries testées avec l'adhésif AAC, les valeurs de  $\tau$  sont comprises entre 7,0 MPa (acier 500W) et 8,0 MPa (acier 400W) à 28 jours de cure. Pour les séries où l'on a décelé des problèmes d'installation (AAC-400-100-23-A et AAC-400-125-23-A), les valeurs de  $\tau$  descendent jusqu'à 5,6 MPa, ce qui montre encore une fois que l'installation des ancrages a une influence majeure dans l'obtention de valeurs représentatives de la performance réelle des adhésifs d'ancrage.

Quant aux séries testées avec l'adhésif ARC (acier 500W), la valeur de  $\tau$  est de 8,0 MPa (7 jours de cure). Globalement, les deux adhésifs d'ancrage montrent une performance semblable par rapport aux contraintes  $\tau$ .

### 6.3.2 Variabilité des résultats par série

Selon les graphiques obtenus lors des essais d'arrachement (Annexe A), on peut observer que les deux adhésifs montrent un degré de variabilité des résultats à partir des séries de 5 spécimens. Étant donné qu'il s'agit des matériaux cimentaires en cours de développement, une certaine hétérogénéité était à prévoir. Au Chapitre 5 on a résumé les coefficients de variation (COV) de toutes les séries testées.

Au-delà de l'augmentation de la variabilité pour les longueurs  $h_{ef}$  faibles (expliquée à la section 6.1), les ancrages avec l'adhésif AAC montrent plus de variabilité que ceux avec l'adhésif ARC. Les plages moyennes de valeurs de COV, toutes les séries confondues, sont : 30% - 60% (AAC-500W), 15% - 50% (AAC-400W) et 15% - 40% (ARC). Cela indique que les ancrages à l'AAC semblent plus sensibles aux conditions d'installation que les ancrages à

l'ARC. Les résultats suggèrent aussi que la nature chimique de l'adhésif AAC fait en sorte que le matériau présente une variabilité intrinsèque plus élevée, par rapport à celle du matériau de l'adhésif ARC.

### 6.3.3 Propriétés mécaniques

Dans le cas de l'adhésif AAC, les valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  augmentent pour la période comprise entre 7 et 28 jours de cure. Le matériau cimentaire devient plus résistant. De 7 à 28 jours, les gains de résistance sont compris entre 5% et 15% pour les ancrages à l'acier 500W, et entre 10% et 25% pour ceux à l'acier 400W.

Les ancrages avec l'adhésif ARC ont montré une réduction des valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  pour la même période (entre 7 et 28 jours). Cela indique que le matériau cimentaire subit une perte de résistance, variant entre 7% et 30% des valeurs mesurées à 7 jours. Il faut rappeler qu'on n'a pas testé suffisamment de séries pour généraliser cette tendance. Néanmoins, ce phénomène pourrait s'expliquer par des changements microstructuraux (retraits, variations de porosité, transformation des hydrates) qui font en sorte que l'adhésif ARC réduise sa performance au-delà de 7 jours de cure.

## 6.4 Comportement des ancrages sous chargement soutenu

On a testé 36 ancrages sous chargement soutenu à 23°C : 18 ancrages avec l'acier 400W (adhésif AAC) et 18 ancrages avec l'acier 500W (9 avec l'AAC et 9 avec l'ARC). Sur ces 36 ancrages, seulement 4 d'entre eux ont subi des déplacements initiaux importants ( $> 3$  mm) au moment du chargement : 2 à 80%  $N_{adh}$  et 2 à 70%  $N_{adh}$ . Aucun des ancrages testés ne s'est rompu après les 1000 heures de chargement soutenu. Compte tenu des taux élevés de chargement utilisés (au-delà du 55% recommandé par les normes ICC-ES AC308 et ACI 355.4), la performance de tous les ancrages testés est remarquable.

### 6.4.1 Influence du taux de chargement

Globalement, les résultats obtenus avec les essais de chargement soutenu, montrent que plus le taux de chargement est élevé, plus les déplacements initiaux et de fluage sont élevés. En fait,

pour la plupart des ancrages chargés à 80%  $N_{adh}$  (12 ancrages à l'AAC et 3 ancrages à l'ARC), les déplacements initiaux sont compris entre 0,1 mm et 1,0 mm; pour 70%  $N_{adh}$  (12 ancrages à l'AAC et 3 ancrages à l'ARC), ils sont compris entre 0,15 mm et 0,25 mm, et à 60%  $N_{adh}$  (3 ancrages à l'AAC et 3 ancrages à l'ARC), ils varient de 0,1 mm à 0,15 mm.

Concernant les déplacements de fluage, dans la plupart des ancrages chargés à 80%  $N_{adh}$ , ils sont compris entre 0,05 mm et 0,1 mm; pour 70%  $N_{adh}$  les valeurs varient de 0,02 mm à 0,07 mm, et à 60%  $N_{adh}$  ces déplacements sont très faibles, environ 0,01 mm. Cela indique que le matériau des adhésifs subit un endommagement plus important, lorsque le taux de chargement soutenu augmente, et cela est valide à court et long terme.

Il faut rappeler que dans le cas de 7 ancrages testés (dont 2 ont été arrêtés lors du chargement) on a mesuré des déplacements initiaux compris entre 1,0 mm et 5,5 mm. Ces ancrages ont été chargés avec les taux de chargement les plus élevés, soit 70%  $N_{adh}$  et 80%  $N_{adh}$ .

#### 6.4.2 Déplacement de fluage : ARC vs AAC

En comparant les résultats obtenus avec l'adhésif AAC, et ceux obtenus avec l'adhésif ARC, on constate que les déplacements initiaux sont à peu près semblables. Compte tenu que pour 7 des 27 ancrages avec l'AAC on a mesuré des déplacements de fluage compris entre 0,5 mm et 2,5 mm, et qu'aucun des 9 ancrages avec l'ARC n'a montré des déplacements de fluage au-delà de 0,05 mm, cela suggère que l'adhésif ARC a un comportement plus « rigide » que l'adhésif AAC, puisqu'il subit des déplacements de fluage moins élevés à long terme et à la température ambiante. Néanmoins, ces résultats sont préliminaires et d'autres séries avec l'ARC devraient être testées pour préciser cette différence de comportement.

### 6.5 Comportement des ancrages post-fluage

Comme on l'a déjà mentionné au Chapitre 5, tous les ancrages testés sous chargement soutenu ont montré la même tendance : plus la charge soutenue est élevée, plus les charges résiduelles  $N_u$  et  $N_{adh}$  mesurées post-fluage sont élevées. Le taux de chargement soutenu a un effet important sur le niveau de résistance des adhésifs, et probablement sur la microfissuration interne des matériaux cimentaires. Il est possible que la microfissuration engendrée lors du



chargement soutenu ait provoqué une faible expansion interne, due à l'ouverture des fissures. Ce faible endommagement a peut-être créé un mécanisme de blocage mécanique entre la barre d'acier et le substrat (*mechanical interlock*). Ce mécanisme vient probablement s'ajouter à l'adhérence chimique avec le substrat. Selon cette hypothèse, les ancrages ayant subi un taux de chargement plus élevé (80%  $N_{adh}$  et 70%  $N_{adh}$ ) se sont possiblement « écrouis », ce qui pourrait expliquer leur meilleure performance par rapport aux ancrages testés à 60%  $N_{adh}$ .

Étant donné que les 9 ancrages testés avec l'adhésif ARC (23°C) ont subi des déplacements de fluage plus faibles que la plupart des 27 ancrages testés avec l'adhésif AAC (23°C), les niveaux moyens de charges résiduelles des ancrages à l'ARC sont plus élevés (86% à 96% de  $N_{adh}$ ) que ceux des ancrages à l'AAC (77% à 95% de  $N_{adh}$ ). Cela démontre que l'adhésif ARC donne une meilleure performance que l'adhésif AAC par rapport au comportement en fluage à long terme.

## 6.6 Comportement des ancrages à 43°C

Deux séries d'essais à l'arrachement ont été testées à 43°C : AAC-500-150-43-D et ARC-500-150-43-C, toutes les deux après 28 jours de cure, avec  $h_{ef} = 150$  mm et en utilisant l'acier 500W. Les résultats montrent que la série à l'AAC (43°C) produit des COV autour de 15% et des valeurs de  $N_u$  et  $N_{adh}$  environ 20% supérieures aux deux séries à 23°C (AAC-500-150-23-B et C, 28 jours). Les résultats de la série AAC (43°C) sont comparables à ceux de la série AAC-400-150-23-A ( $N_u \approx 92$  kN et  $N_{adh} \approx 80$  kN), la plus performante des séries testées à  $h_{ef} = 150$  mm.

Quant à la série à l'ARC, les résultats sont, eux aussi, meilleures à 43°C par rapport aux séries équivalentes à 23°C (ARC-500-150-23-A et B, 28 jours), montrant des COV d'environ 10% et des valeurs de  $N_u$  et  $N_{adh}$  entre 25% et 70% plus élevées que celles des séries à 23°C. Il faut rappeler que les deux séries avec l'ARC (23°C) ont subi une perte de capacité entre 7 et 28 jours de cure. Étant donné qu'on n'a testé que deux séries à 43°C (9 ancrages), on ne peut pas tirer des conclusions plus complètes sur l'effet de la température de 43°C, par rapport aux séries testées à 23°C (plus de 100 ancrages testés).

Deux groupes d'ancrages ont été testés sous chargement soutenu à 43°C : le groupe 4 – AAC-500-150-43-D et le groupe 6 - ARC-500-150-43-C, avec l'acier 500W et  $h_{ef} = 150$  mm. Ces deux groupes ont été soumis à une charge soutenue de 55% de la charge  $N_{adh}$ . Les résultats montrent que les ancrages avec l'ARC présentent des déplacements initiaux un peu plus élevés (de 20  $\mu\text{m}$  à 50  $\mu\text{m}$ ) que ceux avec l'AAC. D'autre part, les déplacements de fluage après 1000 heures sont d'environ 100  $\mu\text{m}$  pour les 4 ancrages avec l'ARC, comparé aux 20  $\mu\text{m}$  – 50  $\mu\text{m}$  mesurés pour 4 des 5 ancrages avec l'AAC. Cela suggère que l'effet de la température élevée est plus important dans le cas des ancrages avec l'ARC, en réduisant la performance de l'adhésif à long terme.

Globalement, les résultats suggèrent que des transformations chimiques à 43°C ont pu provoquer une réduction de la résistance des deux adhésifs, ce qui se traduit par une augmentation importante des déplacements de fluage après 1000 heures, par rapport à ceux des essais à 23°C et à 60% de  $N_{adh}$ . La température élevée (43°C) a peut-être produit un retrait de l'adhésif (ne pas perceptible à l'œil nu), ce qui a pu favoriser le décollement avec le substrat. Des phénomènes de conversion chimique (à vérifier) pourraient aussi expliquer le fluage plus important à long terme.

## 6.7 Prédiction de performance

Lors des essais de chargement soutenu (1000 heures) on n'a jamais constaté l'amorce d'un fluage tertiaire (Chapitre 2, section 2.6) des adhésifs, et ce, même pour des taux de chargement de 70% et 80% de  $N_{adh}$ . Il est possible que, dans le cas des adhésifs cimentaires, cette étape ne survienne pas ou bien qu'elle ne survienne que pour un temps de chargement bien plus long que 42 jours. Néanmoins, 7 des 45 ancrages testés sous chargement soutenu ont montré des déplacements de fluage importants (0,5 mm – 2,5 mm), mais sans rupture cependant.

Dans le but de prédire la performance à long terme des deux adhésifs cimentaires étudiés, on a utilisé deux approches de calcul déjà expliquées au Chapitre 2, sections 2.6.1 (équation 2.3) et 2.7.2 (équation 2.6) :

- ASTM E-1512-01 – approche logarithmique :  $\Delta(t) = c * \ln(t) + b$
- ETAG 001, Part 5 (ICC-ES AC308) – approche Findley :  $\Delta(t) = \Delta_{t=0} + a * t^b$

Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 6.1. Les calculs effectués pour arriver aux résultats du Tableau sont présentés dans l'Annexe B. Les Annexes C et D présentent tous les graphiques correspondants aux projections de déplacement. Étant donné qu'on a utilisé des normes de performance qui utilisent des charges soutenues (ASTM E1512 = 40%  $N_{adh}$ , AC308 et ACI 355.4-11 = 55%  $N_{adh}$ ) inférieures à celles utilisées lors des essais amenés dans ce projet (80%  $N_{adh}$ , 70%  $N_{adh}$  et 60%  $N_{adh}$ ), on peut constater, sans surprise, que les limites maximales de déplacement sont dépassées pour la plupart des ancrages testés (notamment en utilisant l'approche Findley). Les limites maximales à long terme ( $\Delta_{lim}$ ) sont les déplacements moyens correspondants aux valeurs de la charge  $N_{adh}$ , obtenues lors des essais statiques de base des chargements soutenus (Tableau 5.11).

L'analyse du comportement sous chargement soutenu débutera par les 4 groupes testés à 23°C (groupes 1, 2, 3 et 5), pour se terminer avec les 2 groupes testés à 43°C (groupes 4 et 6).

Tableau 6.1 Valeurs de déplacement des ancrages sous chargement soutenu.  
Projections logarithmique et Findley.

Projections moyennes de déplacement $\Delta(t)$ (mm)						
Groupes	% $N_{adh}$	Logarithmique	Findley		$\Delta_{lim}$	
		$\Delta(600 \text{ jours})$	$\Delta(10 \text{ ans})$	$\Delta(50 \text{ ans})$		
1 AAC-400-150-23-A	80%	1,72 (NC)	-	2,32 (NC)	0,38	
	70%	0,72 (NC)	-	7,39 (NC)		
	60%	0,18 (C)	-	1,77 (NC)		
2 AAC-400-125-23-B	80%	1,73 (NC)	-	8,73 (NC)	0,25	
	70%	0,26 (NC)	-	16,67 (NC)		
3 AAC-500-150-23-C	80%	3,54 (NC)	-	1,5E <sup>5</sup> (NC)	0,36	
	70%	1,23 (NC)	-	39,84 (NC)		
4 AAC-500-150-43-D	55%	0,25 (C)	0,33 (C)	-	0,39	
	80%	0,31 (NC)	-	10,42 (NC)		
5 ARC-500-150-23-B	70%	0,17 (C)	-	2,29 (NC)	0,27	
	60%	0,14 (C)	-	0,83 (NC)		
6 ARC-500-150-43-C	55%	0,36 (NC)	1,23 (NC)	-	0,34	

(C) = Ancrages conformes :  $\Delta(t) < \Delta_{lim}$  (NC) = Ancrages non conformes :  $\Delta(t) > \Delta_{lim}$

Le Tableau 6.1 présente, pour chacun des groupes d'essais, les projections des déplacements de fluage calculées selon les approches logarithmique et Findley. Dans l'approche logarithmique, les projections sont calculées à 600 jours (essais à 23°C et 43°C) et pour

l'approche Findley, les projections se calculent à 10 ans (essais à 43°C) et à 50 ans (essais à 23°C). On a effectué des projections pour les différentes charges soutenues utilisées (80%, 70%, 60% et 55% de  $N_{adh}$ ). Pour chaque groupe, le déplacement limite à la perte d'adhérence ( $\Delta_{lim}$ ) est aussi indiqué.

Groupe 1 : AAC-400-150-23-A. Les 3 ancrages testés à 60%  $N_{adh}$ , un pourcentage supérieur au 40%  $N_{adh}$  de la norme ASTM E1512, sont conformes pour la projection logarithmique. Leur déplacement moyen (0,18 mm) est nettement inférieur à  $\Delta_{lim} = 0,38$  mm. Pour les charges de 70%  $N_{adh}$  (3 ancrages) et 80%  $N_{adh}$  (3 ancrages), on constate que les déplacements projetés à 600 jours sont entre 2 et 4 fois la valeur de  $\Delta_{lim}$  (0,72 mm et 1,72 mm). Dans le cas des projections Findley, à 60%  $N_{adh}$  on a obtenu une valeur de 4 fois  $\Delta_{lim}$  (1,77 mm), malgré le fait que ce taux de chargement est légèrement supérieur au 55%  $N_{adh}$  des normes AC308 et ACI 355.4. Pour 70%  $N_{adh}$  et 80%  $N_{adh}$ , les projections à 50 ans sont entre 20 et 7 fois  $\Delta_{lim}$  (7,39 mm et 2,32 mm respectivement). La valeur projetée à 70%  $N_{adh}$  est supérieure à celle obtenue à 80%  $N_{adh}$ , notamment en raison d'un seul ancrage qui a altéré la moyenne des résultats.

Globalement, les seuls ancrages conformes du groupe 1 (en moyenne) sont ceux projetés à 600 jours, sous une charge de 60%  $N_{adh}$ . Si l'on considère les ancrages individuellement, 5 des 9 ancrages sont conformes selon l'approche logarithmique, seulement 1 sur 9 est conforme selon l'approche Findley.

Groupe 2 : AAC-400-125-23-B. Des 5 ancrages testés à 70%  $N_{adh}$ , on en a interrompu 2, suite à la défaillance de l'adhérence lors de la mise en charge du chargement soutenu. Par conséquent, les projections sont basées sur 3 ancrages seulement. Ces trois ancrages ne sont pas conformes selon la projection logarithmique, parce que leur déplacement moyen (0,26 mm) est légèrement au-delà de  $\Delta_{lim} = 0,24$  mm. Compte tenu que le groupe 2 est le seul groupe testé à  $h_{ef} = 125$  mm, ce résultat est remarquable. Quant aux 4 ancrages testés à 80%  $N_{adh}$ , on a trouvé que le déplacement projeté à 600 jours est environ 7 fois la valeur de  $\Delta_{lim}$  (1,73 mm). Pour les projections à 50 ans, les valeurs obtenues sont très élevées par rapport à  $\Delta_{lim}$ ; le déplacement à 80%  $N_{adh}$  (16,67 mm) est presque le double de celui à 70%  $N_{adh}$  (8,73 mm).

En résumé, pour le groupe 2 les ancrages ne sont pas conformes pour les deux méthodes de projection. Si l'on considère les ancrages individuellement, 3 des 7 ancrages testés sont conformes selon l'approche logarithmique, et 1 sur 7 est conforme selon l'approche Findley.

Groupe 3 : AAC-500-150-23-C. Les 4 ancrages testés à 70%  $N_{adh}$  ne sont pas conformes selon la projection logarithmique; leur déplacement moyen (1,23 mm) est à peu près 3 fois la valeur de  $\Delta_{lim} = 0,36$  mm. Pour 80%  $N_{adh}$  (5 ancrages), on constate que le déplacement projeté à 600 jours est 10 fois la valeur de  $\Delta_{lim}$  (3,57 mm). Pour les projections Findley, à 70%  $N_{adh}$  on a obtenu environ 120 fois  $\Delta_{lim}$  (39,84 mm), notamment en raison de deux ancrages qui ont altéré la moyenne des résultats. A 80%  $N_{adh}$ , la projection à 50 ans donne une valeur extrêmement élevée par rapport à  $\Delta_{lim}$  ( $1,5 \times 10^5$  mm = 150 m!), également en raison d'un seul ancrage qui a altéré la moyenne des résultats. Il faut rappeler que ce groupe a été le moins performant des 6 groupes testés sous chargement soutenu. Ainsi, les résultats très élevés des projections correspondent à la tendance déjà observée pendant les 1000 heures des essais.

Globalement, dans le groupe 3 les ancrages ne sont pas conformes pour les deux projections. Si l'on considère les ancrages individuellement, 3 des 9 ancrages testés sont conformes selon l'approche logarithmique, et seulement 1 sur 9 est conforme selon l'approche Findley.

Groupe 5 : ARC-500-150-23-B. Les 3 ancrages testés à 60%  $N_{adh}$ , et les 3 ancrages testés à 70%  $N_{adh}$  (des pourcentages nettement supérieurs au 40%  $N_{adh}$  de la norme ASTM E1512), sont conformes selon la projection logarithmique. Leurs déplacements moyens (0,14 mm et 0,17 mm respectivement) sont environ la moitié de  $\Delta_{lim} = 0,27$  mm. Quant aux 3 ancrages testés à 80%  $N_{adh}$ , on a trouvé que le déplacement projeté à 600 jours est légèrement plus élevée que la valeur de  $\Delta_{lim}$  (0,31 mm). On constate une fois de plus que la performance des ancrages avec l'ARC (23°C) est meilleure que celle de tous les groupes testés à l'AAC. Concernant les projections Findley, à 60%  $N_{adh}$  on a obtenu une valeur de 3 fois  $\Delta_{lim}$  (0,83 mm), malgré le fait que ce taux de chargement n'est que légèrement supérieur au 55%  $N_{adh}$  des normes AC308 et ACI 355.4. Pour 70%  $N_{adh}$  on a obtenu environ 8 fois  $\Delta_{lim}$  (2,29 mm). A 80%  $N_{adh}$ , la projection à 50 ans donne une valeur très élevée par rapport à  $\Delta_{lim}$  (10,42 mm), notamment en raison d'un seul ancrage qui a altéré la moyenne des résultats.

Globalement, les seuls ancrages conformes du groupe 5 sont ceux projetés à 600 jours, sous des charges de 60%  $N_{adh}$  et 70%  $N_{adh}$ . Si l'on considère les ancrages individuellement, 7 des 9 ancrages testés sont conformes selon l'approche logarithmique, et 3 sur 9 sont conformes selon l'approche Findley.

Groupe 4 : AAC-500-150-43-D. Les 5 ancrages testés à 55%  $N_{adh}$  (un pourcentage supérieur au 40%  $N_{adh}$  de la norme ASTM E1512), sont conformes selon la projection logarithmique. Leur déplacement moyen (0,25 mm) est inférieur à la valeur de  $\Delta_{lim} = 0,39$  mm. Néanmoins, deux des 5 ancrages testés ne sont pas conformes à 600 jours, avec des déplacements projetés de 0,58 mm et 0,43 mm. Pour les projections Findley avec 55%  $N_{adh}$  (AC308 et ACI 355.4), on a obtenu une valeur moyenne aussi inférieure à  $\Delta_{lim}$  (0,33 mm), en remarquant que l'un des ancrages testés n'est pas conforme à 50 jours, avec un déplacement projeté de 0,43 mm. En général, tous les ancrages du groupe 4 sont conformes aux deux projections. Si l'on considère les ancrages individuellement, 3 des 5 ancrages testés sont conformes selon l'approche logarithmique, et 4 sur 5 sont conformes selon l'approche Findley.

Groupe 6 : ARC-500-150-43-C. Les 4 ancrages testés avec 55%  $N_{adh}$  (un pourcentage supérieur au 40%  $N_{adh}$  de la norme ASTM E1512), ne sont pas conformes selon la projection logarithmique. Leur déplacement moyen (0,36 mm) est légèrement supérieur à la valeur de  $\Delta_{lim} = 0,34$  mm. Quant aux projections Findley avec 55%  $N_{adh}$  (AC308 et ACI 355.4), on a obtenu une valeur moyenne 3 fois supérieure à  $\Delta_{lim}$  (1,23 mm). Compte tenu de la performance plus faible des ancrages avec l'ARC (43°C) par rapport à ceux avec l'AAC dans le cas des essais de chargement soutenu, les projections reflètent clairement cette tendance.

En général, dans le groupe 6 les ancrages ne sont pas conformes pour aucune des deux types de projection. Si l'on considère les ancrages individuellement, 2 des 4 ancrages testés sont conformes selon l'approche logarithmique, et il n'y a pas d'ancrages conformes selon l'approche Findley.

Selon toutes les projections obtenues et les graphiques correspondants aux 6 groupes d'ancrage testés (Annexes C et D), on peut constater que l'approche logarithmique reflète

d'une façon plus réaliste le comportement d'un adhésif cimentaire à long terme. Cette approche est de type monotonique ; les déplacements tendent à atteindre une valeur presque invariable à long terme. Ce type de projection est caractéristique du fluage des matériaux cimentaires. Dans la plupart des graphiques déplacements – temps obtenus lors des essais de chargement soutenu (36 sur 43 ancrages), on a clairement observé qu'après un certain nombre d'heures d'essai (inférieur à 1000 heures) les graphiques atteignent un plateau et les déplacements ne varient quasiment plus ( $< 20 \mu\text{m}$  à  $23^\circ\text{C}$ ,  $< 50 \mu\text{m}$  à  $43^\circ\text{C}$ ). Il semble que la projection logarithmique, qui tend à stabiliser les déplacements avec le temps, donnera des résultats plus représentatifs de la performance des ancrages aux adhésifs cimentaires.

D'autre part, on a remarqué que l'approche Findley s'avère très pénalisant dans le cas de tous les groupes testés, puisque cette approche suit la loi de puissance. Les déplacements projetés tendent à augmenter de façon soutenue à long terme (10 ans ou 50 ans), sans jamais atteindre une valeur de déplacement limite. Cette évolution n'est pas représentative du fluage des matériaux cimentaires ; elle l'est plus pour les matériaux thermoplastiques. En fait, la tendance de l'approche Findley ne correspond pas à celle observée pendant les 1000 heures des essais de chargement soutenu pour la plupart des ancrages testés, même pas à  $43^\circ\text{C}$  (groupes 4 et 6), où le plateau des déplacements s'est produit pendant les dernières 200 heures d'essais de chargement soutenu.

## 7. CONCLUSIONS

Ce projet de recherche a permis l'étude, la caractérisation en laboratoire et l'évaluation de la performance des cartouches d'ancrages cimentaires AAC et ARC de la compagnie AMBEX sous chargement soutenu, pour différents niveaux de charge et conditions de température en service. Pour cela, on a vérifié l'influence de certains facteurs sur leur performance en traction, tels que la longueur d'ancrage, la nuance des barres d'acier et le temps de cure des adhésifs. En plus, on a fait des prédictions de comportement des adhésifs à long terme, en utilisant deux approches pour effectuer les graphiques, avec les résultats obtenus lors des essais sous chargement soutenu.

1. Toutes les séries d'ancrages testés dans les essais statiques d'arrachement (5 spécimens par série) ont montré des degrés divers de variabilité, étant les séries avec l'adhésif ARC plus homogènes que les séries avec l'adhésif AAC. Dans la plupart des cas, 1 ancrage sur 5 a donné des valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  très inférieures par rapport aux résultats prévus. Les résultats suggèrent que la nature chimique de l'adhésif AAC fait en sorte que le matériau présente une variabilité intrinsèque plus élevée, par rapport à celle de l'adhésif ARC.
2. Les valeurs très inférieures obtenues lors des essais d'arrachement pourraient découler aussi d'un défaut de fabrication de l'adhésif ou des défauts locaux d'installation (nettoyage du trou, humidité de la cartouche). Malgré toutes les précautions prises lors de l'installation, certains ancrages testés ont manifestement eu des non conformités.
3. Les plages moyennes de valeurs de COV dans les essais d'arrachement sont comprises de 30% à 60% (AAC-500W), de 15% à 50% (AAC-400W) et de 15% à 40% (ARC). Étant donné que les conditions d'installation jouent un rôle majeur dans la performance d'un ancrage adhésif, les COV indiquent que les ancrages à l'AAC semblent plus sensibles à la procédure d'installation que les ancrages à l'ARC. Il faut rappeler que le suivi du *MPII* est de rigueur pour garantir la performance adéquate des adhésifs d'ancrage et pour diminuer les écarts dans les résultats des essais d'arrachement.
4. En général, les séries d'ancrages testées avec  $h_{ef} = 100$  mm et 125 mm ont montré une plus grande variabilité que les séries avec  $h_{ef} = 150$  mm dans les essais d'arrachement.



On a vérifié que les ancrages aux adhésifs cimentaires testés dans ce projet, montrent un comportement moins hétérogène aux  $h_{ef} \geq 150$  mm. Cela dit, il ne serait pas souhaitable d'ancrer des barres avec  $h_{ef} < 150$  mm si l'on veut utiliser les adhésifs cimentaires (AAC et ARC).

5. Les résultats des essais d'arrachement ont montré aussi que dans le cas des barres à 400 MPa, ce sont celles-ci qui ont contrôlé le comportement des ancrages, en se plastifiant lors que le niveau de charge statique a atteint la limite d'élasticité  $F_y = 80$  kN ( $h_{ef} = 125$  mm et 150 mm). Dans ces cas, on a évalué de façon indirecte le comportement des adhésifs. Alors, on suggère d'utiliser des barres de nuance supérieure à 400 MPa.
6. Quant aux barres à 500 MPa et les temps de cure des adhésifs, pour l'AAC les résultats à 28 jours ont montré des résultats semblables à ceux à 7 jours, tandis que pour l'ARC, les valeurs des charges ont nettement diminué entre 7 et 28 jours. Cela pourrait s'expliquer pour la contrainte additionnelle imposée par des barres plus résistantes sur les adhésifs dans le trou d'ancrage, spécialement sur l'adhésif ARC.
7. Les plages moyennes de valeurs de la contrainte  $\tau$  obtenues dans les essais d'arrachement sont comprises entre 7,1 MPa et 7,7 MPa (AAC – 7 jours), entre 6,5 MPa et 8,0 MPa (AAC – 28 jours), entre 7,0 MPa et 8,0 MPa (ARC – 7 jours), entre 6,0 et 7,5 MPa (ARC - 28 jours). Alors, les moyennes respectives de  $\tau$  à 7 et 28 jours sont : 7,4 MPa et 7,2 MPa (AAC), 7,5 MPa et 6,7 MPa (ARC), ce qui montre clairement la réduction de la performance de l'adhésif ARC entre 7 et 28 jours (23°C).
8. Les essais *post-creep* montrent que les valeurs moyennes résiduelles de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  à 23°C sont plus élevées, lorsque la charge soutenue appliquée a été plus élevée. Cela pourrait s'expliquer par un effet de microfissuration du matériau cimentaire qui augmente le mécanisme physique d'interaction avec le substrat (*interlock*). Les plages moyennes du rapport  $N_{adh}$  post-creep /  $N_{adh}$  pré-creep sont comprises entre 0,77 et 0,95 (AAC) et entre 0,86 et 0,96 (ARC).
9. Les résultats de l'étude de l'influence des conditions d'installation démontrent qu'il est très important de respecter la procédure du *MPII* pour pouvoir développer pleinement la performance mécanique des ancrages. Lorsqu'une des étapes d'installation n'est pas respectée, les valeurs de  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et  $\tau$  montreront des réductions comprises entre 15% et plus de 60%, par rapport aux valeurs obtenues selon la procédure du *MPII*.

10. La plupart des ancrages cimentaires testés ont montré un comportement très stable en fluage, sans aucun signe de fluage tertiaire, pour des niveaux de chargement soutenu égales et supérieurs à 55%  $N_{adh}$ . Néanmoins, 7 sur 36 ancrages testés à l'AAC (essais à 23°C) ont éprouvé des déplacements de fluage entre 0,5 mm et 2,5 mm.
11. Dans les chargements soutenus on a vérifié que, plus le pourcentage de  $N_{adh}$  est élevé, plus les déplacements initiaux et de fluage des ancrages sont importants. A 23°C, les ancrages à l'AAC montrent des déplacements plus grands que les ancrages à l'ARC, tandis qu'à 43°C ce sont les ancrages à l'ARC qui ont montré des déplacements plus élevés, par rapport aux ancrages à l'AAC.
12. Dans le domaine des adhésifs d'ancrage, les approches Findley (AC308 et ACI 355.4) et logarithmique (ASTM E1512) sont basées sur le critère passer / échouer (*pass / fail*) où le déplacement limite  $\Delta_{lim}$  détermine si un adhésif d'ancrage est apte à résister un certain niveau de chargement soutenu pour une condition de service donnée. Des 45 ancrages testés (dont 9 à 43°C), 24 ont été conformes selon l'approche logarithmique (6 à 43°C), et 9 selon l'approche Findley (3 à 43°C).
13. L'approche logarithmique reflète de façon plus réaliste le comportement des ancrages aux adhésifs cimentaires, puisque dans cette approche les déplacements à long terme tendent à se stabiliser, ce qui on a constaté dans les graphiques déplacement-temps pour la plupart des ancrages testés, après 1000 heures de chargement soutenu.
14. Les ancrages à l'AAC (23°C,  $h_{ef} = 150$  mm et acier 400 W et 500 W) ne sont pas conformes à 80%  $N_{adh}$  et 70%  $N_{adh}$ , quel que soit l'approche de projection. A 60%  $N_{adh}$  ces ancrages sont conformes à l'approche logarithmique, mais ils ne sont pas conformes à l'approche Findley. A 43°C et 55%  $N_{adh}$ , ces ancrages sont conformes selon les deux approches de projection.
15. Les ancrages à l'ARC (23°C,  $h_{ef} = 150$  mm et acier 500 W) ne sont pas conformes à 80%  $N_{adh}$ , quel que soit l'approche de projection. A 70%  $N_{adh}$  et 60%  $N_{adh}$  ces ancrages sont conformes à l'approche logarithmique, mais ils ne sont pas conformes à l'approche Findley. A 43°C et 55%  $N_{adh}$ , ces ancrages ne sont pas conformes, quel que soit l'approche de projection.
16. Avec les données préliminaires d'essais à 43°C, on a montré que l'adhésif AAC est plus performant à température élevée que l'adhésif ARC. Les ancrages à l'AAC ont présenté

des charges  $N_{adh}$  résiduelles 20% supérieures (rapport  $N_{adh}(\%)/N_{adh} = 1,06$  ; vs 0,89 pour l'ARC), des déplacements de fluage entre 2 et 3 fois moins élevés ( $< 0,05$  mm ; vs 0,1 mm pour l'ARC), et ils ont été conformes aux approches logarithmique ( $\Delta_{600\text{jours}} = 0,25$  mm  $< \Delta_{lim} = 0,36$  mm) et Findley ( $\Delta_{10\text{ans}} = 0,33$  mm  $< \Delta_{lim} = 0,36$  mm).

Voici quelques recommandations pour des recherches futures sur les ancrages cimentaires :

1. Il est très important d'effectuer encore plus d'essais statiques, en reformulant les composants de l'adhésif AAC si besoin. La grande variabilité des résultats sur des séries de 5 ancrages n'a pas permis d'obtenir des valeurs caractéristiques (garanties) des charges  $N_u$ ,  $N_{adh}$  et de la contrainte d'adhérence  $\tau$ , comparables aux moyennes obtenues : les écarts mesurés entre  $N_{u,k}$ ,  $N_{adh,k}$ ,  $\tau_k$  et les moyennes, dépassent largement 20% (valeur maximale établie par les normes AC308 et ACI 355.4).
2. Il faudrait réaliser des essais statiques sur des séries de 8 à 10 ancrages, pour vérifier si la variabilité qu'on a connue dans tous les essais est liée à la taille des échantillons. Néanmoins, dans ce projet, pour la seule série où l'on a testé 8 spécimens (AAC), on a obtenu deux valeurs nettement inférieures à la moyenne.
3. On recommande d'entreprendre des essais sous chargement soutenu à 43°C pour plusieurs niveaux de charge, comme c'était le cas des essais réalisés à 23°C. On pourrait essayer les trois niveaux appliqués à 23°C, soit 60%, 70% et 80% de  $N_{adh}$ . On peut attendre quelques ancrages rompus pendant la mise en charge de ces chargements soutenus, notamment à 70% et 80% de  $N_{adh}$ .
4. Il serait pertinent de réviser les critères des normes AC308 et ACI 355.4, par rapport aux chargements soutenus, et éventuellement inclure une partie spécifique concernant les ancrages cimentaires, puisque ceux-ci ont montré un comportement différent des ancrages polymériques et hybrides (notamment l'absence de fluage tertiaire après 1000 heures d'essais). Cela pourrait mener à des changements dans les pourcentages de  $N_{adh}$  à appliquer, afin d'évaluer de façon plus précise la performance des adhésifs cimentaires.
5. Dans des futurs projets, il serait envisageable d'appliquer l'approche contrainte – temps de rupture (AASHTO TP 84-10), pour déterminer la performance des ancrages cimentaires, suite aux chargements soutenus. Cette approche permet de trouver le temps de rupture spécifique pour chaque adhésif, dans diverses conditions en service, en allant au-delà du critère passer / échouer, des normes AC308 et ACI 355.4.

# ANNEXE A.

## ESSAIS STATIQUES DE TRACTION.

Cette Annexe présente les graphiques charge – déplacement issus de toutes les séries des essais statiques de traction faits sur les deux adhésifs cimentaires.

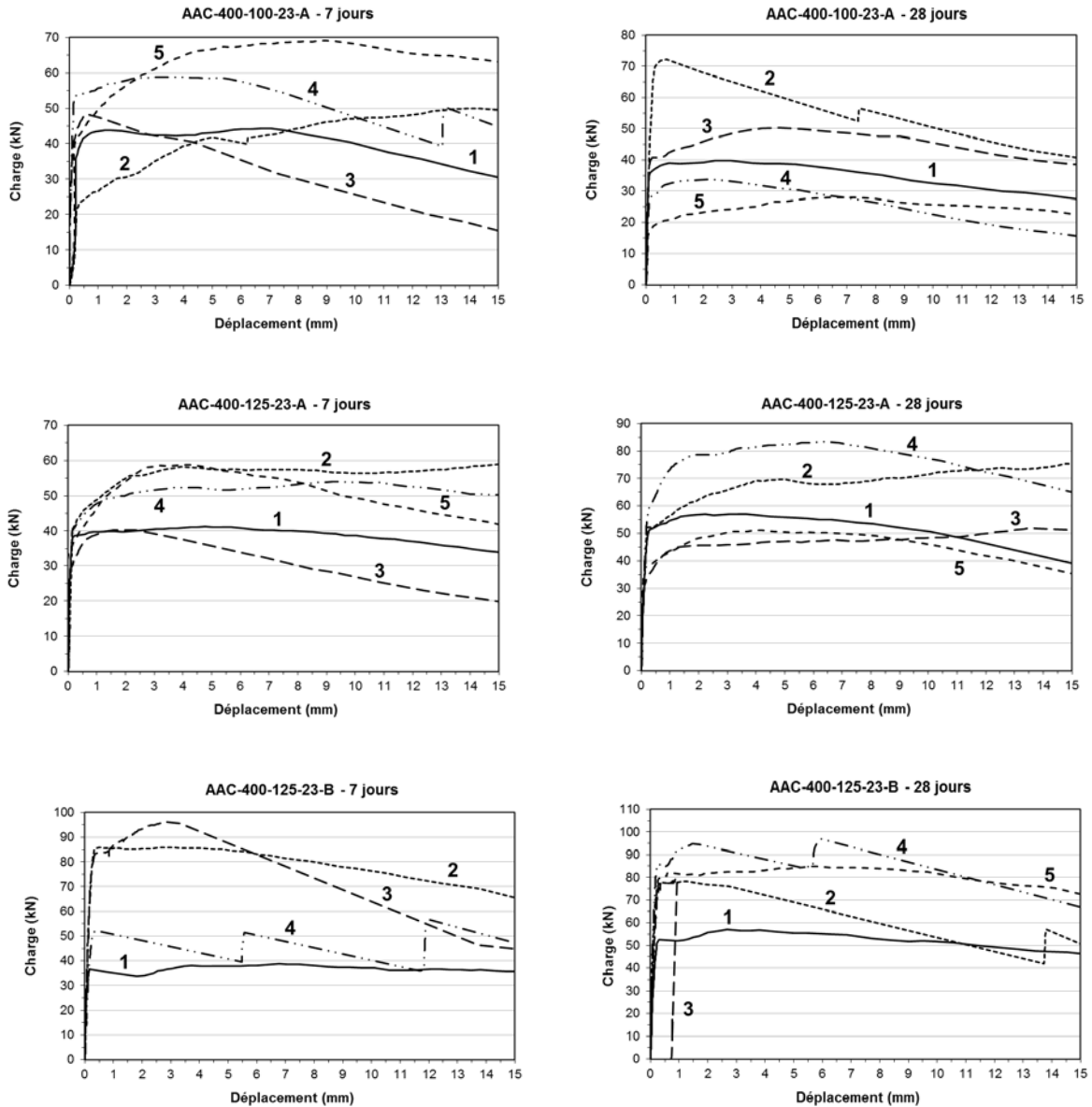


Figure A-1 Graphiques superposés charge - déplacement. Adhésif AAC. Acier 400 W. 23°C

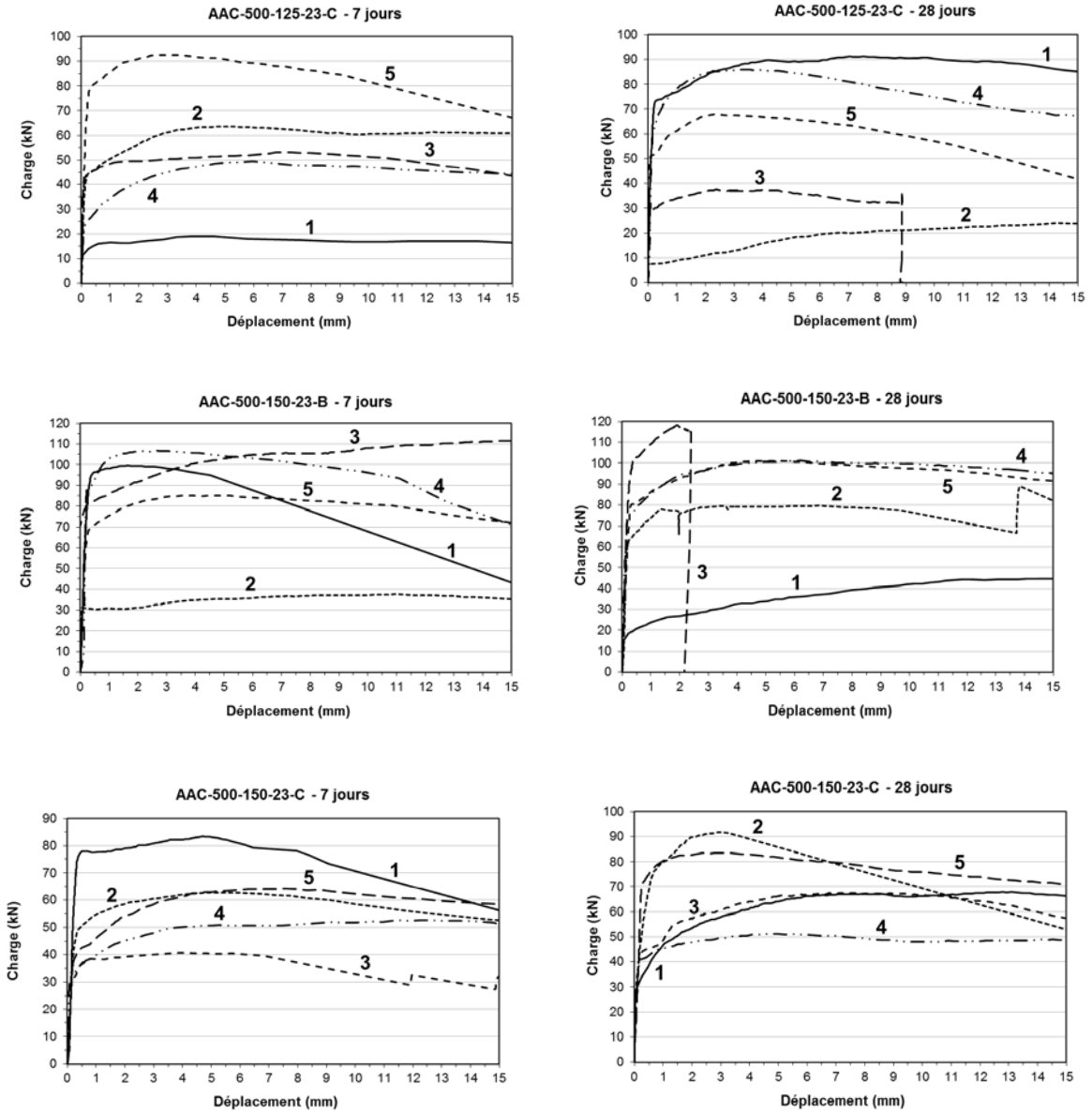
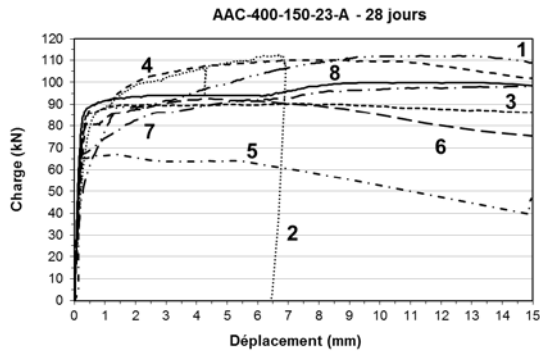
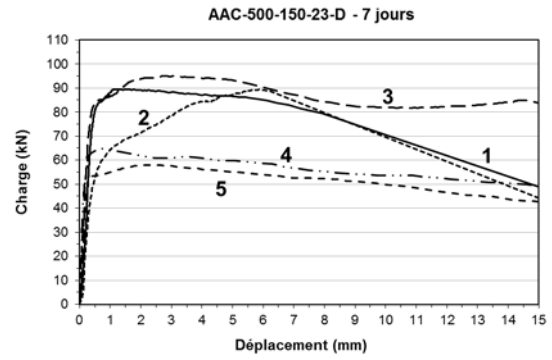


Figure A-2 Graphiques superposés charge - déplacement. Adhésif AAC. Acier 500 W. 23°C



Acier 400 W



Acier 500 W

Figure A-3 Graphiques superposés charge - déplacement. Adhésif AAC. 23°C

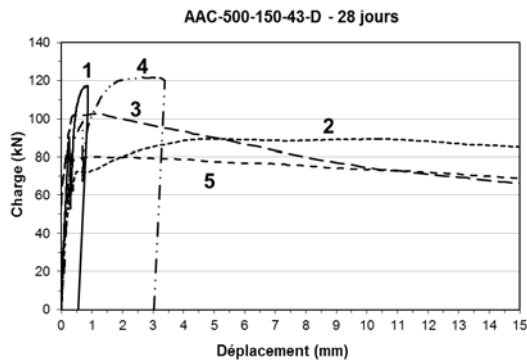


Figure A-4 Graphique superposé charge - déplacement. Adhésif AAC. Acier 500 W. 43°C

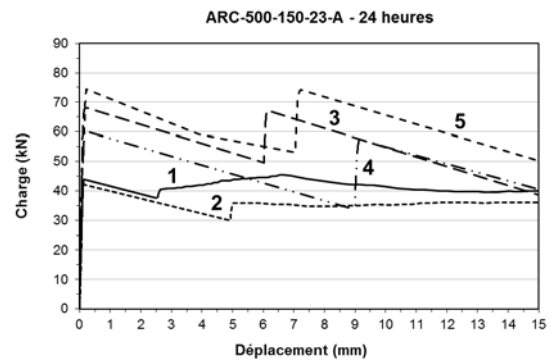
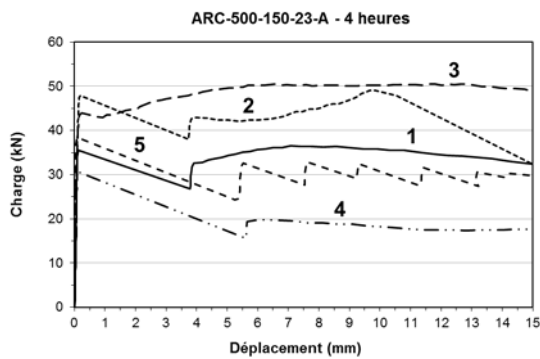


Figure A-5 Graphiques superposés charge - déplacement. Adhésif ARC.  $h_{ef} = 150$  mm. 23°C

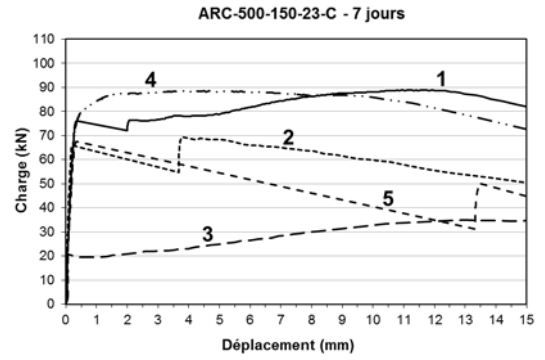
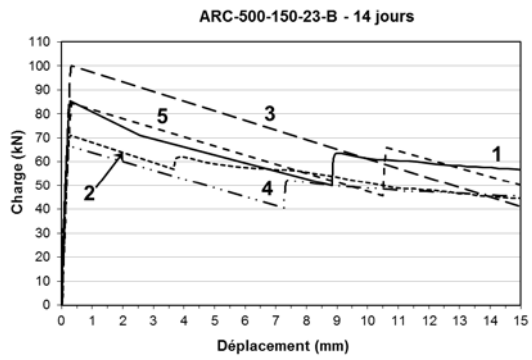
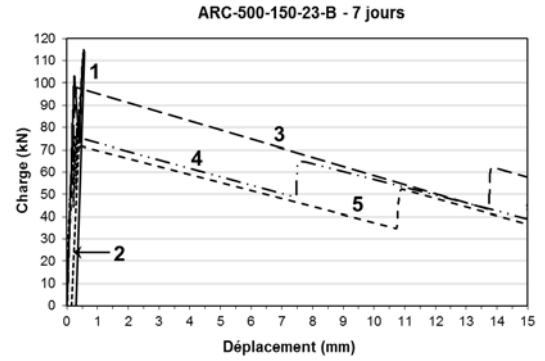
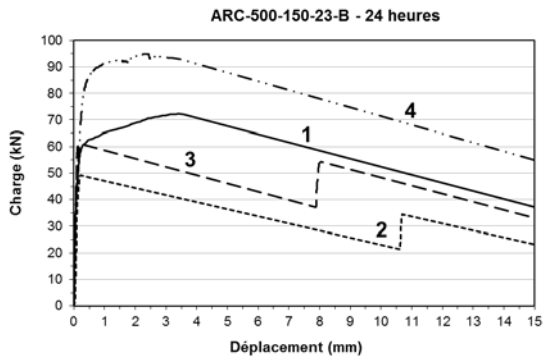
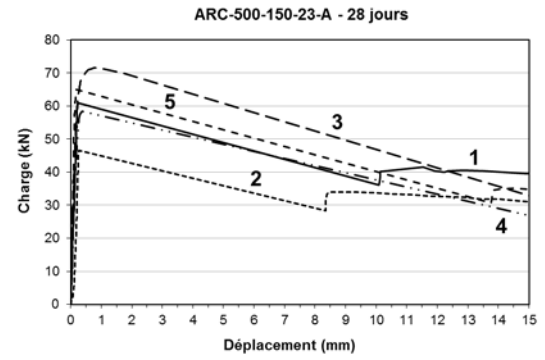
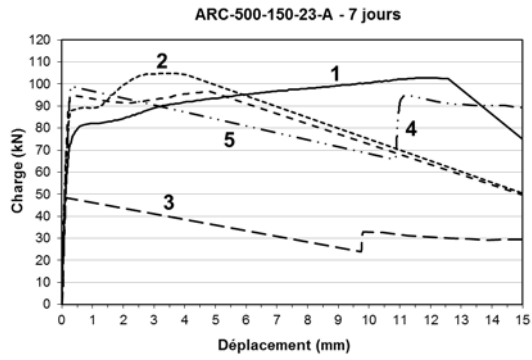


Figure A-5 (suite) Graphiques superposés charge - déplacement. Adhésif ARC.  
 $h_{ef} = 150 \text{ mm}$ .  $23^\circ\text{C}$

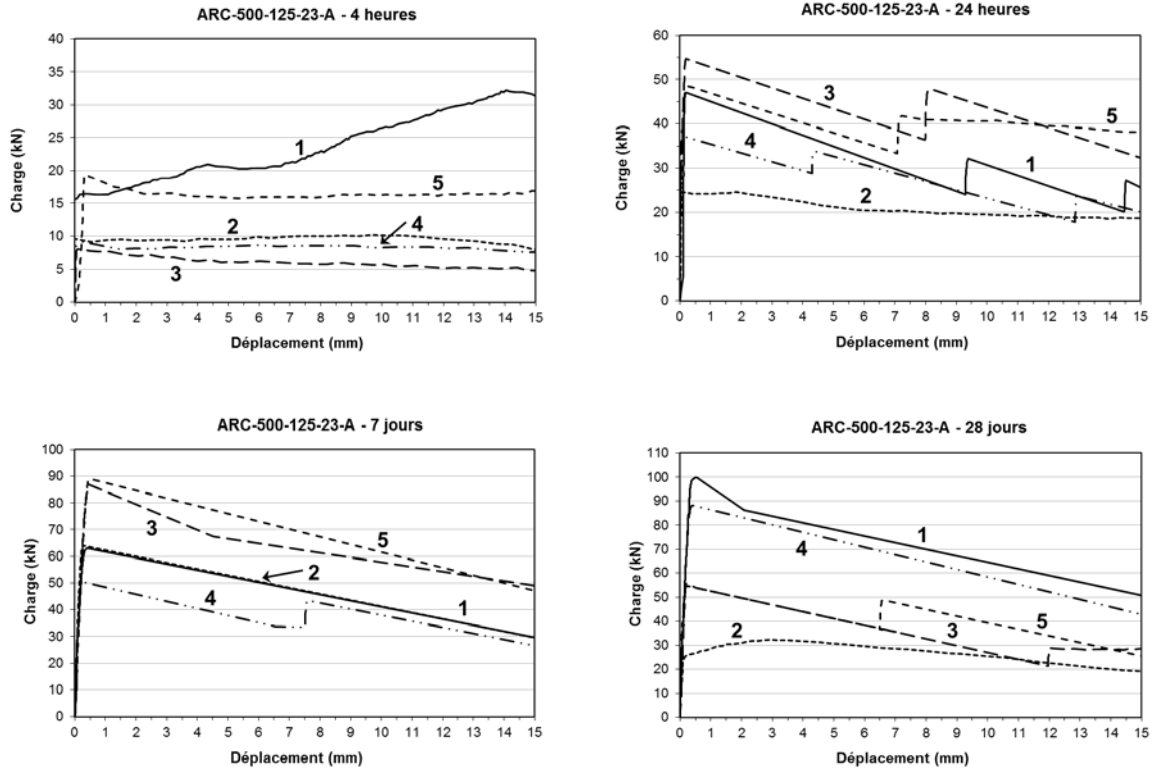


Figure A-6 Graphiques superposés charge - déplacement. Adhésif ARC.  $h_{ef} = 125$  mm.  $23^{\circ}\text{C}$

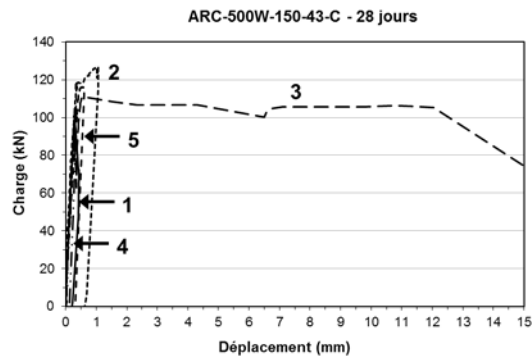


Figure A-7 Graphique superposé charge - déplacement. Adhésif ARC.  $h_{ef} = 150$  mm.  $43^{\circ}\text{C}$



# ESSAIS STATIQUES *POST-CREEP*

A présent, les graphiques des essais *post-creep* sur les 6 groupes d'ancrages soumis aux chargements soutenus.

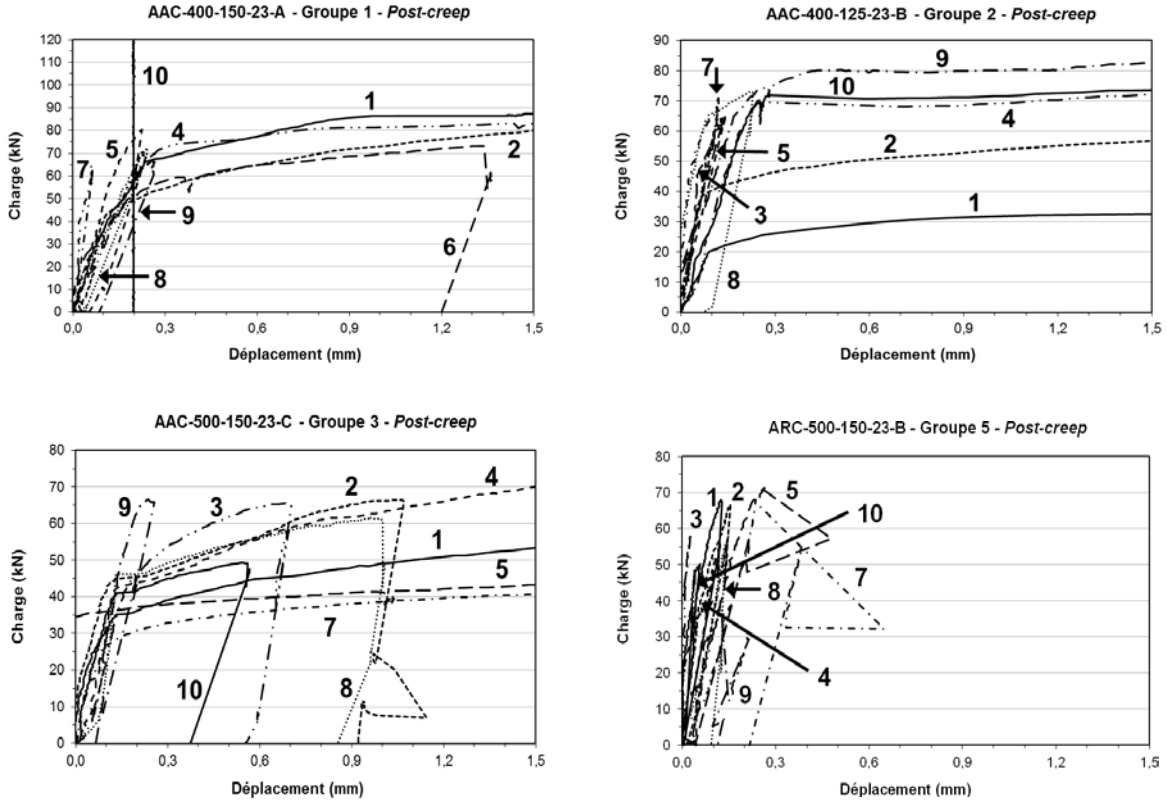


Figure A.8 Graphiques superposés charge – déplacement. Essais statiques *post-creep*.23°C.

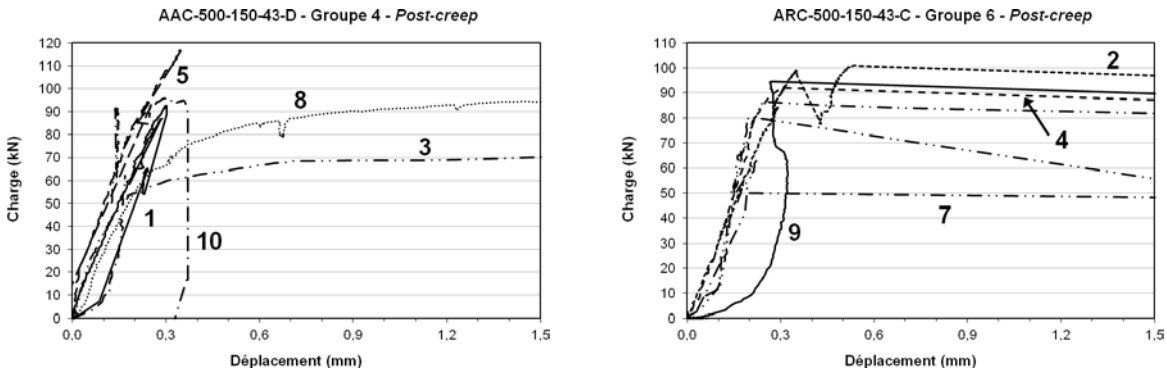


Figure A.9 Graphiques superposés charge – déplacement. Essais statiques *post-creep*.43°C.

## ANNEXE B.

### CALCULS DES PROJECTIONS DE DÉPLACEMENT

Cette Annexe présente les valeurs des constants de régression, et les déplacements projetés de tous les ancrages soumis au chargement soutenu (Groupes 1 à 6), ainsi que les valeurs moyennes indiquées au Tableau 6.1.

Tableau B.1 Projections de déplacement Groupe 1 (AAC - 23°C). Approche Findley.

<b>Groupe 1 AAC-400-150-23-A</b>		<b>Régression linéaire</b>		<b><math>\Delta(t)</math> (mm)</b>	
<b>Ancrage</b>	<b><math>\Delta_{t=0}</math> (mm)</b>	<b><i>a</i></b>	<b><i>b</i></b>	<b>50 ans</b>	<b>Moyen</b>
1 – 80% $N_{adh}$	0,476	4E-04	0,408	1,239	
2* – 80% $N_{adh}$	3,124	0,215	0,154	4,717	2,324
4 – 80% $N_{adh}$	0,411	0,009	0,322	1,017	
5 – 70% $N_{adh}$	0,213	4E-05	0,979	13,031	
6 – 70% $N_{adh}$	0,117	0,055	0,383	8,132	7,393
7 – 70% $N_{adh}$	0,222	0,002	0,290	0,323	
8 – 60% $N_{adh}$	0,101	4E-05	0,792	1,322	
9 – 60% $N_{adh}$	0,176	1E-04	0,767	2,322	1,768
10 – 60% $N_{adh}$	0,166	1E-04	0,734	1,659	
				<b><math>\Delta_{lim}</math> (mm)</b>	0,376

\* Défaillance de l'ancrage.

Tableau B.2 Projections de déplacement Groupe 1 (AAC- 23°C). Approche logarithmique.

<b>Groupe 1 AAC-400-150-23-A</b>		<b>Régression logarithmique</b>		<b><math>\Delta(t)</math> (mm)</b>	
<b>Ancrage</b>	<b><i>b</i></b>	<b><i>c</i></b>	<b>600 jours</b>	<b>Moyen</b>	
1 – 80% $N_{adh}$	0,387	0,022	0,598		
2* – 80% $N_{adh}$	3,119	0,091	3,991		1,717
4 – 80% $N_{adh}$	0,328	0,024	0,561		
5 – 70% $N_{adh}$	0,092	0,022	0,304		
6 – 70% $N_{adh}$	-0,921	0,262	1,592		0,715
7 – 70% $N_{adh}$	0,204	0,005	0,249		
8 – 60% $N_{adh}$	0,050	0,006	0,108		
9 – 60% $N_{adh}$	0,107	0,012	0,222		0,176
10 – 60% $N_{adh}$	0,108	0,009	0,199		
				<b><math>\Delta_{lim}</math> (mm)</b>	0,376

\*Défaillance de l'ancrage.

Tableau B.3 Projections de déplacement Groupe 2 (AAC- 23°C). Approche Findley.

<b>Groupe 2</b>		<b>Régression linéaire</b>		<b><math>\Delta(t)</math> (mm)</b>	
<b>AAC-400-125-23-B</b>					
<b>Ancrage</b>	<b><math>\Delta_{t=0}</math> (mm)</b>	<b><i>a</i></b>	<b><i>b</i></b>	<b>50 ans</b>	<b>Moyen</b>
1* – 70% $N_{adh}$	3,851	-	-	-	-
2* – 70% $N_{adh}$	4,575	-	-	-	-
3 – 70% $N_{adh}$	0,154	4E-06	1,199	24,264	
4 – 70% $N_{adh}$	0,263	0,002	0,458	1,185	8,729
5 – 70% $N_{adh}$	0,135	0,001	0,466	0,738	
7 – 80% $N_{adh}$	0,151	0,011	0,113	0,201	
8 – 80% $N_{adh}$	1,167	0,049	0,553	65,534	16,670
9 – 80% $N_{adh}$	0,277	0,005	0,311	0,572	
10 – 80% $N_{adh}$	0,196	0,028	0,140	0,372	
				<b><math>\Delta_{lim}</math> (mm)</b>	0,248

\* Défaillance de l'ancrage lors de la mise en charge.

Tableau B.4 Projections de déplacement Groupe 2 (AAC- 23°C). Approche logarithmique.

<b>Groupe 2</b>		<b>Régression logarithmique</b>		<b><math>\Delta(t)</math> (mm)</b>	
<b>AAC-400-125-23-B</b>					
<b>Ancrage</b>		<b><i>b</i></b>	<b><i>c</i></b>	<b>600 jours</b>	<b>Moyen</b>
1* – 70% $N_{adh}$		-	-	-	-
2* – 70% $N_{adh}$		-	-	-	-
3 – 70% $N_{adh}$		0,043	0,015	0,189	
4 – 70% $N_{adh}$		0,161	0,022	0,376	0,257
5 – 70% $N_{adh}$		0,075	0,014	0,207	
7 – 80% $N_{adh}$		0,156	0,003	0,181	
8 – 80% $N_{adh}$		-3,707	1,025	6,104	1,734
9 – 80% $N_{adh}$		0,232	0,013	0,353	
10 – 80% $N_{adh}$		0,201	0,010	0,297	
				<b><math>\Delta_{lim}</math> (mm)</b>	0,248

\* Défaillance de l'ancrage lors de la mise en charge.

Tableau B.5 Projections de déplacement Groupe 3 (AAC- 23°C). Approche Findley.

<b>Groupe 3</b> <b>AAC-500-150-23-C</b>		<b>Régression linéaire</b>		<b><math>\Delta(t)</math> (mm)</b>	
<b>Ancrage</b>	<b><math>\Delta_{t=0}</math> (mm)</b>	<b><i>a</i></b>	<b><i>b</i></b>	<b>50 ans</b>	<b>Moyen</b>
2 – 70% N <sub>adh</sub>	0,130	1E-10	2,781	6E+05	
3 – 70% N <sub>adh</sub>	0,179	1E-04	0,894	15,317	1,5E+05
4 – 70% N <sub>adh</sub>	0,198	0,004	0,481	2,225	
5 – 70% N <sub>adh</sub>	1,411	0,094	0,383	15,035	
1 – 80% N <sub>adh</sub>	0,563	0,004	0,806	137,32	
7* – 80% N <sub>adh</sub>	5,222	0,692	0,108	8,045	39,837
8 – 80% N <sub>adh</sub>	0,208	0,007	0,391	1,282	
9 – 80% N <sub>adh</sub>	0,179	0,005	0,267	0,330	
10 – 80% N <sub>adh</sub>	1,207	0,102	0,479	52,207	
				<b><math>\Delta_{lim}</math> (mm)</b>	<b>0,358</b>

\* Défaillance de l'ancrage

Tableau B.6 Projections de déplacement Groupe 3 (AAC- 23°C). Approche logarithmique.

<b>Groupe 3</b> <b>AAC-500-150-23-C</b>		<b>Régression logarithmique</b>		<b><math>\Delta(t)</math> (mm)</b>		
<b>Ancrage</b>	<b><i>b</i></b>	<b><i>c</i></b>	<b>600 jours</b>	<b>Moyen</b>		
2 – 70% N <sub>adh</sub>	-0,076	0,033	0,240			
3 – 70% N <sub>adh</sub>	-0,059	0,041	0,335	1,233		
4 – 70% N <sub>adh</sub>	5E-04	0,044	0,419			
5 – 70% N <sub>adh</sub>	-0,390	0,452	3,939			
1 – 80% N <sub>adh</sub>	-2,769	0,627	3,233			
7* – 80% N <sub>adh</sub>	5,623	0,153	7,093	3,541		
8 – 80% N <sub>adh</sub>	0,071	0,034	0,398			
9 – 80% N <sub>adh</sub>	0,157	0,007	0,227			
10 – 80% N <sub>adh</sub>	-4,100	1,134	6,755			
				<b><math>\Delta_{lim}</math> (mm)</b>	<b>0,358</b>	

\* Défaillance de l'ancrage

Tableau B.7 Projections de déplacement Groupe 4 (AAC- 43°C). Approche Findley.

<b>Groupe 4</b> <b>AAC-500-150-43-D</b>		<b>Régression linéaire</b>		<b><math>\Delta(t)</math> (mm)</b>		
<b>Ancrage</b>	<b><math>\Delta_{t=0}</math> (mm)</b>	<b><i>a</i></b>	<b><i>b</i></b>	<b>10 ans</b>	<b>Moyen</b>	
1 – 55% N <sub>adh</sub>	0,177	0,014	0,164	0,268		
3 – 55% N <sub>adh</sub>	0,185	0,043	0,195	0,583	0,333	
5 – 55% N <sub>adh</sub>	0,046	0,004	0,292	0,158		
8 – 55% N <sub>adh</sub>	0,147	0,019	0,238	0,428		
10 – 55% N <sub>adh</sub>	0,124	0,008	0,218	0,228		
				<b><math>\Delta_{lim}</math> (mm)</b>	<b>0,390</b>	

Tableau B.8 Projections de déplacement Groupe 4 (AAC- 43°C). Approche logarithmique.

<b>Groupe 4</b> <b>AAC-500-150-43-D</b>	<b>Régression</b> <b>logarithmique</b>		<b><math>\Delta(t)</math> (mm)</b>		
	<b>Ancrage</b>	<b><i>b</i></b>	<b><i>c</i></b>	<b>600 jours</b>	<b>Moyen</b>
1 – 55% $N_{adh}$	0,174	0,006	0,234		
3 – 55% $N_{adh}$	0,145	0,030	0,431		
5 – 55% $N_{adh}$	0,014	0,008	0,091		0,246
8 – 55% $N_{adh}$	0,094	0,021	0,295		
10 – 55% $N_{adh}$	0,107	0,007	0,178		
<b><math>\Delta_{lim}</math> (mm)</b>				<b>0,390</b>	

Tableau B.9 Projections de déplacement Groupe 5 (ARC- 23°C). Approche Findley.

<b>Groupe 5</b> <b>ARC-500-150-23-B</b>	<b>Régression linéaire</b>			<b><math>\Delta(t)</math> (mm)</b>		
	<b>Ancrage</b>	<b><math>\Delta_{t=0}</math> (mm)</b>	<b><i>a</i></b>	<b><i>b</i></b>	<b>50 ans</b>	<b>Moyen</b>
1 – 60% $N_{adh}$	0,098	0,016	-0,230	0,099		
3 – 60% $N_{adh}$	0,142	0,010	0,049	0,162		0,830
5 – 60% $N_{adh}$	0,121	7E-05	0,798	2,230		
2 – 70% $N_{adh}$	0,130	9E-06	1,031	6,276		
4 – 70% $N_{adh}$	0,151	0,001	0,411	0,419		2,290
7 – 70% $N_{adh}$	0,164	0,009	-0,034	0,170		
8 – 80% $N_{adh}$	0,219	9E-05	0,831	4,935		
9 – 80% $N_{adh}$	0,177	0,001	0,507	1,039		10,420
10 – 80% $N_{adh}$	0,205	5E-05	1,003	25,291		
<b><math>\Delta_{lim}</math> (mm)</b>				<b>0,266</b>		

Tableau B.10 Projections de déplacement Groupe 5 (ARC- 23°C). Approche logarithmique.

<b>Groupe 5</b> <b>ARC-500-150-23-B</b>	<b>Régression</b> <b>logarithmique</b>		<b><math>\Delta(t)</math> (mm)</b>		
	<b>Ancrage</b>	<b><i>b</i></b>	<b><i>c</i></b>	<b>600 jours</b>	<b>Moyen</b>
1 – 60% $N_{adh}$	0,103	-9E-04	0,094		
3 – 60% $N_{adh}$	0,149	7E-04	0,156		0,140
5 – 60% $N_{adh}$	0,063	0,010	0,161		
2 – 70% $N_{adh}$	0,075	0,008	0,157		
4 – 70% $N_{adh}$	0,118	0,008	0,193		0,170
7 – 70% $N_{adh}$	0,174	-3E-04	0,171		
8 – 80% $N_{adh}$	0,118	0,018	0,298		
9 – 80% $N_{adh}$	0,095	0,017	0,258		0,310
10 – 80% $N_{adh}$	-0,032	0,042	0,373		
<b><math>\Delta_{lim}</math> (mm)</b>				<b>0,266</b>	

Tableau B.11 Projections de déplacement Groupe 6 (ARC- 43°C). Approche Findley.

<b>Groupe 6 ARC-500-150-43-C</b>		<b>Régression linéaire</b>		<b><math>\Delta(t)</math> (mm)</b>	
<b>Ancrage</b>	<b><math>\Delta_{t=0}</math> (mm)</b>	<b><math>a</math></b>	<b><math>b</math></b>	<b>10 ans</b>	<b>Moyen</b>
2 – 55% N <sub>adh</sub>	0,219	0,002	0,558	1,298	
4 – 55% N <sub>adh</sub>	0,090	0,004	0,462	0,887	1,234
7 – 55% N <sub>adh</sub>	0,099	0,002	0,559	1,411	
9 – 55% N <sub>adh</sub>	0,240	0,001	0,598	1,342	
				<b><math>\Delta_{lim}</math> (mm)</b>	<b>0,340</b>

Tableau B.12 Projections de déplacement Groupe 6 (ARC- 43°C). Approche logarithmique.

<b>Groupe 6 ARC-500-150-43-C</b>		<b>Régression logarithmique</b>		<b><math>\Delta(t)</math> (mm)</b>	
<b>Ancrage</b>	<b><math>b</math></b>	<b><math>c</math></b>	<b>600 jours</b>	<b>Moyen</b>	
2 – 55% N <sub>adh</sub>	0,031	0,040	0,409		
4 – 55% N <sub>adh</sub>	-0,090	0,040	0,290	0,360	
7 – 55% N <sub>adh</sub>	-0,146	0,050	0,332		
9 – 55% N <sub>adh</sub>	0,056	0,037	0,410		
				<b><math>\Delta_{lim}</math> (mm)</b>	<b>0,340</b>

# ANNEXE C

## PROJECTIONS APPROCHE LOGARITHMIQUE.

Cette Annexe présente les projections correspondantes à l'approche logarithmique, par groupe d'essais de chargement soutenu. Les projections montrent les déplacements à 600 jours (14400 heures)

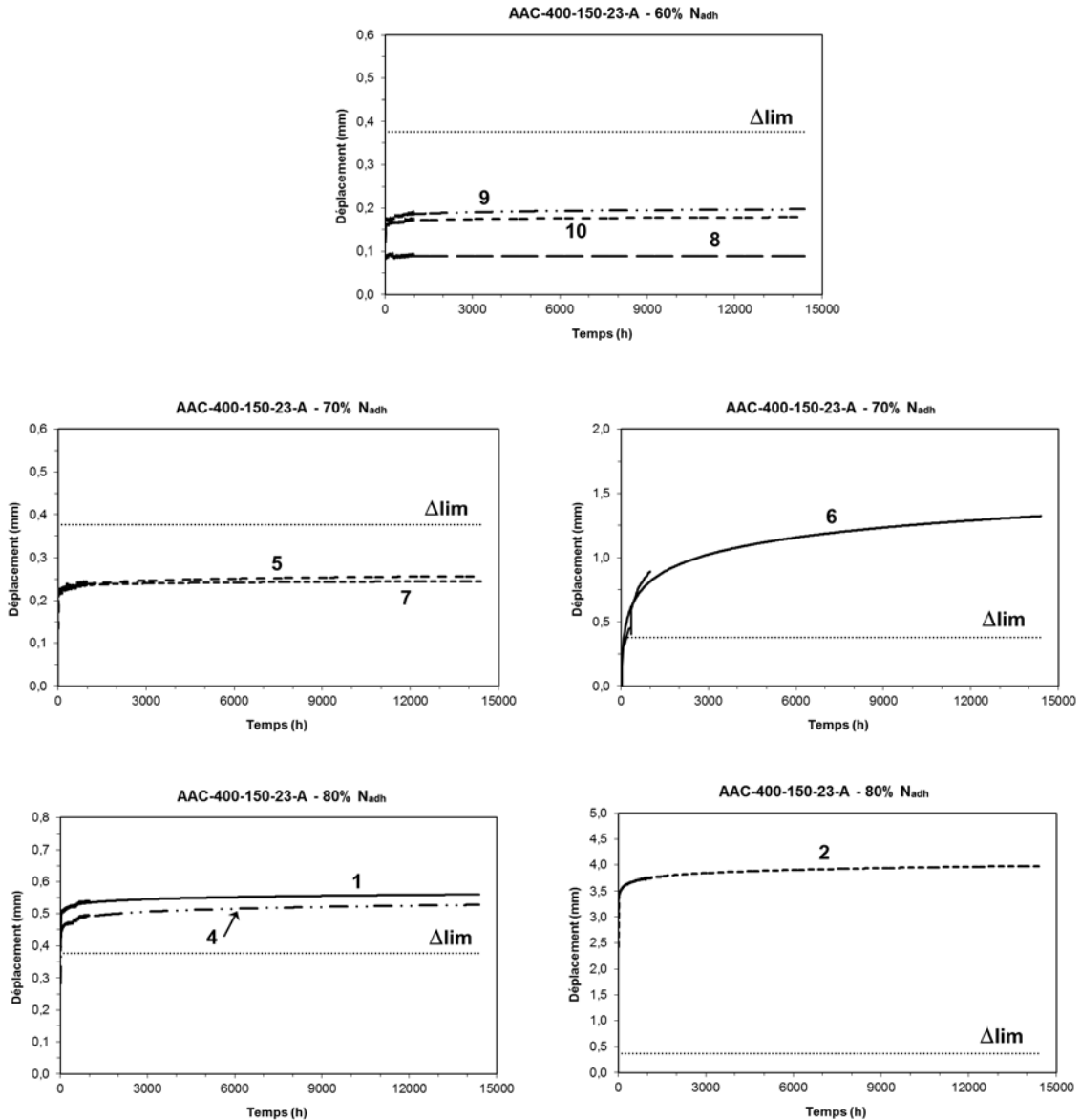


Figure C-1 Projections logarithmiques Groupe 1. AAC-400-150-23-A.

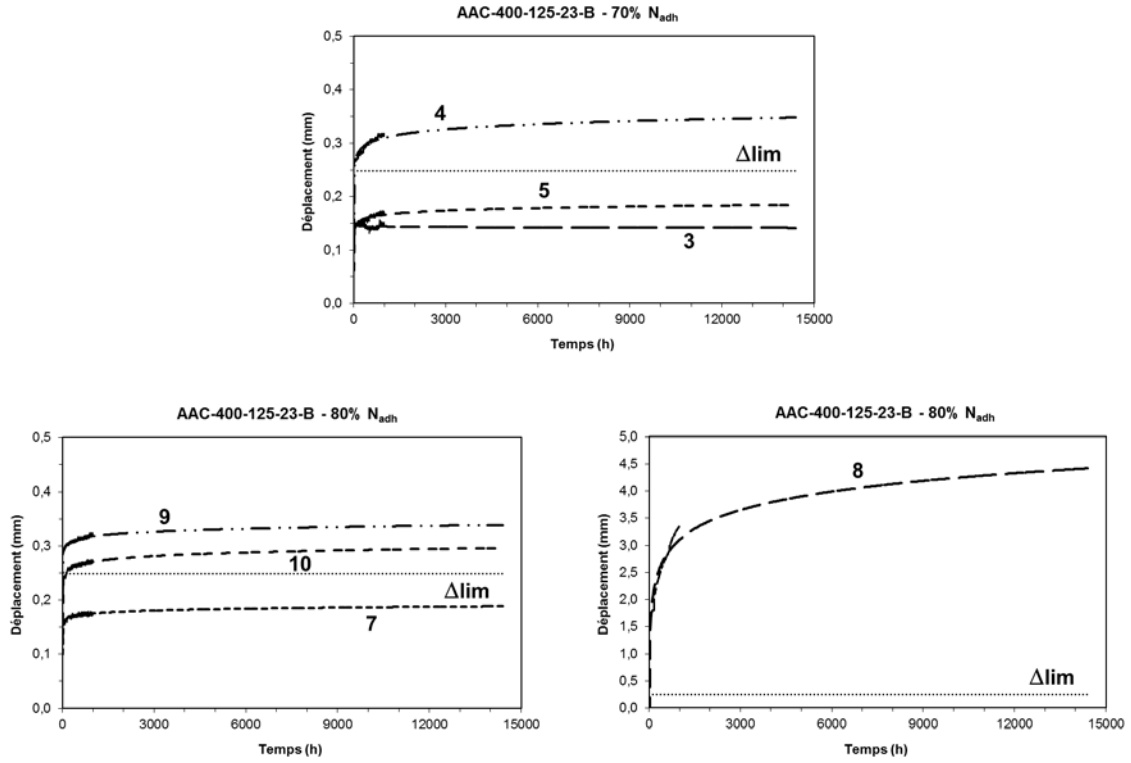


Figure C-2 Projections logarithmiques Groupe 2. AAC-400-125-23-B.

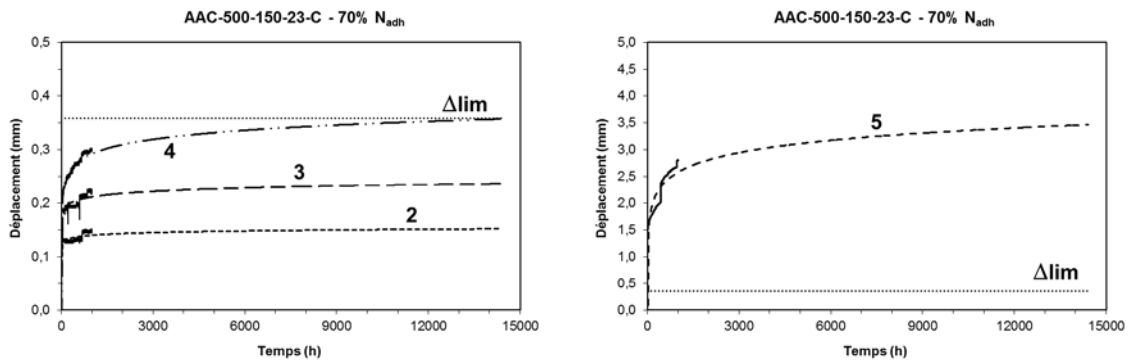


Figure C-3 Projections logarithmiques Groupe 3. AAC-500-150-23-C.



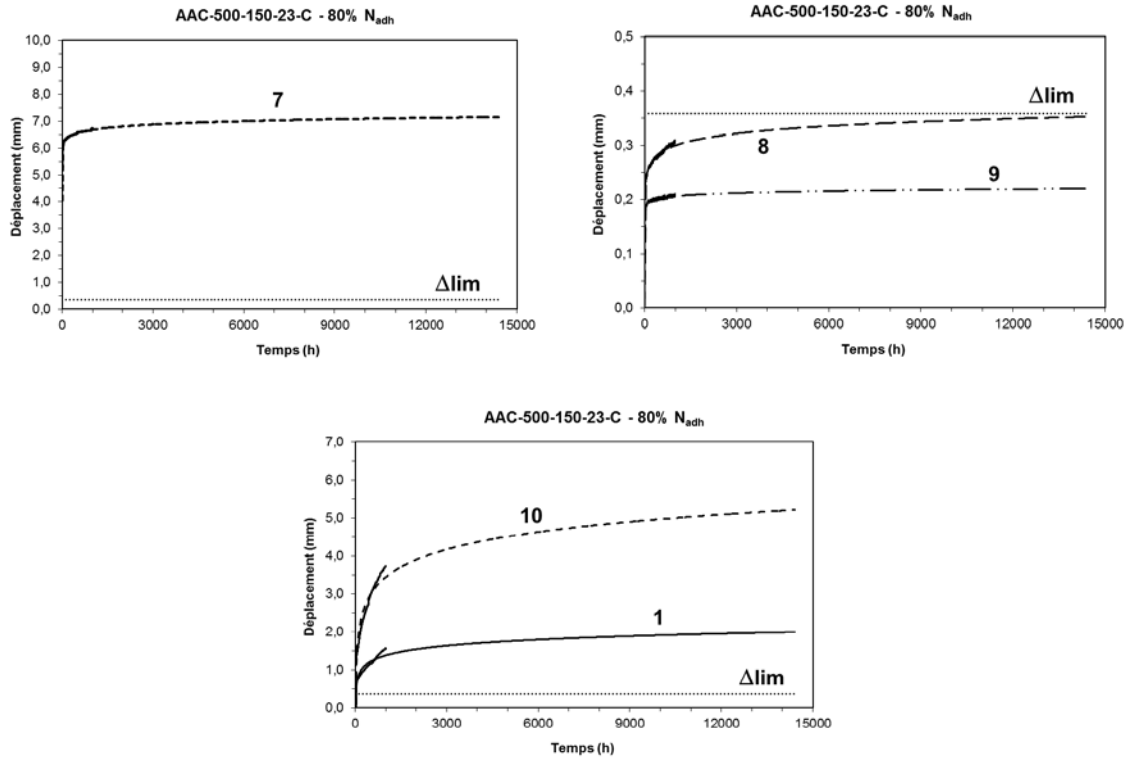


Figure C-3 (suite) Projections logarithmiques Groupe 3. AAC-500-150-23-C.

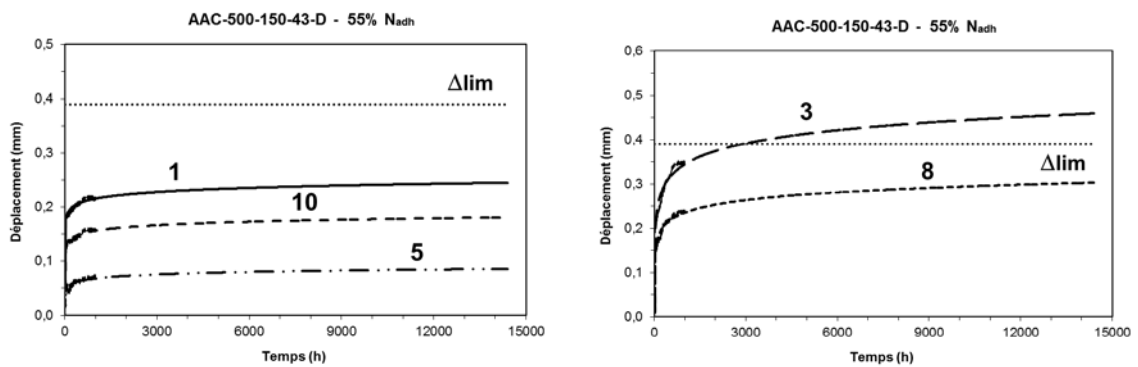


Figure C-4 Projections logarithmiques Groupe 4. AAC-500-150-43-D.

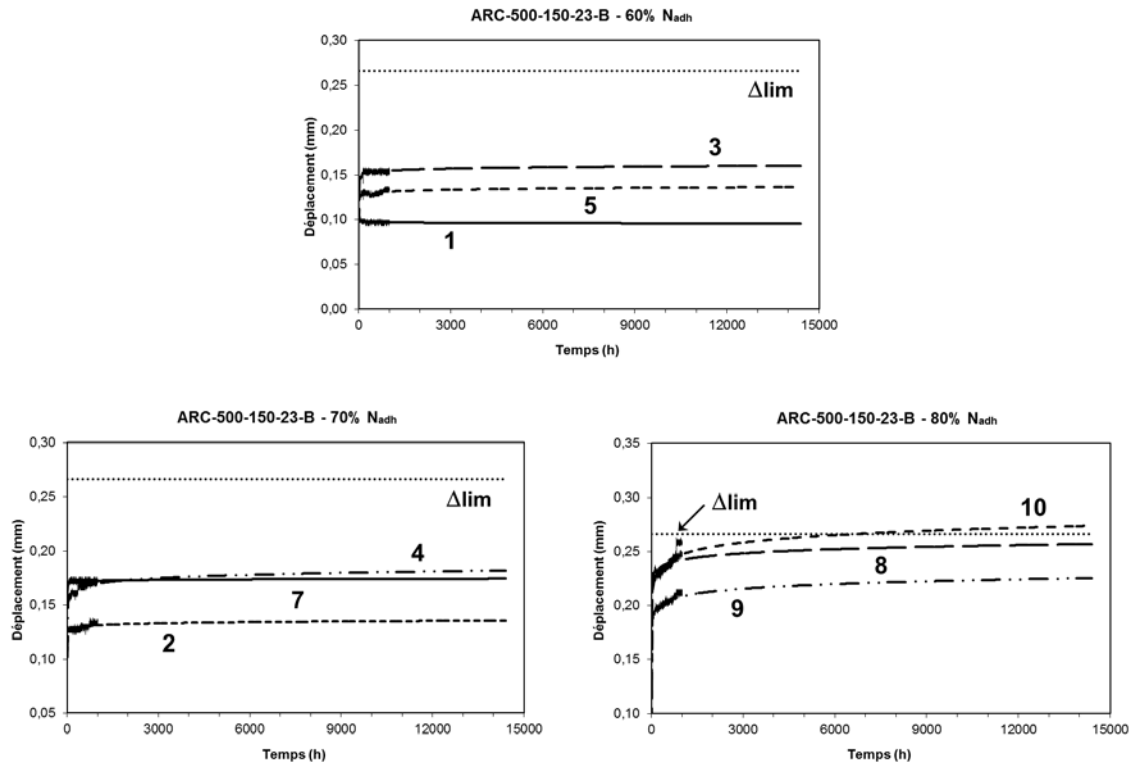


Figure C-5 Projections logarithmiques Groupe 5. ARC-500-150-23-B.

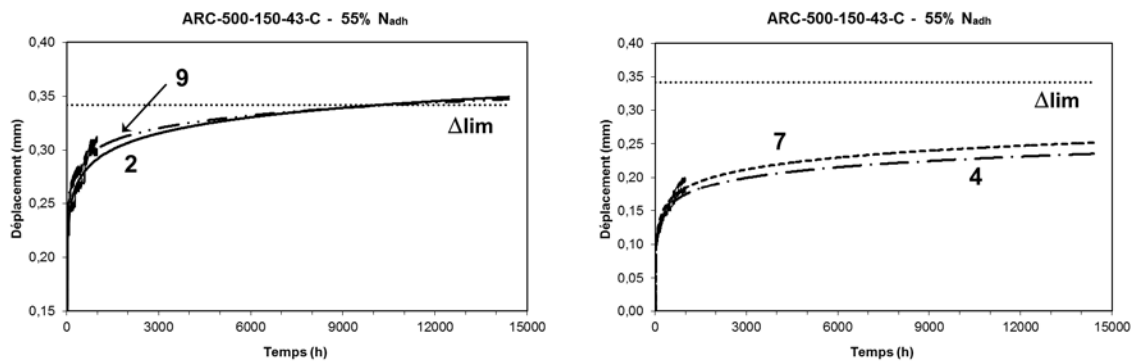


Figure C-6 Projections logarithmiques Groupe 6. ARC-500-150-43-C.

# ANNEXE D.

## PROJECTIONS APPROCHE FINDLEY

Cette Annexe présente les projections correspondantes à l'approche Findley à 10 ans (14400 heures - essais à 43°C) et à 50 ans (438000 heures - essais à 23°C), par groupe d'essais de chargement soutenu.

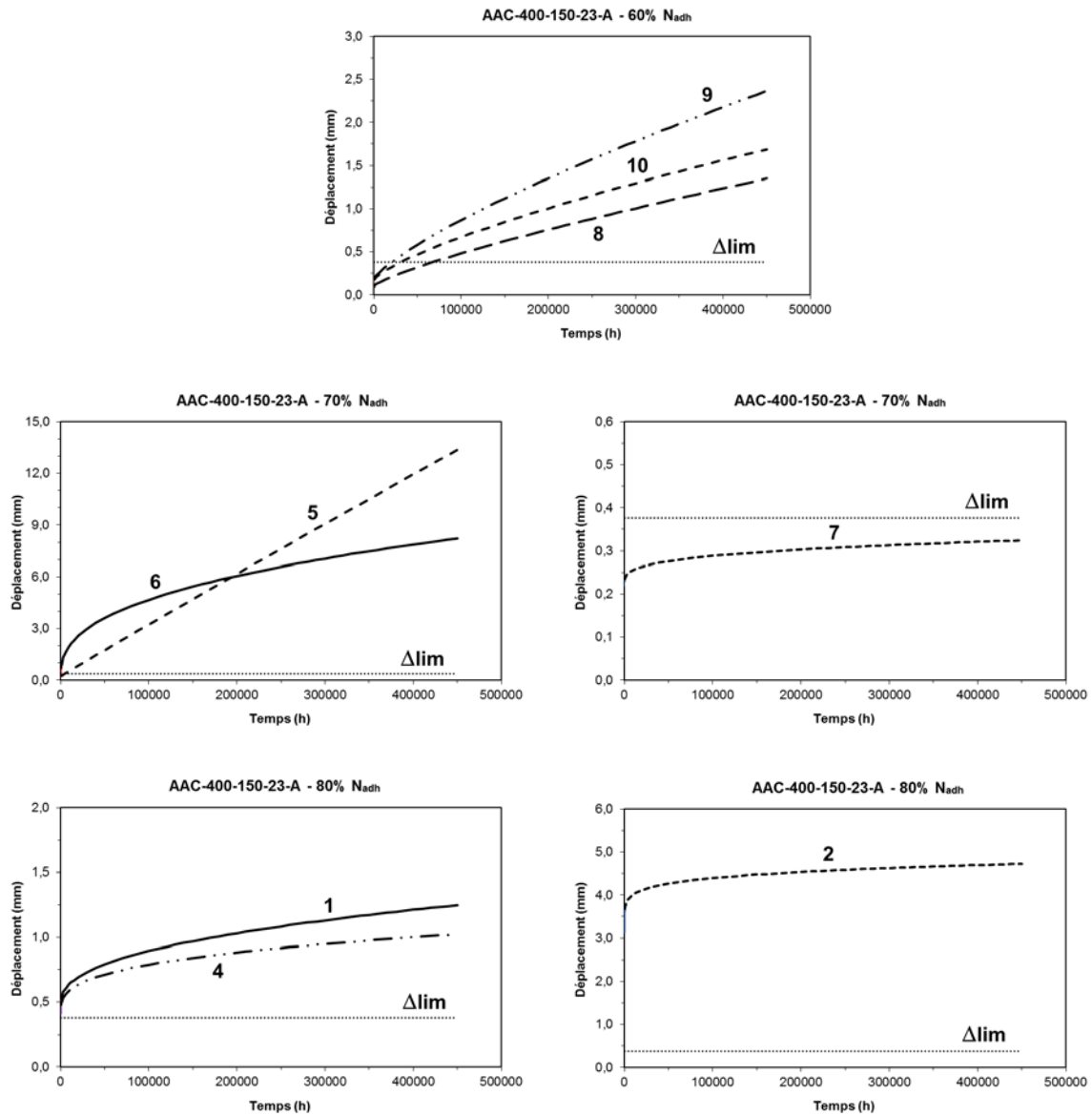


Figure D-1 Projections Findley - Groupe 1. AAC-400-150-23-A.

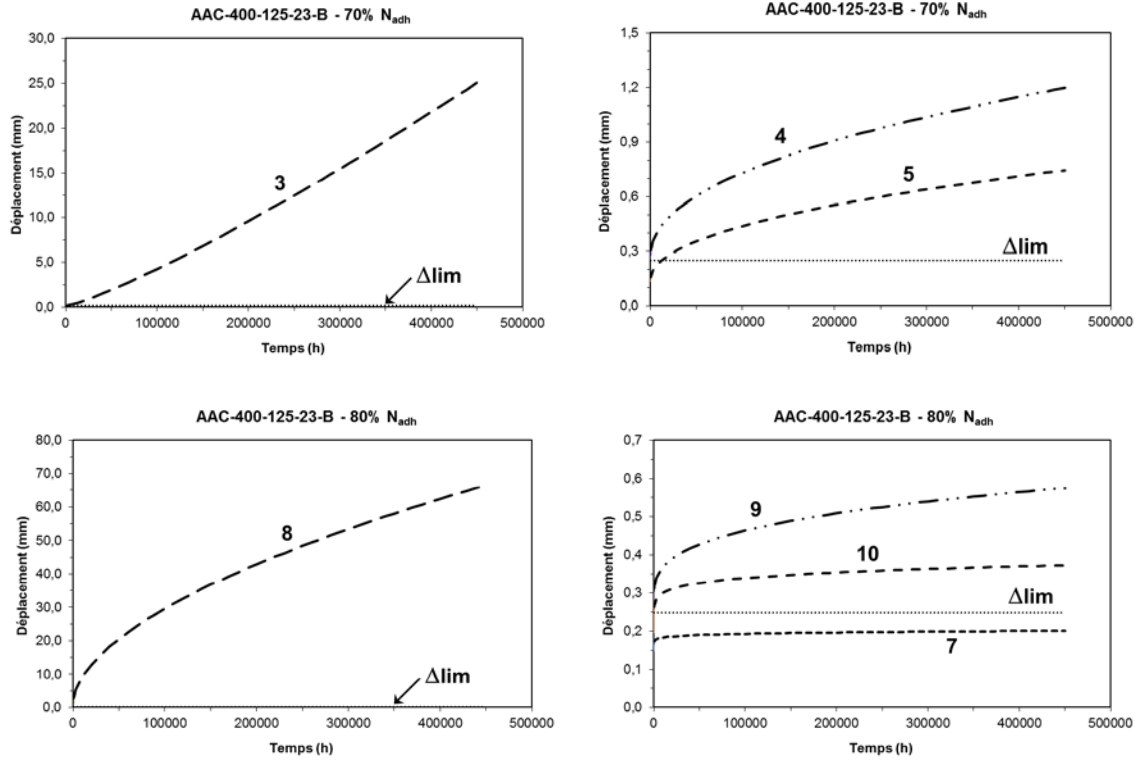


Figure D-2 Projections Findley - Groupe 2. AAC-400-125-23-B.

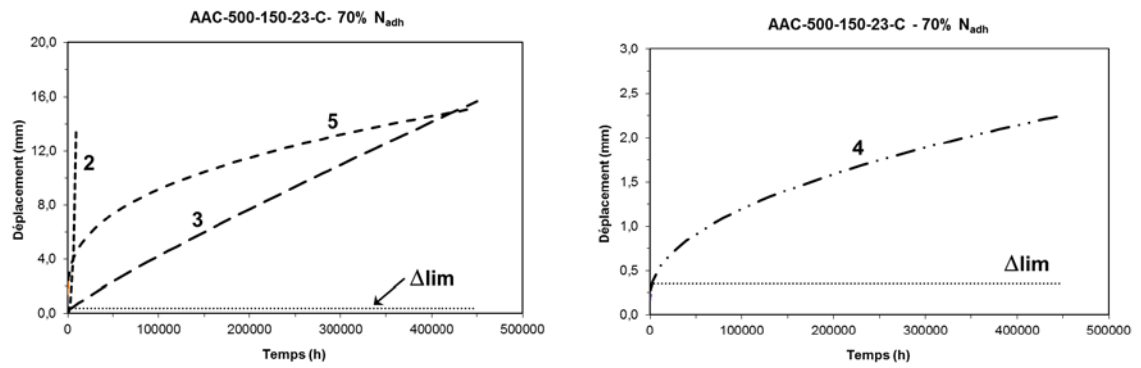


Figure D-3 Projections Findley - Groupe 3. AAC-500-150-23-C.

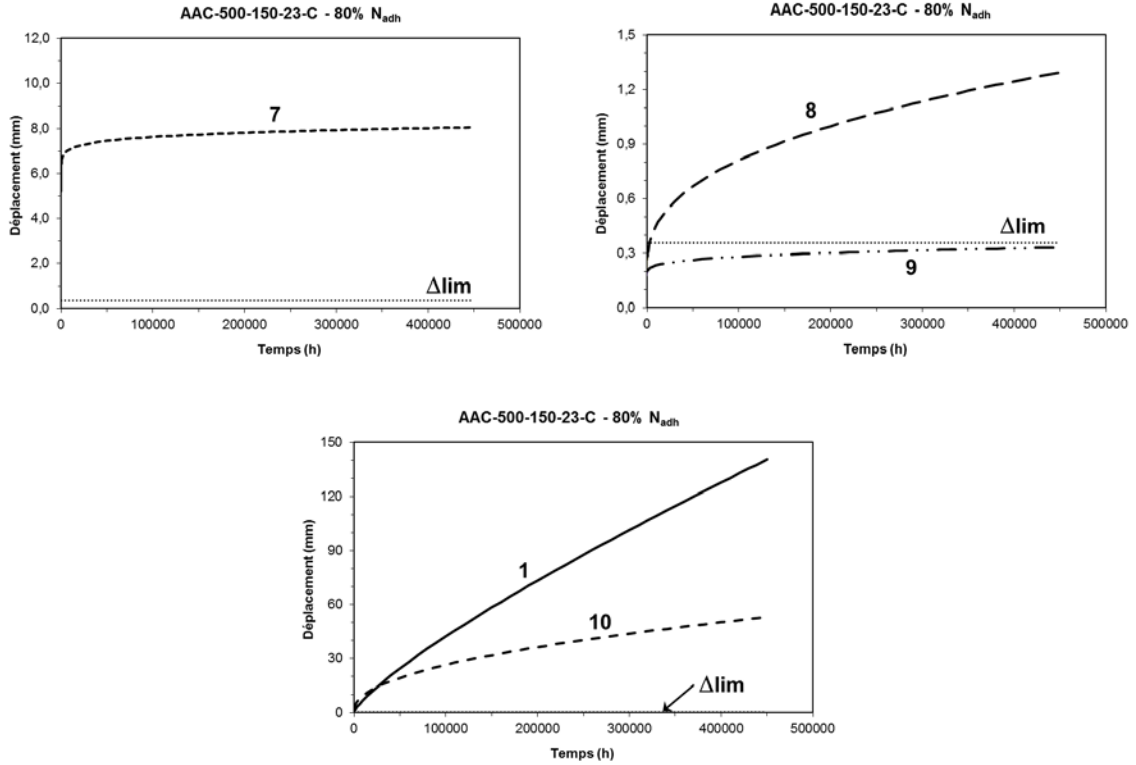


Figure D-3 (suite) Projections Findley - Groupe 3. AAC-500-150-23-C.

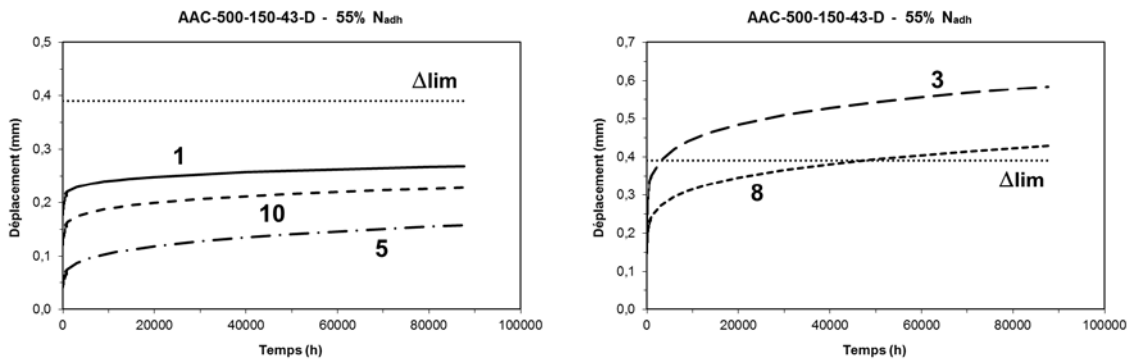


Figure D-4 Projections Findley - Groupe 4. AAC-500-150-43-D.

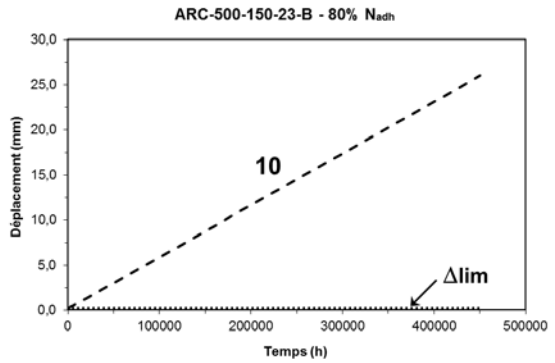
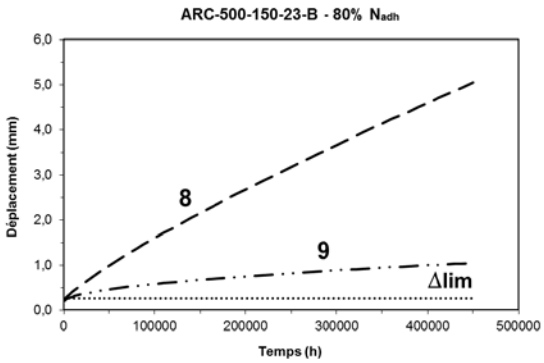
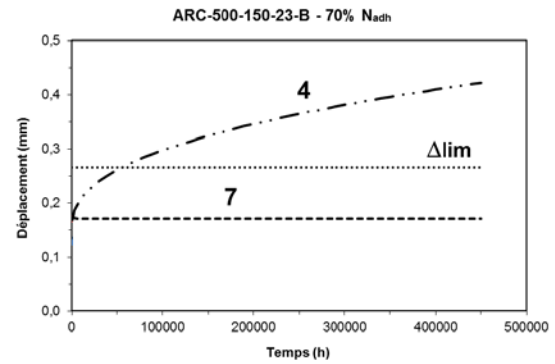
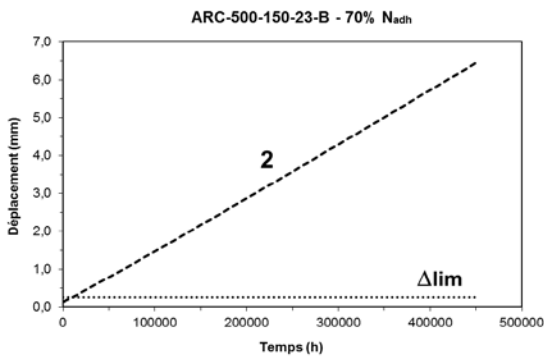
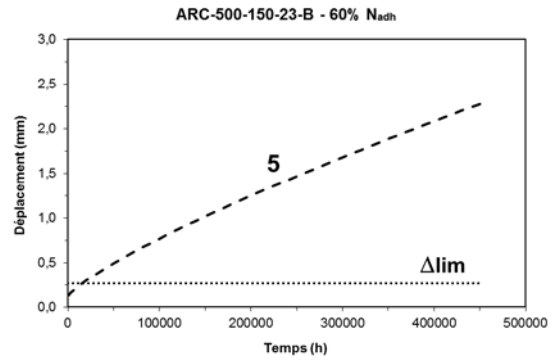
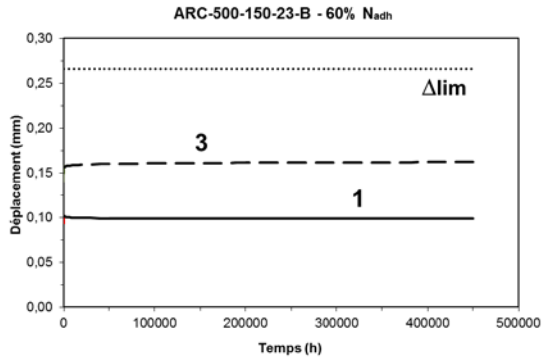


Figure D-5 Projections Findley - Groupe 5. ARC-500-150-23-B.

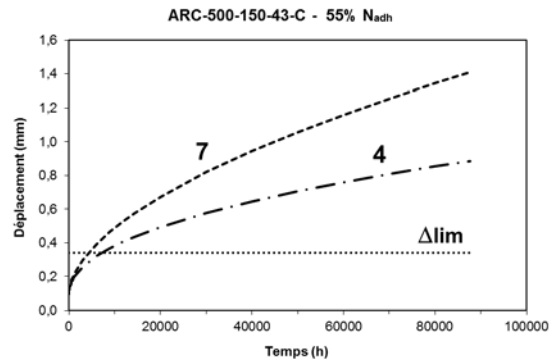
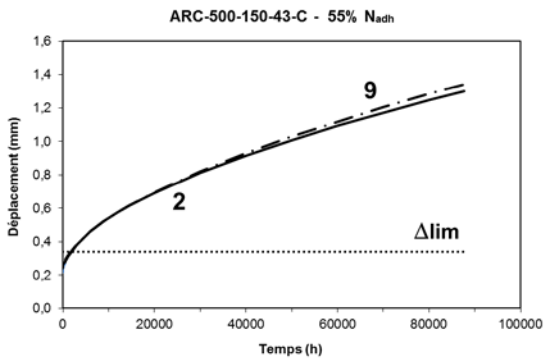


Figure D-6 Projections Findley - Groupe 6. ARC-500-150-43-C.

## ANNEXE E.

### PHOTOS

Voici quelques photos représentatives du projet de recherche :



Adhésif AAC



Adhésif AAC

Figure E-1 Blocs d'ancrage pour les essais statiques de traction.



Adhésif AAC,  $h_{ef} = 125$  mm



Adhésif ARC,  $h_{ef} = 150$  mm

Figure E-2 Surface de rupture typique des ancrages



7 jours



28 jours

Figure E-3 Arrachement des ancrages pour différents temps de cure. Adhésif AAC.



4 heures

24 heures

7 jours

28 jours

Figure E-4 Arrachement des ancrages pour différents temps de cure. Adhésif ARC.



Adhésif AAC - Acier 400 W

Adhésif ARC - Acier 500 W

Figure E-5 Blocs d'ancrage pour les essais de chargement soutenu.



Groupe 1 - 60%  $N_{adh}$

Groupe 2 - 70%  $N_{adh}$

Groupe 3 - 70%  $N_{adh}$

Figure E-6 Essais du chargement soutenu en cours. Adhésif AAC - 23°C.





Groupe 5 - 60% et 70%  $N_{adh}$   
 Figure E-7 Essais du chargement soutenu en cours. Adhésif ARC – 23°C.



Adhésif AAC - Groupe 4 et  
 Adhésif ARC - Groupe 6

Chambre des essais et contrôle de température

Figure E-8 Essais du chargement soutenu en cours. AAC et ARC. 43°C - 55%  $N_{adh}$



Groupe 1, #2      Groupe 2, #1      Groupe 2, #2      Groupe 3, #7  
 Figure E-9 Défaillance des ancrages sous chargement soutenu. Adhésif AAC - 23°C.

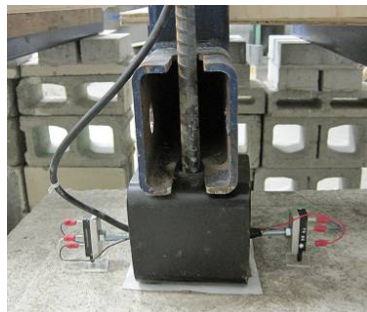


Figure E-10 Détails du montage des essais de chargement soutenu.

# LISTE DES RÉFÉRENCES

- ACI COMMITTEE 318 (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-11). Appendix D: Anchoring to Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills MI, États-Unis, p. 409-439.
- ACI COMMITTEE 355 (2011). *Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete and Commentary (ACI 355.4-11)*. American Concrete Institute, Farmington Hills MI, États-Unis, 55 p.
- ALIG, Ingo, Dirk LELLINGER, Frank BÖHM, Ralf NEUERBURG et Friedrich WALL (2012). *Curing and Load Performance of Adhesive Anchors Systems Installed at Low Temperatures*. In “Understanding Adhesive Anchors: SP-283-13”, American Concrete Institute, Farmington Hills MI, États-Unis, 13 p.
- AMBEX (2012). *AMBEX<sup>®</sup> AAC<sup>MD</sup>. Cartouches d’ancrage cimentaires pour barres d’armature et goujons. Information technique*. AMBEX Technologies de béton Inc., Laval QC, Canada, 2 p.
- AMBEX (2012). *AMBEX<sup>®</sup> ARC<sup>MD</sup>. Cartouches d’ancrage cimentaires à prise rapide pour barres d’armature et goujons. Information technique*. AMBEX Technologies de béton Inc., Laval QC, Canada, 2 p.
- ASMUS, Jörg (2012). *Design Method for Splitting Failure Mode of Adhesive Anchor Systems*. In “Understanding Adhesive Anchors: SP-283-6”, American Concrete Institute, Farmington Hills MI, p. 1-5.
- ASTM STANDARDS (2011). *Standard Test Methods for Testing Bond Performance of Bonded Anchors (ASTM E1512-01, Reapproved 2007)*. ASTM International, West Conohocken PE, États-Unis, 5 p.
- BAJER, Miroslav et Jan BARNAT (2011). *Analysis of Bonded Anchor in Combined Concrete-Bond Failure Mode*. In “4th WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG '11)”, Corfu, Grèce, Juillet 14 à 16, 4 p.
- BAJER, Miroslav et Jan BARNAT (2012). *The Glue-Concrete Interface of Bonded Anchors*. In “Construction and Building Materials”, N°34, Elsevier Ltd, Amsterdam, Pays-Bas, 8 p.
- CALTRANS (2012). *Bridge Design Aids: 5-81. Anchorage to Concrete*. Technical Publications, California Department of Transportation, Sacramento CA, États-Unis, Janvier, 21 p.

- COLAK, Adnan (2007). *Estimation of Ultimate Tension Load of Methylmethacrylate Bonded Steel Rods into Concrete*. In “International Journal of Adhesion and Adhesives”, N°27, Elsevier Ltd, Amsterdam, Pays-Bas, 8 p.
- COOK, Roland A., Jennifer L. BURTZ et Marcus H. ANSLEY (2003). *Design Guidelines and Specifications for Engineered Grouts*. Report N° BC354 RPWO 48, University of Florida, Department of Civil Engineering, Gainesville FL, États-Unis, p. 1-28.
- COOK, Ronald A. et Robert C. KONZ (2001). *Factors Influencing Bond Strength of Adhesive Anchors*. ACI Structural Journal, Technical Paper : Title N°98-S8, États-Unis, Janvier-Février, 11 p.
- DAVIS, Todd M. et Ronald A. COOK (2012). *Stress versus Time-to-Failure Test Method for Evaluating the Sustained Load Performance of Adhesive Anchor Systems in Concrete*. In “Understanding Adhesive Anchors: SP-283-8”, American Concrete Institute, Farmington Hills MI, États-Unis, 11 p.
- EKENEL, Mahmut et Brian GERBER (2012). *Building Code Requirements for Inspection of Adhesive Anchors in Concrete*. In “Understanding Adhesive Anchors: SP-283-5”, American Concrete Institute, Farmington Hills MI, États-Unis, 7 p.
- EL MENOIFY, Adham Mohamed (2010). *Creep Behavior of Post-Installed Adhesive Anchors under Various Sustained Load Levels and Environmental Exposures*. M.Sc. Thesis, University of Waterloo, Department of Civil Engineering, Waterloo, ON, Canada. 105 p.
- ELIGEHAUSEN, Rolf et Tamas BALOGH (1995). *Behavior of Fasteners Loaded in Tension in Cracked Reinforced Concrete*. ACI Structural Journal, Technical Paper : Title N°92-S35, États-Unis, Mai-Juin, 15 p.
- ELIGEHAUSEN, Rolf, Ronald BLOCHWITZ et Werner FUCHS (2012). *Behavior and Design of Adhesive Anchors Under Sustained Load*. In “Understanding Adhesive Anchors: SP-283-9”, American Concrete Institute, Farmington Hills MI, États-Unis, 13 p.
- ELIGEHAUSEN, Rolf, Ronald A. COOK et Jörg APPL (2006). *Behavior and Design of Adhesive Bonded Anchors*. ACI Structural Journal, Technical Paper : Title N°103-S83, États-Unis, Novembre-Décembre, 11 p.
- ELIGEHAUSEN, Rolf, Isabelle HOFACKER et Steffen LETTOW (2001). *Fastening Technique – Current Status and Future Trends*. Institute of Construction Materials, Université de Stuttgart, Allemagne, 17 p.

- ELIGEHAUSEN, Rolf et John A. SILVA (2008). *The Assessment and Design of Adhesive Anchors in Concrete for Sustained Loading*. HILTI Corporation, Schaan, Liechtenstein, Janvier, 20 p.
- EOTA (2010). *Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete (ETAG 001, Amended 2010). Annex C: Design Methods for Anchorages*. European Organization for Technical Approvals, Bruxelles, Belgique, 34 p.
- EOTA (2008). *Guideline for European Technical Approval (ETA) of Metal Anchors for Use in Concrete (ETAG 001, Amended 2008). Part Five: Bonded Anchors*. European Organization for Technical Approvals, Bruxelles, Belgique, 34 p.
- FUCHS, Werner et John SILVA (2012). *EOTA Approach to Qualification and Design of Post-Installed Adhesive Anchors for Fire Exposure*. In “Understanding Adhesive Anchors: SP-283-18”, American Concrete Institute, Farmington Hills MI, États-Unis, 8 p.
- GRZESIK, Peter (2012). *Effect of Fly Ash as Cement Replacement on the Short Term Bond Strength of Adhesive Anchors Systems*. In “Understanding Adhesive Anchors: SP-283-14”, American Concrete Institute, Farmington Hills MI, États-Unis, 9 p.
- HILTI (2012). *HIT RE-500 SD: Epoxy Adhesive Anchoring System*. Product Technical Guide. HILTI Inc, Tulsa OK, États-Unis, 39 p.
- HIVIN, Gérald (2012). *Chapitre 3 : Adhérence Acier-Béton*. [http://public.iutenligne.net/structure techno/Hivin/beton\\_arme/documents/Cours\\_BA\\_ST\\_2\\_chap\\_3.pdf](http://public.iutenligne.net/structure techno/Hivin/beton_arme/documents/Cours_BA_ST_2_chap_3.pdf) (page consultée le 15 mai 2012).
- ICC ES (2012). *Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements (AC308)*. International Code Council Evaluation Service Inc., Whittier CA, États-Unis, 125 p.
- JAIN, Priyank (2005). *Effect of Coarse Aggregate on the Strength of Adhesive-Bonded Anchors*. M.Sc. Thesis, University of Florida. Department of Civil Engineering, Gainesville FL, États-Unis. 94 p.
- MCVAY, Michael, Ronald A. COOK et Kailash KRISHNAMURTHY (1996). *Pullout Simulation of Post-installed Chemically Bonded Anchors*. In “Journal of Structural Engineering”, Vol. 22, N° 9, American Society of Civil Engineers, États-Unis, Septembre, 9 p.
- NAKANO, Katsuhiko, Yasuhiro MATSUZAKI et Tomoaki SUGIYAMA (2012). *Outline of Japanese Guideline for Influence of the Embedment Length and the Edges on Tensile Resistance of Post-Installed Bonded Anchors*. In “Understanding Adhesive Anchors: SP-283-7”, American Concrete Institute, Farmington Hills MI, États-Unis, p. 1-5.

- NCHRP (2009). *Adhesive Anchors in Concrete Under Sustained Load Conditions*. Report N°639, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington D.C., États-Unis, 139 p.
- NEMES, Rita et Eva LUBLOI (2011). *Application of Anchors Under Special Concrete Conditions*. In “Periodica Polytechnica, Civil Engineering”, Vol 55, N° 1, Budapest, Hongrie, p. 73-79.
- PILAKOUTAS, K., S. HAFEEZ et S. DRITSOS (1994). *Residual Bond Strength of Polymer Adhesive Anchored Reinforcement Subjected to High Temperatures*. In “Materials and Structures”, N°27, Springer Netherlands, Rotterdam, Pays-Bas, 5 p.
- PINOTEAU, Nicolas, Pierre PIMIANTA, Thierry GUILLET, Philippe RIVILLON et Sébastien RÉMOND (2011). *Effect of Heating Rate on Bond Failure of Rebars into Concrete Using Polymer Adhesives to Simulate Exposure to Fire*. In “International Journal of Adhesion and Adhesives”, N°31, Elsevier Ltd, Amsterdam, Pays-Bas, 11 p.
- POWERS FASTENERS (2010). *Mechanical Anchors. Specification and Design Manual*. Third Edition, Powers Fasteners Inc. États-Unis, p. 9-14 et 18-19.
- RANDL, Norbert et Oliver GUSELLA (2011). *Tragverhalten von Verbundankern in hoch und ultrahochfestem Beton (Behaviour of Adhesive Anchors in High Strength and Ultra High Performance Concrete)*. In “Beton und Stahlbetonbau”, Vol. 106, N° 8, Ernst und Sohn, Berlin, Allemagne, p. 561-573.
- ROBINSON, S.B. et A.M. SAID (2011). *Effect of Different Parameters on the Tensile Strength of Adhesive Anchors*. In “Structures Congress (Las Vegas, NA)”, Vol 1, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, États-Unis, p. 1850 - 1861.
- SIMPSON ANCHOR SYSTEMS (2010). *Systèmes d’ancrage et de fixation pour le béton et la maçonnerie 2009-2010 (Expiration 2012)*. Simpson Strong-Tie Company Inc. Brampton ON, Canada, 228 p.
- THOTA, Mahesh (2010). *Pull out Behavior of Epoxy Bonded Anchor Systems*. M.Sc. Thesis, University of Texas at San Antonio. Department of Civil and Environmental Engineering, San Antonio, TX, États-Unis. 89 p.
- WOLLMERSHAUSER, Richard E. et Lee MATTIS (2008). *Understanding Adhesive Anchor Installation and Inspection*. In “Concrete International”, États-Unis, Décembre, 11 p.