

# ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET DU FLUAGE DES ANCRAGES CIMENTAIRES DANS LES SUBSTRATS DE BÉTON

Luz Polo<sup>1</sup>, Richard Gagné<sup>1</sup> et Jacques Bertrand<sup>2</sup>

1. Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB)  
Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Sherbrooke, Canada

2. AMBEX Technologies de béton, Laval, Canada

**RÉSUMÉ** : Les ancrages adhésifs cimentaires 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, etc. Un ancrage adhésif cimentaire comprend trois composants: l'élément d'ancrage (une barre d'armature ou une tige filetée) ; le matériau cimentaire et le substrat (en béton ou en maçonnerie). Les charges imposées sur les barres d'ancrage sont transmises au substrat par adhérence chimique et liaison mécanique entre les composants. 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. Le projet de recherche, en partenariat avec l'entreprise Ambex, a pour objectif d'étudier les propriétés mécaniques et le fluage à long terme d'ancrages cimentaires fabriqués avec des barres d'armature 15M ancrées à différentes profondeurs comprises entre 100 et 200 mm. Le projet de recherche a permis de montrer que les ancrages cimentaires constitués de barres d'armature 15M (400 MPa) ancrées à 150 mm de profondeur possèdent une bonne ductilité à la rupture. Pour cette configuration d'ancrage, la moyenne de la charge à la perte d'adhérence est de 80 kN et la contrainte d'adhérence maximale moyenne est de 8,0 MPa. La performance mécanique des ancrages cimentaires est fortement dépendante des conditions d'installation. Une préparation imparfaite des trous de forage ne permet pas de développer toute la capacité prévue d'un ancrage. La nouvelle procédure recommandée par le comité technique ACI 355.4-11 pour la projection des déplacements de fluage à long terme (approche Findley) conduit à des déplacements de fluage globalement plus élevés que ceux calculés à partir de l'approche logarithmique recommandée par la norme ASTM E1512. Les ancrages cimentaires fabriqués avec des barres d'armature 15M (500 MPa) ancrées à 200 mm de profondeur possèdent un déplacement projeté de fluage à 600 jours et à 50 ans conforme aux spécifications respectives de la norme ASTM E1512 et du comité ACI 355.4-11.

## 1. INTRODUCTION

### 1.1 Les ancrages adhésifs

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. Ils sont utilisés dans les ouvrages dans lesquels les forces statiques de traction sont prédominantes. 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.

Les ancrages adhésifs sont constitués de barres d'armature conventionnelles ou de tiges filetées sans tête. Ils sont installés dans des substrats de béton en forant un trou dont le diamètre est moins de 1,5 fois celui de la barre ou de la 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 [1]. 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 les polyesters.
- 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.
- Ancrages hybrides. Ils contiennent des matériaux polymériques, mais aussi des agents de cure, des fillers, et des matériaux cimentaires.

Les adhésifs commerciaux sont disponibles en trois formats (Figure 1) [2, 3]:

1. Capsules cimentaires dans une gaine perméable, lesquelles 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 le site.

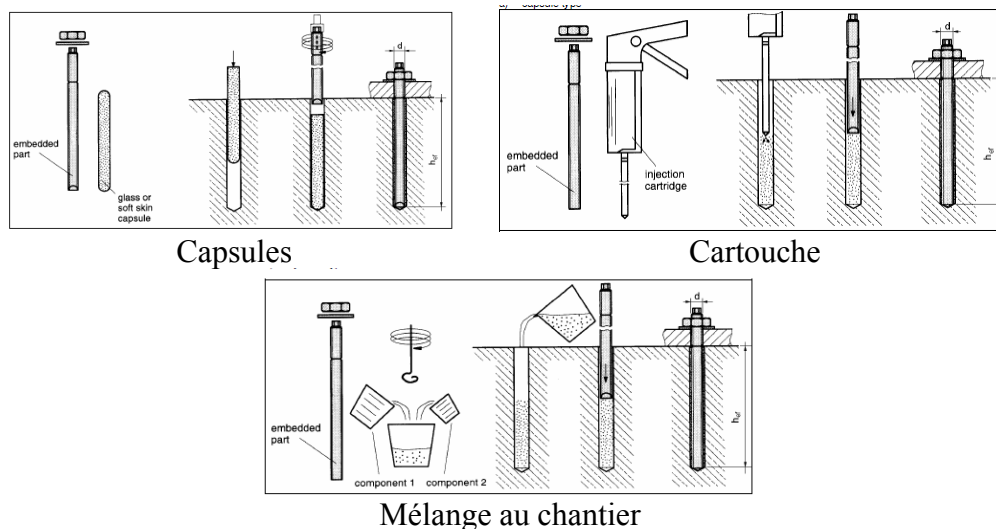


Figure 1- Formats et installation des matériaux adhésifs pour ancrages adhésifs [2]

La contrainte d'adhérence  $\tau$  est la valeur qui établit la performance structurale d'un ancrage adhésif. Elle est déterminée à partir de la charge ultime en traction de l'ancrage  $N_{u,}$  obtenue des

essais statiques de traction (essais d'arrachement). Toutefois, si la défaillance de l'adhésif se produit avant d'atteindre la charge ultime  $N_u$ , la valeur de  $\tau$  doit être calculée avec la charge à la perte d'adhérence de l'ancrage  $N_{adh}$ , ayant une valeur toujours inférieure à celle de la charge  $N_u$ . Cela s'explique parce qu'au moment de la défaillance de l'adhésif (perte d'adhérence), les barres d'ancrage présentent un déplacement visible (sortie des trous d'ancrage), et ce déplacement peut être considéré inadmissible dans l'utilisation des ancrages adhésifs en service, même si les ancrages sont capables de prendre encore des charges, lors de la perte d'adhérence [4].

Les trois principaux types de rupture des ancrages adhésifs (Figure 2) sont les suivants [2, 4, 5] :

- Rupture du lien adhésif – arrachement : 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 est le mode de rupture considéré dans la plupart des cas de design [6]. Le modèle d'adhérence uniforme est relié à la rupture du lien adhésif. Ce modèle établit que la valeur de la contrainte  $\tau$  reste uniforme dans toute la section d'ancrage  $A = \pi*d*h_{ef}$ , où  $d$  est le diamètre de la barre ou tige d'ancrage, et  $h_{ef}$  est la profondeur effective d'ancrage. La valeur de  $N_u$  est estimée avec l'équation 1.1 [5, 7] :

$$N_u = \tau * \pi * d_o * h_{ef} \quad (1.1)$$

- Rupture du substrat en cône : 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 [7].
- Rupture du substrat au bord de l'élément : 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 [8].

La rupture de la barre ou 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. [2, 9].

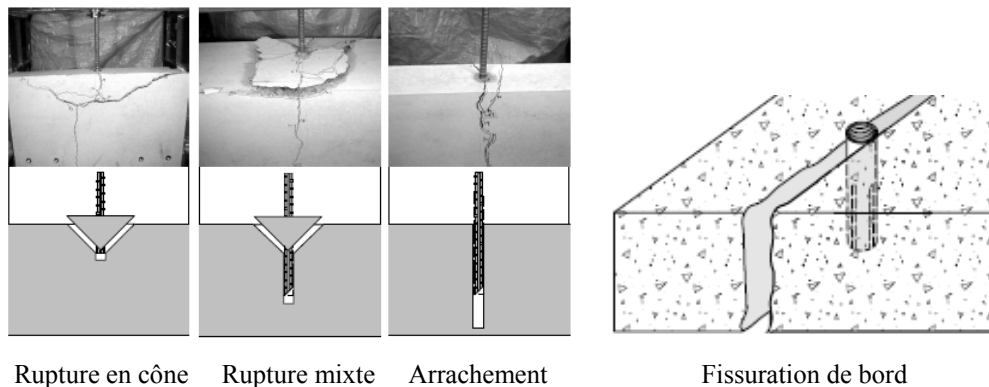


Figure 2- Modes de rupture des ancrages adhésifs [6, 10].

## 1.2 Comportement des ancrages sous chargement soutenu

Les essais sous chargement soutenu sont conçus pour évaluer la performance d'un ancrage adhésif soumis à des charges de traction à moyen et à long terme. Les ancrages adhésifs destinés à résister à des charges soutenues à court et à long terme doivent passer les essais de la norme ASTM E1512-01, ainsi que les essais de qualification de la norme ACI 355.4-11 ou des normes équivalentes [2, 11, 12].

Les ancrages adhésifs polymériques sous chargement statique se comportent comme des structures rigides, tandis que sous chargement soutenu, tous les ancrages présentent divers degrés de fluage [9]. Les graphiques des déplacements en fonction du 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 3). La contrainte initiale de l'adhérence  $\tau$ , estimée par calcul ou lors des essais statiques de traction, peut être réduite d'un pourcentage compris entre de 20% et 50% pour tenir compte du comportement des ancrages à long terme [2, 4, 13]. En effet, certains adhésifs polymériques éprouvent une réduction très importante de la performance, suite aux chargements soutenus.

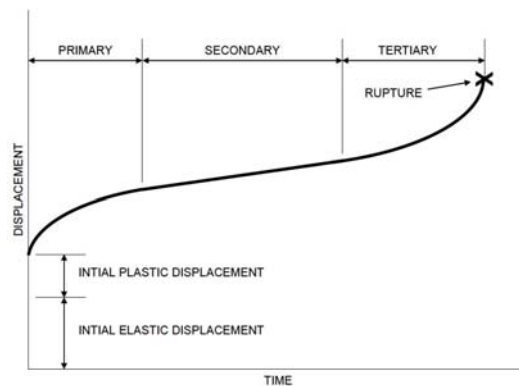


Figure 3- Comportement sous chargement soutenu, charge de traction constante [12]

## 1.3 Normes d'essai et de qualification des ancrages adhésifs sous chargement soutenu

La procédure d'essai ASTM E1512-01 (2007) - *Standard Test Methods for Testing Bond Performance of Bonded Anchors* [11] s'applique à des éléments de béton et de maçonnerie. Elle contient une procédure expérimentale destinée à mesurer la performance des ancrages sous chargement soutenu (déplacement de fluage). Les essais proposés sont en conditions confinées ou non confinées, à température ambiante (23°C) et élevée (43°C). La charge appliquée pour le chargement soutenu correspond à 40% de la charge moyenne statique à la perte d'adhérence ( $N_{adh}$ ). La durée d'un essai de chargement soutenu est de 1000 heures (42 jours).

Une relation expérimentale du 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 à l'aide d'une fonction logarithmique. Le déplacement prévu  $\Delta(t)$  est calculé avec l'équation 1.2, où le temps  $t$  est indiqué en heures, et les constantes  $c$  et  $b$  sont déterminées par la méthode des moindres carrés (Figure 4) :

$$\Delta(t)_{[mm]} = c * \ln(t) + b \quad (1.2)$$

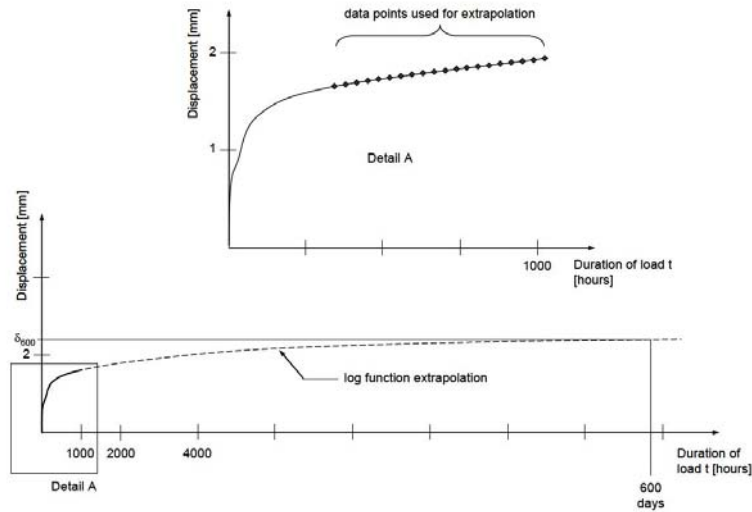


Figure 4- Courbe typique déplacement – temps, projection logarithmique ASTM E1512-07 [14]

Le document technique ACI 355.4-11: *Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete* [4] est basé sur la norme ICC-ES AC308 [15]. Les critères de design des ancrages adhésifs suivent les directives de la norme ACI 318, Annexe D [16]. Les essais comprennent des substrats de béton fissuré et non fissuré. La procédure d'essais ASTM E1512-01 est utilisée pour les essais de chargement soutenu. Néanmoins, la charge appliquée pour les essais de chargement soutenu est 55% de la charge moyenne statique à la perte d'adhérence ( $N_{adh}$ ). Ce niveau de chargement est plus élevé par rapport à la charge de 40 % de  $N_{adh}$  spécifiée dans la norme ASTM E1512. La durée d'un essai de chargement soutenu est de 1000 heures (42 jours).

À partir des données expérimentales déplacement – temps, les déplacements de fluage sont extrapolés jusqu'à 50 ans (pour les essais à la température ambiante) à l'aide d'une loi de puissance (modèle de Findley). Le déplacement à un temps donné  $\Delta(t)$  est calculé avec l'équation 1.3, où  $\Delta_{t=0}$  (mm) est le déplacement élastique mesuré au début des essais de chargement soutenu,  $t$  (heures) est le temps projeté, et  $a$  et  $b$  sont des constantes déterminées expérimentalement par régression (Figure 5).

$$\Delta(t)_{[mm]} = \Delta_{t=0} + a * t^b \quad (1.3)$$

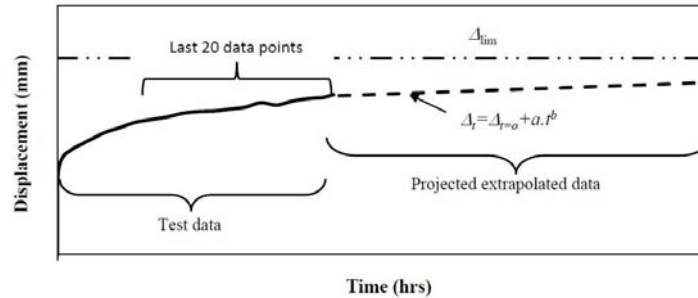


Figure 5- Courbe typique déplacement – temps pour l’extrapolation du déplacement de fluage à 50 ans – projection Findley ACI 355.4-11 [17]

## 2. BUT DE LA RECHERCHE

Le programme de recherche vise à étudier les propriétés mécaniques à court et à long terme des ancrages cimentaires soumis à des sollicitations axiales d’arrachement. L’adhésif cimentaire Ambex AAC® utilisé pour ancrer les barres d’armature est commercialisé par l’entreprise AMBEX [18]. Les ancrages testés sont des barres d’armature 15M ancrées dans des massifs de béton de 20 à 25 MPa de résistance nominale.

Le programme de recherche vise les objectifs spécifiques suivants :

- Déterminer la contrainte d’adhérence ( $\tau$ ) avec le substrat de béton.
- Étudier la relation entre la profondeur d’ancrage ( $h_{ef} = 100, 125, 150$  et  $200$  mm), la charge à la perte d’adhérence ( $N_{adh}$ ) et la charge ultime ( $N_u$ ).
- Étudier l’influence du mode d’installation sur la résistance à l’arrachement.
- Étudier et modéliser le déplacement d’un ancrage cimentaire sous chargement soutenu (déplacement de fluage).

## 3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODES D’ESSAIS

### 3.1 Adhésif cimentaire

L’adhésif cimentaire étudié est un coulis de ciment à retrait compensé, prémélangé à sec et enrobé dans une gaine perméable à l’eau (Figure 6). Le matériau cimentaire contient un liant à base d’aluminat de calcium, mélangé avec du sable et des adjuvants.



Figure 6- Gains de textile perméable contenant l’adhésif cimentaire

### 3.2 Fabrication et installation des ancrages

Les forages sont réalisés à l'aide d'un foret rotatif avec percussion et à pointe au carbure. Le diamètre des trous est  $d_o = 22$  mm (7/8 po.). Durant le perçage, un trépied est utilisé pour assurer la verticalité des trous. Les trous sont nettoyés à l'eau et à l'aide d'un jet d'air comprimé, selon les recommandations du fabricant. Les barres sont ancrées dans des blocs de béton de 500 x 450 x 1500 mm, selon le patron d'ancrage typique présenté à la Figure 7.

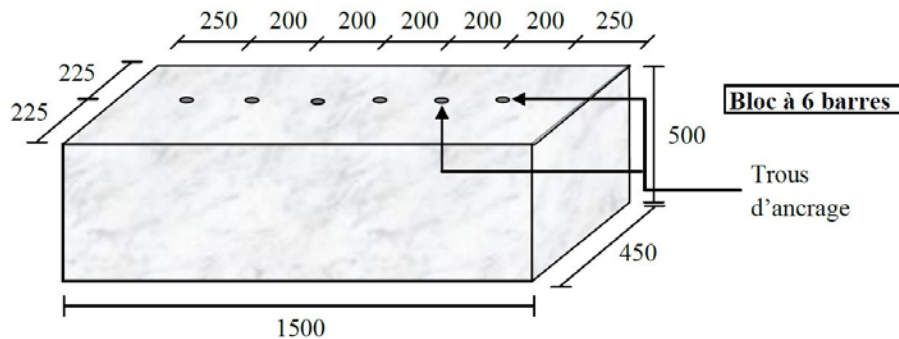


Figure 7- Substrat de béton typique utilisé pour installer les ancrages cimentaires

Les gaines perméables contenant l'adhésif cimentaire sont immergées dans un seau d'eau propre, pendant une minute et demie. Elles sont ensuite placées dans les trous, sans enlever la gaine protectrice. Les gaines ont une longueur de 300 mm, ce qui excède la profondeur du trou ( $h_{ef}$ ). La longueur excédentaire est coupée et jetée. Les barres sont enfoncées dans chaque trou à l'aide d'une masse, sans les tourner, et jusqu'à l'atteinte de la profondeur d'ancrage choisie. La Figure 8 illustre les principales étapes de l'installation des ancrages.

### 3.3 Essais de traction statique pour la mesure de $N_{adh}$ et $N_u$

Pour les profondeurs d'ancrage choisies, les mesures de  $N_{adh}$  et  $N_u$  ont été obtenues en utilisant la procédure normalisée ASTM E488/E488M-10 pour tester des groupes de 5 ancrages. Le montage des essais comprend un vérin hydraulique ENERPAC RCH202, actionné par une pompe hydraulique portable ENERPAC ZE3440LB-HL. Le système de mesure est équipé d'une cellule de charge Tovey Engineering 2134, d'une capacité maximale de 890 kN (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 à un système d'acquisition de données qui enregistre la charge et le déplacement à toutes les secondes. La Figure 9 présente un aperçu du montage pour l'essai d'arrachement des ancrages.

### 3.4 Mesure du déplacement de l'ancrage sous chargement soutenu

Le déplacement des ancrages sous chargement soutenu (fluage) est mesuré à l'aide d'une procédure d'essai conforme à la norme ASTM E1512. L'essai comporte un bâti construit avec des profilés HSS en acier (Figure 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 à l'extrémité du double levier sont constituées des blocs de béton d'environ 13 kg chacun. Une longue tige 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 10). La base de l'ancrage est équipée de deux capteurs de déplacement BEI-Duncan 9600 localisés à environ 30 mm de la surface du substrat (Figure 10). Tous les capteurs ont été branchés à un système d'acquisition de données qui enregistre la charge et le déplacement de fluage avec un intervalle de 15 minutes, pendant les 42 jours d'essais.



Figure 8- Principales étapes pour le forage et l'installation des ancrages cimentaires



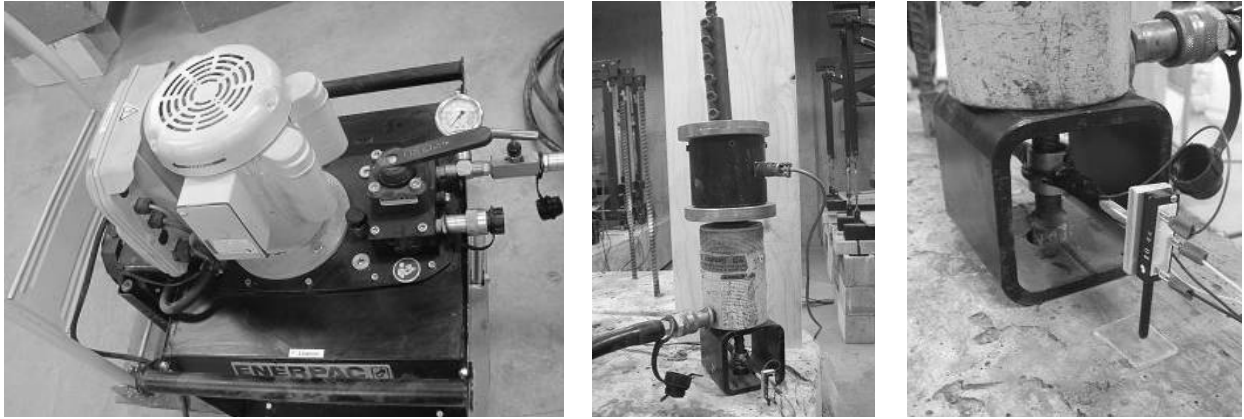


Figure 9- Aperçu des différents équipements et capteurs utilisés pour les essais de traction statique (arrachement).

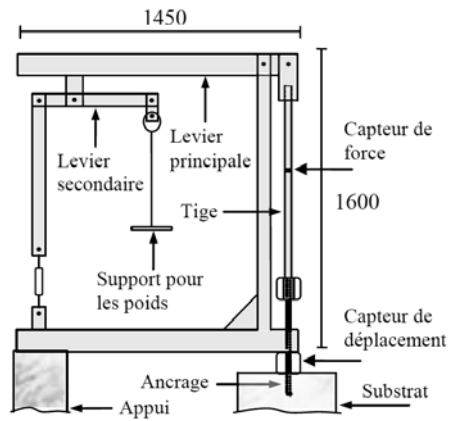
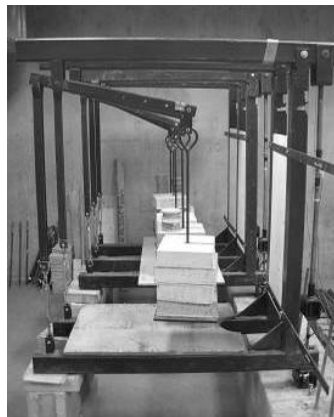


Figure 10- Aperçu des différents équipements et capteurs utilisés pour les essais de chargement soutenu (déplacement de fluage)

## 4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 4.1 Résistance mécanique du liant cimentaire

La figure 11 présente l'évolution de la résistance à la compression du liant cimentaire en fonction du temps. Chaque valeur de la résistance à la compression est la moyenne de 3 mesures d'écrasement à partir de cubes de 50 x 50 x 50 mm, selon la norme ASTM C109M. Les cubes ont été conservés dans le moule pendant 24 heures, puis conservés à 23°C et 100% d'humidité relative pendant 7 jours et 28 jours. Le liant cimentaire développe rapidement une résistance élevée à jeune âge. Cette résistance atteint approximativement 20 MPa à 4 heures, et plus de 35 MPa à 24 heures. La résistance à long terme (28 jours) est de 55 MPa.

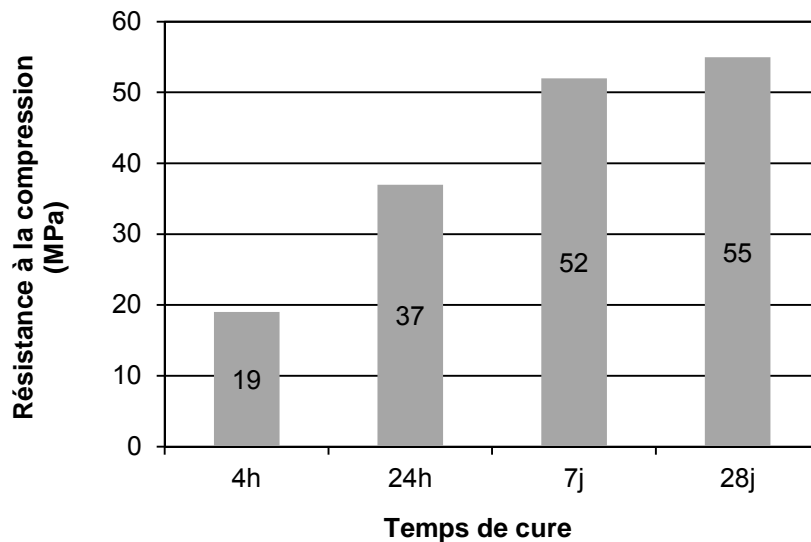


Figure 11- Évolution de la résistance à la compression du liant cimentaire en fonction du temps

### 4.2 Charge d'arrachement à la perte d'adhérence et charge ultime d'arrachement

La Figure 12 présente des courbes force-déplacement de 8 ancrages cimentaires testés à 28 jours : 8 barres d'armature 15M ancrées à 150 mm de profondeur dans un substrat de béton. La limite élastique de l'acier est de 400 MPa et la force à la plastification de la barre sous traction directe est de 80 kN.

Les courbes débutent par un domaine plus ou moins linéaire qui correspond à la déformation élastique de l'acier et du matériau cimentaire. Le changement de pente correspond au début de l'endommagement de l'adhérence entre le liant cimentaire et le substrat de béton. Cet endommagement débute typiquement tout juste sous la surface du béton, et se propage plus profondément avec l'augmentation de la charge, suivant le modèle d'adhérence uniforme décrit à la section 1.1. Les courbes de la Figure 12 montrent que les ancrages cimentaires possèdent une bonne ductilité, car la charge se maintient ou augmente jusqu'à un déplacement de la barre de plus de 5 mm. Pour cette série d'essais, la moyenne de la charge à la perte d'adhérence est de 80 kN.

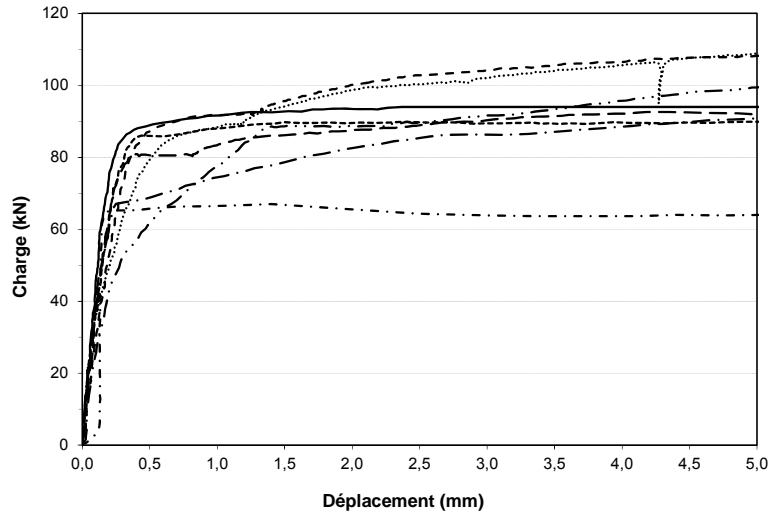


Figure 12- Courbe charge-déplacement des ancrages cimentaires avec des barres d'armature 15M (400 MPa) ancrées à 150 mm de profondeur

La Figure 13 présente l'influence de la profondeur d'ancrage ( $h_{ef}$ ) sur la charge moyenne à la perte d'adhérence ( $N_{adh}$ ) et la charge ultime moyenne ( $N_u$ ) d'un ancrage cimentaire testé en mode confiné selon la procédure ASTM E1512. Pour chaque configuration, une moyenne de 5 essais est effectuée pour calculer  $N_{adh}$  et  $N_u$ . Des barres 15M de nuance 400 MPa ont été utilisées pour les profondeurs d'ancrage de 100, 125 et 150 mm. Des barres 15M de nuance 500 MPa ont été utilisées pour la profondeur d'ancrage de 200 mm. Pour une profondeur d'ancrage de 200 mm, il est nécessaire d'utiliser un acier de 500 MPa pour garantir que la charge à la perte d'adhérence ( $N_{adh}$ ) ne dépasse pas la limite élastique de la barre.

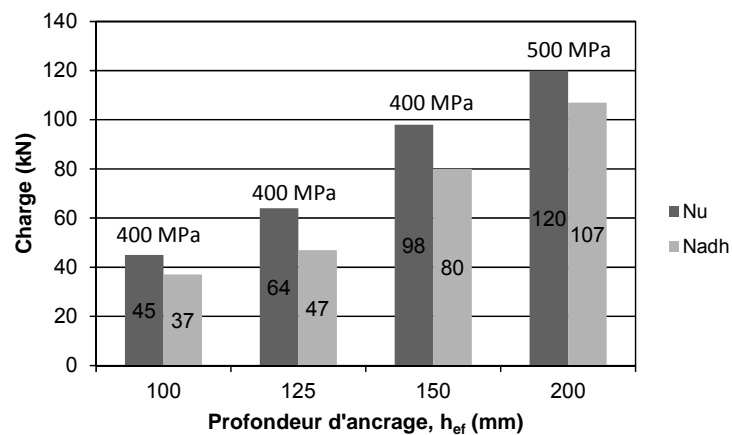


Figure 13- Charge moyenne à la perte d'adhérence ( $N_{adh}$ ) et charge moyenne ultime ( $N_u$ ) en fonction de la profondeur des ancrages fabriqués avec des barres 15M (la nuance de l'acier est de 400 MPa pour les profondeurs de 100, 125 et 150 mm et de 500 MPa pour la profondeur de 200 mm)

La résistance des ancrages cimentaires augmente avec la profondeur d’ancrage. La charge à la perte d’adhérence passe de 37 kN, pour une profondeur d’ancrage de 100 mm, à plus de 100 kN pour une profondeur d’ancrage de 200 mm (acier 500 MPa). Pour les profondeurs d’ancrage les plus faibles (100 et 125 mm), les charges mesurées par spécimen sont plus variables. Globalement, on remarque qu’une profondeur d’ancrage de 150 mm permet, en moyenne, d’atteindre la limite élastique d’une barre 15M de 400 MPa ( $F_y = 80$  kN) au moment de la rupture d’adhérence de l’ancrage ( $N_{adh}$ ). Pour une profondeur d’ancrage de 200 mm, la limite élastique d’une barre 15M de 500 MPa ( $F_y = 108$  kN) est atteinte au moment de la rupture de l’adhérence de l’ancrage ( $N_{adh}$ ).

### 4.3 Contrainte d’adhérence $\tau$ avec le substrat de béton

La contrainte d’adhérence  $\tau$  est calculée selon la recommandation du comité ACI 355.4-11. Le calcul est basé sur le modèle d’adhérence uniforme sous chargement axial (arrachement), décrit à la section 1.1 [6, 7]. La rupture correspond à la défaillance de la liaison adhésif-substrat. L’équation 1.4 permet de calculer la contrainte d’adhérence maximale à partir de la charge à la perte d’adhérence ( $N_{adh}$ ), du diamètre de la barre ( $d$ ) et de la profondeur d’ancrage ( $h_{ef}$ ) [4]. La contrainte d’adhérence  $\tau$  est fonction de la charge à la perte d’adhérence et des caractéristiques géométriques de l’ancrage. Pour un essai d’arrachement en configuration confinée (une plaque d’appui est utilisée pour empêcher la rupture en cône), la valeur de  $\alpha_{setup} = 0,75$  [4].

$$\tau = \alpha_{setup} * N_{adh} / (\pi * d * h_{ef}) \quad (1.4)$$

Le Tableau 1 présente des résultats d’essais d’arrachement statique réalisés sur un groupe de 8 ancrages cimentaires constitués de barres 15M (400 MPa) ancrées à une profondeur de 150 mm. La charge ultime moyenne est de 98 kN et la charge moyenne à la perte d’adhérence est de 80 MPa. La contrainte moyenne d’adhérence avec le substrat, calculée selon l’équation 1.4, est de 8,0 MPa.

Tableau 1- Charge à la perte d’adhérence ( $N_{adh}$ ), charge ultime ( $N_u$ ) et contrainte d’adhérence ( $\tau$ ) d’ancrages cimentaires avec des barres 15M ancrées à 150 mm de profondeur

Ancrage $h_{ef} = 150$ mm (15M - 400 MPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	Moyenne
$N_u$ (kN)	112	113	90	110	67	93	98	100	98
$N_{adh}$ (kN)	88	80	86	87	64	81	65	87	80
$\tau$ (MPa)	8,9	8,1	8,6	8,7	6,4	8,1	6,5	8,7	8,0

### 4.4 Influence des conditions d’installation sur la charge à la perte d’adhérence

Pour pouvoir développer pleinement toutes ses capacités mécaniques, un ancrage cimentaire doit être installé en respectant rigoureusement la procédure définie par le fabricant. Le comité ACI 355.4-11 recommande d'évaluer l'influence des conditions d'installation d'un système d'ancrage de manière à quantifier l'impact sur la résistance mécanique de possibles défauts ou manquements, lors de la mise en place d'un ancrage.

La Figure 14 présente l'influence des conditions d'installation sur la charge à la perte d'adhérence des ancrages cimentaires constitués de barre d'armature 15M (500 MPa) ancrées à 150 mm de profondeur. Pour chaque condition d'installation, la charge à la perte d'adhérence est la moyenne de 5 essais d'arrachement. Six conditions de mise en place ont été évaluées :

1. Aucune préparation du trou de forage. L'accumulation des poussières et des débris de forage au fond du trou empêche la pénétration complète de la barre. Les profondeurs d'ancrage sont comprises entre 80 mm et 150 mm.
2. Le trou de forage est lavé très sommairement en injectant de l'eau sans aucun autre nettoyage. Le trou n'est pas vidé complètement de son eau.
3. Le trou de forage est uniquement nettoyé, en éliminant les poussières avec un jet d'air comprimé.
4. Le trou de forage est nettoyé avec un jet d'air comprimé; il est lavé avec de l'eau propre; l'eau est enlevée avec un jet d'air comprimé pour atteindre l'état surface saturée sèche (SSS).
5. Le trou de forage est nettoyé avec un jet d'air comprimé; il est lavé avec de l'eau propre; l'eau est enlevée avec un jet d'air comprimé; un deuxième lavage à l'eau propre est effectué; l'eau est enlevée avec un jet d'air comprimé, pour atteindre l'état surface saturée sèche (SSS).
6. Le trou de forage est nettoyé avec un jet d'air comprimé; il est lavé avec de l'eau propre, mais le trou est rempli d'eau avant la mise en place de l'ancrage.

On remarque d'abord que la performance mécanique des ancrages cimentaires est très fortement dépendante des conditions d'installation. Par exemple, pour un même type d'ancrage, la charge à la perte d'adhérence peut passer de 80 kN à 30 kN lorsque les conditions d'installation du fabricant ne sont pas pleinement respectées (Figure 14). Un lavage imparfait des trous (conditions 2, 3 et 4) ne permet pas de développer toute la capacité prévue d'un ancrage. Le respect des conditions d'installation et de lavage du trou (deux séquences de soufflage-lavage suivies d'un soufflage final) permet de développer toute la capacité mécanique de l'ancrage. L'installation d'un ancrage dans un trou bien nettoyé, mais rempli d'eau (pour simuler une installation sous l'eau) engendre une perte de capacité de l'ancrage (condition 6).

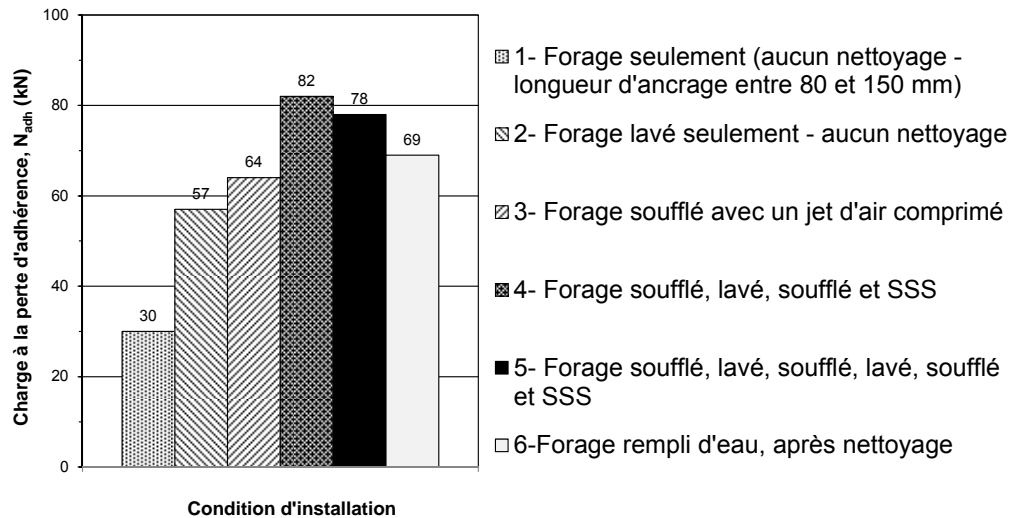


Figure 14- Charge à la perte d'adhérence ( $N_{adh}$ ) en fonction des conditions d'installation d'ancrages cimentaires constitués avec des barres d'armature 15M (500 MPa) ancrées à 150 mm de profondeur

## 4.5 Étude et modélisation du déplacement de fluage des ancrages sous chargement soutenu

### 4.5.1 Ancrage à 150 mm de profondeur chargés à 60% de $N_{adh}$

Le comportement sous chargement soutenu à long terme a été étudié en utilisant la procédure d'essai ASTM E1512. Les ancrages soumis aux essais sont des barres d'armatures 15M de nuance 400 MPa ancrées à 150 mm de profondeur. Un groupe de 3 ancrages a été soumis aux essais de chargement soutenu. Pour cette configuration, la charge moyenne à la perte d'adhérence  $N_{adh}$  est de 80 kN. Pour les essais de chargement soutenu, le comité ACI 355.4-11 exige d'appliquer une charge soutenue qui correspond à 55% de la charge moyenne à la perte d'adhérence [4]. Cependant, pour cette configuration particulière, il a été choisi d'appliquer une charge soutenue légèrement plus élevée, soit 60% de  $N_{adh}$ . La charge soutenue appliquée est donc de 48 kN.

Le déplacement initial des courbes de la Figure 15 (0,10 à 0,18 mm) à 0 heure correspond à la déformation élastique instantanée de l'ancrage sous la charge de 48 kN. Les déplacements de fluage évoluent très peu durant les 42 jours de l'essai. Le déplacement correspond au changement de position verticale de la partie inférieure de la barre d'armature par rapport à la surface du substrat de béton. À la fin de l'essai, la variation du déplacement est toujours inférieure à 25  $\mu\text{m}$ . Ce fluage est très faible puisqu'il correspond à moins de 20% de la déformation élastique initiale de l'ancrage.

Les déplacements de fluage à long terme peuvent être calculés selon deux approches (section 1.3, Figures 4 et 5). L'approche logarithmique, proposée dans la norme ASTM E1512 [11], permet de projeter le déplacement de fluage à 600 jours. Les données des 20 derniers jours de mesures sont utilisées pour déterminer les paramètres  $c$  et  $b$  de la loi logarithmique, en utilisant une analyse de

régression (section 1.3, Équation 1.2). La Figure 16 présente les projections logarithmiques obtenues pour les 3 ancrages testés. Dans tous les cas, le déplacement de fluage à 600 jours est inférieur à la limite maximale  $\Delta_{lim}$ . Cette limite est le déplacement moyen à la perte d'adhérence, soit 375  $\mu\text{m}$  (0,375 mm).

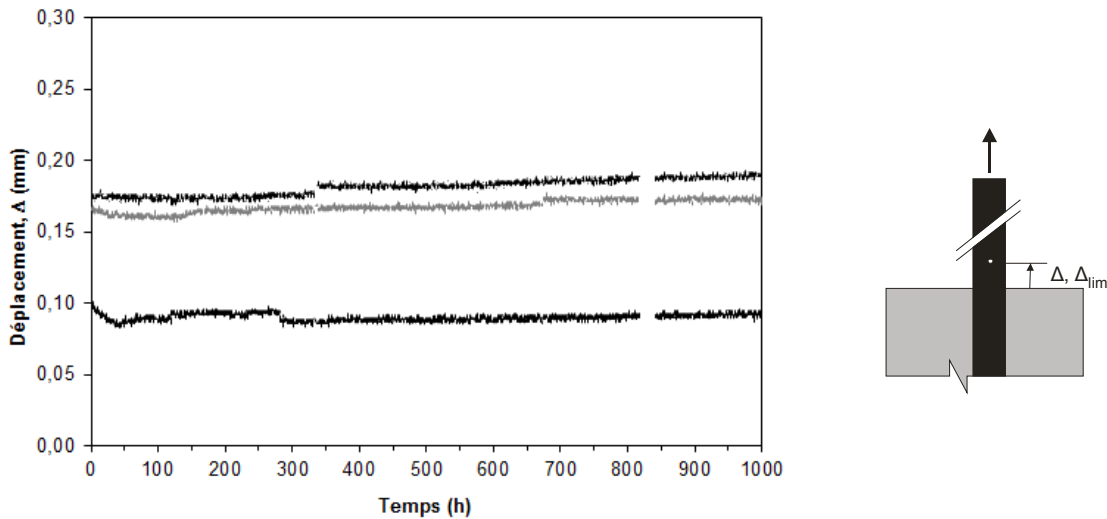


Figure 15- Déplacements de fluage en fonction du temps (42 jours) de 3 ancrages constitués avec des barres 15M (400 MPa) ancrées à 150 mm de profondeur. La charge appliquée (48 kN) est 60% de  $N_{adh}$ .

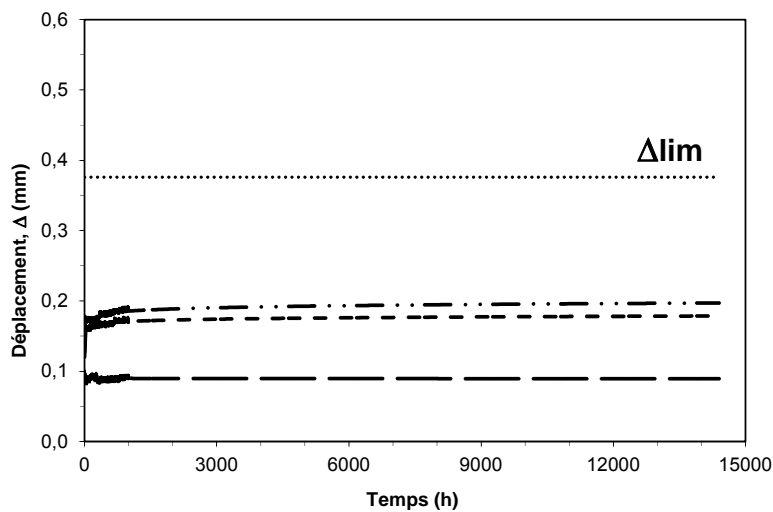


Figure 16- Projections du déplacement de fluage à 600 jours de 3 ancrages constitués avec des barres 15M (400 MPa) ancrées à 150 mm de profondeur. La charge appliquée (48 kN) est 60% de  $N_{adh}$ .

La Figure 17 présente les projections du déplacement de fluage à 50 ans des 3 ancrages. Ces projections sont calculées en utilisant l'approche proposée par le comité ACI 355.4-11 (section 1.3, Figure 5 et Équation 1.3). Ce modèle de projection a été développé pour des ancrages

chimiques (polymériques). Les courbes de la Figure 17 montrent que le déplacement de fluage dépasse fortement la limite maximale ( $\Delta_{lim}$ ) après 50 ans. Cette approche est très sensible à une faible variation du déplacement en fin d'essai. Une variation aussi faible que 10  $\mu\text{m}$  durant les 20 derniers jours engendre un très grand effet sur la projection à 50 ans. Ces premiers résultats suggèrent que cette approche de prédiction du fluage à long terme ne semble pas bien adaptée pour la prédiction du fluage des ancrages cimentaires. Il faut souligner que la charge soutenue appliquée est 60% de  $N_{adh}$  et non pas 55%, tel que recommandé par le comité ACI 355.4-11. Cette charge, plus élevée, peut expliquer une partie du déplacement de fluage élevé à 50 ans. De plus, même si le déplacement de fluage projeté à 50 ans est relativement élevé (de 1 à 2,5 mm), il faut souligner que ces déplacements n'entraîneront probablement pas la rupture complète des ancrages en raison de leur grande ductilité qui peut dépasser 5 mm à la rupture (Figure 12).

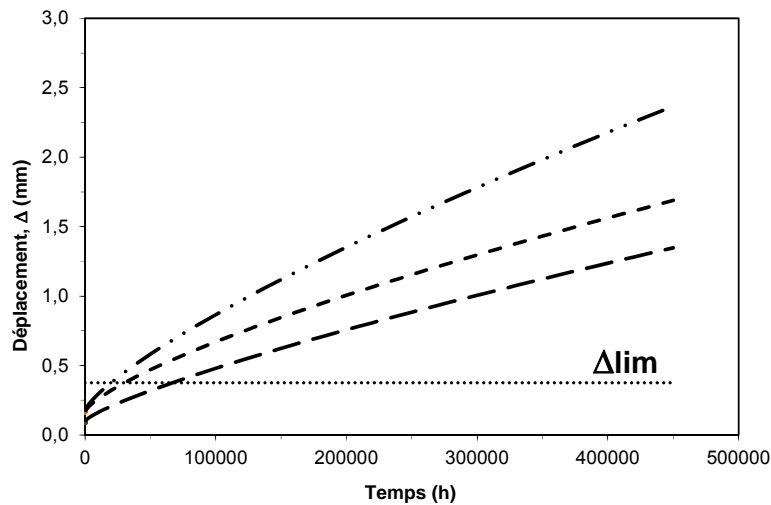


Figure 17- Projections du déplacement de fluage à 50 ans de 3 ancrages constitués avec des barres 15M (400 MPa) ancrées à 150 mm de profondeur. La charge appliquée (48 kN) est 60% de  $N_{adh}$ .

#### 4.5.2 Ancrages à 200 mm de profondeur chargés à 55% de $N_{adh}$

Les ancrages soumis aux essais sont des barres d'armature 15M de nuance 500 MPa ancrées à 200 mm de profondeur. Pour cette configuration, la charge moyenne à la perte d'adhérence  $N_{adh}$  est de 100 kN. Pour les essais de chargement soutenu, suivant la procédure ACI 355.4-11, la charge soutenue appliquée est de 55 kN, correspondant à 55% de 100 kN. Un groupe de 5 ancrages a été soumis aux essais de chargement soutenu.

La Figure 18 présente l'évolution du déplacement des 5 ancrages soumis à une charge soutenue de 55 kN, pendant environ 6 mois (4350 heures) à 23°C. Le déplacement initial (0,25 à 0,30 mm) à 0 heure correspond à la déformation élastique instantanée de l'ancrage sous la charge de 55 kN. Les courbes de la Figure 18 montrent que le déplacement des 5 ancrages progresse très faiblement durant les 6 mois de chargement. Durant cette période, la variation du déplacement est inférieure à 50  $\mu\text{m}$  pour tous les ancrages testés. Globalement, ces résultats indiquent que le fluage à 6 mois est très faible puisqu'il correspond à moins de 25% de la déformation élastique initiale de l'ancrage.



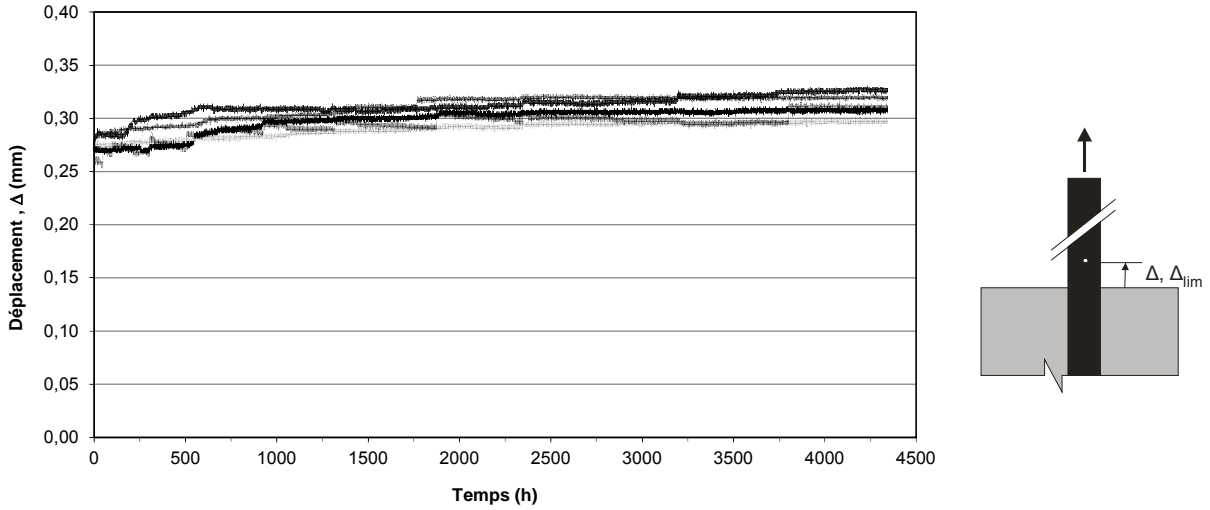


Figure 18- Déplacements de fluage en fonction du temps (6 mois) de 5 ancrages constitués avec des barres 15M (500 MPa) ancrées à 200 mm de profondeur. La charge appliquée (55 kN) est 55% de  $N_{adh}$ .

Les projections logarithmiques à 600 jours du déplacement de fluage des 5 ancrages sont présentées à la Figure 19. Le déplacement de fluage des 5 ancrages est largement inférieur à la limite maximale moyenne  $\Delta_{lim}$ , de 402  $\mu m$  (0,402 mm). Du point de vue du fluage, cette configuration d'ancrage est donc conforme aux spécifications de la norme ASTM E1512.

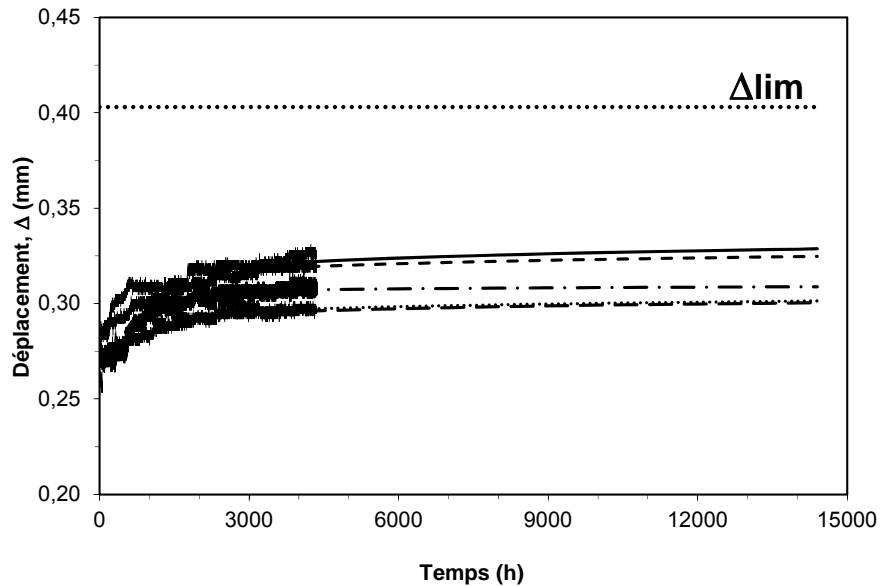


Figure 19- Projections du déplacement de fluage à 600 jours de 5 ancrages constitués avec des barres 15M (500 MPa) ancrées à 200 mm de profondeur. La charge appliquée (55 kN) est 55% de  $N_{adh}$ .

Les projections du déplacement de fluage à 50 ans sont présentées à la Figure 20. Le déplacement de fluage des 5 ancrages est inférieur à la limite maximale  $\Delta_{lim}$ . Pour cette configuration d'ancrage, on constate cette fois que même le modèle Findley prédit un fluage conforme. Deux facteurs peuvent expliquer ce résultat :

- 1- La charge soutenue appliquée correspond à 55% de  $N_{adh}$ , tel que spécifié par l'ACI 355.4-11. Pour la série d'ancrages précédente (Figure 17), la charge appliquée était de 60% de  $N_{adh}$ . Elle était donc légèrement supérieure à la charge recommandée, ce qui a pu contribuer à augmenter le fluage à long terme.
- 2- La profondeur des barres d'ancrage est de 200 mm. La capacité mécanique de l'ancrage est significativement plus grande ( $N_{adh} = 100$  kN) que celle de la série ancrée à 150 mm de profondeur ( $N_{adh} = 80$  kN). Pour cette profondeur d'ancrage plus grande, l'adhérence est développée sur une plus grande surface d'ancrage, ce qui contribue à diminuer les déformations de fluage à long terme.

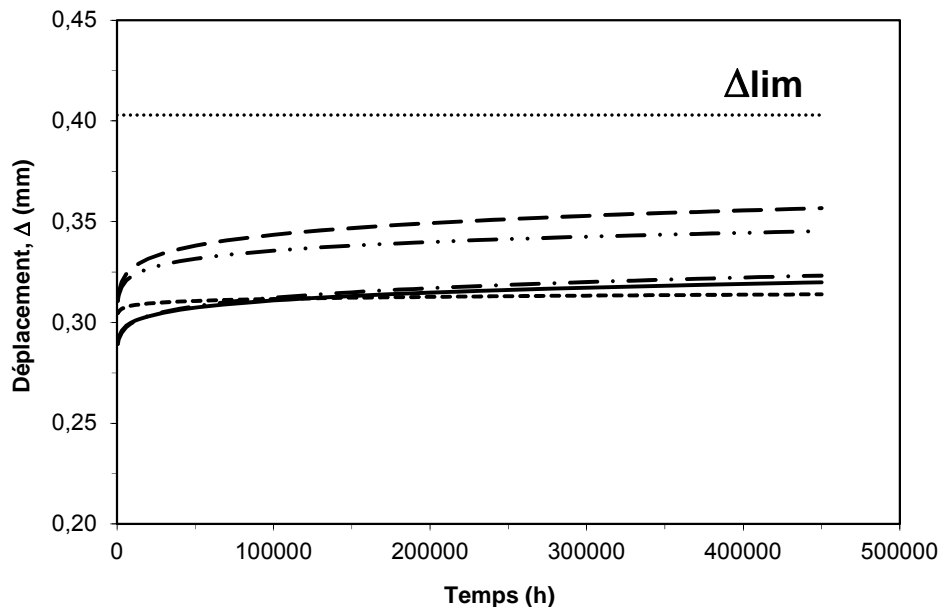


Figure 20- Projections du déplacement de fluage à 50 ans de 5 ancrages constitués avec des barres 15M (500 MPa) ancrées à 200 mm de profondeur. La charge appliquée (55 kN) est 55% de  $N_{adh}$ .

## 5. CONCLUSION

Ce programme de recherche a permis de dégager les principales conclusions suivantes :

- Le liant cimentaire développe rapidement une résistance au très jeune âge qui atteint approximativement 20 MPa à 4 heures et plus de 35 MPa à 24 heures. La résistance à long terme (28 jours) est de 55 MPa.

- Les ancrages cimentaires fabriqués avec des barres d'armature 15M (400 MPa) ancrées à 150 mm de profondeur possèdent une bonne ductilité à la rupture. Pour cette configuration d'ancrage, la moyenne de la charge à la perte d'adhérence est de 80 kN et la contrainte d'adhérence maximale moyenne est de 8,0 MPa.
- La performance mécanique des ancrages cimentaires est fortement dépendante des conditions d'installation. Une préparation imparfaite des trous de forage ne permet pas de développer toute la capacité prévue d'un ancrage. Par exemple, le non-respect des recommandations d'installation du fabricant peut engendrer une perte de plus de 50% de la capacité mécanique d'un ancrage cimentaire.
- La nouvelle procédure recommandée par le comité technique ACI 355.4-11 pour la projection des déplacements de fluage à long terme (approche Findley) conduit à des déplacements de fluage globalement plus élevés que ceux calculés à partir de l'approche logarithmique recommandée par la norme ASTM E1512.
- Le programme de recherche montre que les ancrages cimentaires fabriqués avec des barres d'armature 15M (500 MPa) ancrées à 200 mm de profondeur possèdent un déplacement projeté de fluage à 600 jours et à 50 ans conforme aux spécifications respectives de la norme ASTM E1512 et du comité ACI 355.4-11.

## 6. REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent souligner l'appui financier du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et du programme PARI du Conseil national de recherche du Canada (CNRC) et le support technique et scientifique des personnels de l'Université de Sherbrooke et de la compagnie Ambex.

## 7. RÉFÉRENCES

1. 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.
2. 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.
3. WOLLMERSHAUSER, Richard E. et Lee MATTIS (2008). *Understanding Adhesive Anchor Installation and Inspection*. In "Concrete International", États-Unis, Décembre, 11 p.
4. 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.

5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.

17. 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.
18. 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.