



UNIVERSITÉ DE  
**SHERBROOKE**

Faculté de Génie  
Département de Génie Civil

# FLUAGE DES CONDUCTEURS DE LIGNES DE TRANSPORT D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE À PARTIR DU FLUAGE DES FILS D'ALUMINIUM

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie civil

Hejer NAKOURI

Jury : Sébastien LANGLOIS (directeur)  
Dominique LEFEBVRE (rapporteur)  
Luc BINETTE



*À ma mère, à mon père*



# RÉSUMÉ

Ce travail porte sur la thématique du fluage des conducteurs des lignes électriques aériennes. L'objectif général de ce projet de recherche est d'étudier l'effet de la température sur le fluage des conducteurs. L'approche présentée permet de prédire le fluage des conducteurs en fonction de celui des brins constitutifs.

Un banc d'essai du fluage des fils d'aluminium a été conçu et validé avec des essais préliminaires de 100 heures. Le protocole de mise en charge ainsi que l'instrumentation pour la mesure de l'allongement ont été particulièrement étudiés lors des essais préliminaires. Ensuite, le fluage des brins d'aluminium soumis à contraintes variant de 30 à 106 MPa et des températures de 21 et 38 °C a été évalué avec des tests de 1000 heures. L'approche a été validée en comparant les résultats obtenus à des résultats expérimentaux publiés dans la littérature.

On peut conclure qu'avec quelques équations analytiques simples, il est possible de prédire le comportement d'un conducteur complet à partir des résultats d'essais sur brins.

**Mots-clés** : lignes électriques aériennes, conducteur, ACSR, fluage, température, approche brin



# REMERCIEMENTS

Je tiens premièrement à remercier mes directeurs de recherche, Frédéric Légeron et Sébastien Langlois pour l'encadrement accordé, ainsi que leur disponibilité tout au long de mes travaux de maîtrise.

Je remercie particulièrement Marc Demers pour son soutien et aide tout le long de ma maîtrise.

Mes remerciements vont également aux membres du jury de mon mémoire pour leurs commentaires constructifs.

Mes remerciements vont aussi à tous mes collègues étudiants et membres de la chaire de recherche en structure et mécanisme de ligne de transport, pour leur aide et conseil lors des moments difficiles pendant mes recherches

Mes pensées iront également à ma famille et surtout à ma mère Khamsa Ziadi et mon père Abbes Nakouri pour leur soutien durant mes études.

# TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	5
REMERCIEMENTS.....	7
LISTE DES FIGURES .....	iii
LISTE DES TABLEAUX .....	vii
CHAPITRE 1 Introduction.....	1
CHAPITRE 2 Revue bibliographique .....	3
2.1 Fluage des métaux.....	3
2.1.1 Introduction .....	3
2.1.2 Courbes de fluage.....	3
2.1.3 Effets de la température et de la contrainte .....	5
2.1.4 Facteurs métallurgiques affectant le fluage .....	6
2.1.5 Lois de comportement du fluage.....	7
2.1.6 Fluage de l'aluminium.....	9
2.1.7 Fluage de l'acier .....	16
2.2 Comportement mécanique des conducteurs.....	22
2.2.1 Introduction .....	22
2.2.2 Allongement inélastique du conducteur .....	23
2.2.3 Essais sur les conducteurs.....	26
2.3 Mécanique des câbles.....	40
2.3.1 Introduction .....	40
2.3.2 Comportement du brin.....	40
2.3.3 Comportement du câble.....	42
CHAPITRE 3 Problématique, objectifs et méthodologie .....	45
3.1 Problématique.....	45
3.2 Objectifs .....	46
3.3 Méthodologie .....	46
CHAPITRE 4 Approche expérimentale .....	47
4.1 Introduction.....	47



4.2 Choix des échantillons .....	47
4.3 Étapes du programme expérimental.....	48
4.4 Équipement et méthodologie.....	49
4.4.1 Conditions ambiantes .....	49
4.4.2 Mesure de l’allongement .....	49
4.4.3 Fixation de l’échantillon à l’appareillage d’essai.....	51
4.5 Protocole d’essai .....	51
4.5.1 Lectures de l’allongement .....	51
4.5.2 Conditions d’essai.....	52
4.5.3 Procédure de mise responsable.....	53
4.6 Rejet d’un essai .....	54
4.7 Interprétation des résultats .....	55
<b>CHAPITRE 5 Résultats obtenus et approche analytique .....</b>	<b>57</b>
5.1 Introduction.....	57
5.2 Exemple de l’approche brin .....	57
5.2.1 Calcul de l’élongation et de la contrainte d’un brin .....	59
5.2.2 Calcul de la force.....	61
5.3 Essais sur les brins.....	64
5.3.1 Essais préliminaires sur les brins.....	64
5.3.2 Essais à long terme à 21 °C .....	75
5.3.3 Essai à 38 °C.....	77
5.4 Interprétation des résultats .....	81
5.4.1 Comparaison avec CIGRÉ et les résultats de la littérature.....	81
5.4.2 Comparaison avec CIGRÉ essai à 38°C.....	84
5.5 Approche brin.....	87
<b>Conclusion .....</b>	<b>95</b>
<b>Annexe : Essais de traction.....</b>	<b>101</b>

# LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Courbe classique du fluage (adaptée de [Saint-Antonin 2013]).....	3
Figure 2 : Courbes typiques de fluage d'un matériau à basse et à haute température (Adapté (Boyer, 1988)).....	4
Figure 3 : Effet de la température et de la charge sur le comportement en fluage (adapté de (Boyer, 1988)).....	6
Figure 4 : Modèles courants pour analyse — aluminium (adapté de [Binette 2012]).....	11
Figure 5 : Fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19 – contrainte = 25 % $R_m$ (adapté de [Roest 1969]) .....	12
Figure 6 : Fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19 – contrainte = 20 % $R_m$ (adapté de [Roest 1969]) .....	12
Figure 7 : Déformation élastique d'un fil d'aluminium 1350-H19 de diamètre 4,42 mm et à 23,5°C (adapté de [Nigol et Barrett, 1982]).....	13
Figure 8 : Déformation élastique d'un fil d'aluminium 1350-H19 pendant le chargement de 0 à 71 MPa et diverses déformées sous 71 MPa dans le temps à 23.5 °C (adapté de [Nigol et Barrett, 1982]) .....	14
Figure 9 : Fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19 à 23.5 °C – contrainte constante (adapté de [Nigol et Barrett, 1982]).....	14
Figure 10 : Influence de la température et du temps sur le fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19 sous une contrainte de moins de 43 MPa (adapté de [Nigol et Barrett, 1982]).....	15
Figure 11 : Dispositif de Fluage (adapté de [Nigol et Barrett, 1982]).....	16
Figure 12 : Modèles courants pour analyse structurale — Acier (adapté de [Binette 2012]) .....	19
Figure 13 : Courbes de contrainte — déformation d'un fil en acier d'un conducteur ACSR (adapté de [Nigol et Barrett, 1980]) .....	20
Figure 14 : Fluage d'un fil en acier d'un conducteur ACSR (adapté de [Nigol et Barrett 1980]).....	21
Figure 15 : Section transversale d'un conducteur ACSR typique (adapté de [Leblond, 1995]).....	22
Figure 16 : Comportement mécanique d'un conducteur soumis à une tension croissante (adapté de [CIGRE. 1981]).....	23
Figure 17 : Courbes types d'allongement relatif par fluage en fonction du temps pour un conducteur (adapté de [CIGRE, 1972]) .....	24
Figure 18 : Modèle théorique de comportement d'un conducteur composite (adapté de [Binette 2012]) .....	27
Figure 19 : Modélisation de la courbe initiale d'essai (adapté de [Binette 2012]).....	27
Figure 20 : Courbes de contrainte déformation d'un conducteur ACSR (adapté de [Nigol, Barrett 1981]).....	28
Figure 21 : Courbe de contrainte- déformation d'une nouvelle âme d'acier (adapté de [Nigol, Barrett 1981]) .....	29
Figure 22 : Fluage d'un conducteur ACSR à température ambiante (adapté de [Harvey, 1969]).....	30
Figure 23 : Courbes de fluage d'un conducteur ACSR 30/7/3 mm (adaptée de (Drury, 1993)).....	31

Figure 24 : Courbes de fluage d'un conducteur ACSR 54/7/3,25 mm (adaptée de (Drury, 1993)).....	32
Figure 25 : Comparaison des données réelles de fluage de références différentes avec différentes lois de fluage adapté de (Nigol et Barrett, 1980)).....	33
Figure 26 : Compression de l'enveloppe (adapté de [Binette 2012]).....	34
Figure 27 : Allongement thermique d'un conducteur ACSR (adapté de [Michael et coll. 2008]).....	36
Figure 28 : Allongement thermique d'un conducteur ACSR (adapté de [Nigol, Barrett 1981]).....	36
Figure 29 : Modèle thermique simple (adapté de [Nigol, Barrett 1981]).....	37
Figure 30 : Fluage à 20 % de la charge de rupture pour 30 ans en fonction du % d'acier V facteur de fluage [adaptée de (CIGRE. 1981)] .....	39
Figure 31 : Tension en fonction du facteur de fluage [adaptée de (CIGRE. 1981)].....	39
Figure 32 : Courbes température- Facteur de fluage (adaptée de (CIGRE. 1981)) .....	40
Figure 33 : Relation entre l'élongation du câble et celle du brin (adapté de (Feyrer 2007)) .....	43
Figure 34 : Vue d'ensemble des essais préliminaires .....	48
Figure 35 : Vue d'ensemble des essais à long terme dans l'enceinte isolée.....	49
Figure 36 : Les deux capteurs de déplacement attachés à l'opposé l'un de l'autre au moyen de blocs d'attache en haut et en bas du fil.....	50
Figure 37 : Collet du bas.....	53
Figure 38 : Collet du haut + tige filetée .....	54
Figure 39: évaluation de coefficient $\alpha$ (adapté de(CIGRE, 1981)).....	56
Figure 40: évaluation de coefficient $\mu$ (adapté de(CIGRE, 1981)).....	56
Figure 41 : Courbe contrainte- déformation d'un conducteur ACSR (42/7) 34mm (adapté de [Nigol, Barrett 1981]).....	58
Figure 42 : Courbe contrainte- déformation d'un brin d'acier (adapté de [Nigol et Barrett, 1980]).....	60
Figure 43 : Courbe contrainte- déformation d'un brin d'aluminium (adapté de [Nigol et Barrett, 1982]).....	60
Figure 44 : Comparaison entre les résultats calculés et expérimentaux .....	64
Figure 45 : Série 1 - essais préliminaires sous différentes contraintes .....	65
Figure 46 : Série 2 - essais préliminaires pour un fil redressé avec une méthode particulière, un fil régulier et un fil avec indicateurs sur collets.....	66
Figure 47 : Détail des indicateurs (2 indicateurs pour chaque longueur et 4 par fil pour la troisième série).....	67
Figure 48 : Série 3 - essais préliminaires sur différentes longueurs .....	67
Figure 49 : Collet en haut.....	67
Figure 50 : Détails du montage.....	68
Figure 51 : Courbe de fluage d'un fil d'aluminium sous trois niveaux de contrainte .....	70
Figure 52 : Fluage du fil redressé mesuré par chaque indicateur .....	72
Figure 53 : Fluage du fil régulier mesuré par chaque indicateur .....	72
Figure 54 : Fluage du fil avec indicateurs aux collets mesuré par chaque indicateur .....	73
Figure 55 : Courbe de fluage de 3 fils d'aluminium: régulier, redressé et indicateurs aux collets .....	73
Figure 56 : Courbe de fluage de fils d'aluminium avec différentes longueurs.....	74

Figure 57 : Fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19, 3,09 mm à 21 °C - essai juin.....	76
Figure 58 : Fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19, 3,09 mm à 21 °C - essai août.....	76
Figure 59 : Variation de la température en fonction du temps_ essai de juin.....	77
Figure 60 : Fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19, 3,09 mm à 23°C.....	78
Figure 61 : Allongements du fil sous 79,20 MPa mesurés par les deux indicateurs .....	78
Figure 62 : Allongements du fil sous 55,55 MPa mesurés par les deux indicateurs .....	79
Figure 63 : Allongements du fil sous 30,30 MPa mesurés par les deux indicateurs .....	79
Figure 64 : Allongements du fil sous 106,05 MPa mesurés par les deux indicateurs .....	80
Figure 65 : variation de la température en fonction du temps_ essai 38 °C .....	80
Figure 66 : Comparaison avec CIGRÉ et les résultats de la littérature pour 30,3 MPa....	82
Figure 67 : Comparaison avec CIGRÉ et les résultats de la littérature pour 55,5 MPa....	82
Figure 68 : Comparaison avec CIGRÉ et les résultats de la littérature pour 79,2 MPa....	83
Figure 69 : Comparaison avec CIGRÉ et les résultats de la littérature pour 106,05 MPa	83
Figure 70 : Comparaison avec CIGRE pour 30,30 MPa .....	85
Figure 71 : Comparaison avec CIGRE pour 55,5 MPa .....	85
Figure 72 : Comparaison avec CIGRE pour 79,2 MPa .....	86
Figure 73 : Comparaison avec CIGRE pour 106,05 MPa .....	86
Figure 74 : Comparaison entre les valeurs trouvées par l'approche brin et les résultats expérimentaux pour un conducteur ACSR 30/7/3 mm_18,08 kN.....	90
Figure 75 : Comparaison entre les valeurs trouvées par l'approche brin et les résultats expérimentaux pour un conducteur ACSR 30/7/3 mm_27,12 kN.....	90
Figure 76 : Comparaison entre les valeurs trouvées par approches et les résultats expérimentaux pour un conducteur ACSR 30/7/3 mm_36,16 kN.....	91
Figure 77 : Comparaison entre les valeurs trouvées par approches et les résultats expérimentaux pour un conducteur ACSR 54/7/3,25 mm_31,8 kN.....	92
Figure 78 : Comparaison entre les valeurs trouvées par approches et les résultats expérimentaux pour un conducteur ACSR 54/7/3,25 mm_47,7 kN.....	92
Figure 79 : Comparaison entre les valeurs trouvées par approches et les résultats expérimentaux pour un conducteur ACSR 54/7/3,25 mm_65,1 kN.....	93
Figure 80 : Courbe de contrainte — déformation d'un fil d'aluminium 1350-H19, soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture_ Echantillon 1.....	102
Figure 81 : Courbe de contrainte — déformation d'un fil d'aluminium 1350-H19, soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture_ Echantillon 2.....	102
Figure 82 : Courbe de contrainte — déformation d'un fil d'aluminium 1350-H19, soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture_ Echantillon 3.....	103
Figure 83 : Courbe de contrainte — déformation d'un fil d'aluminium 1350-H19, soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture_ Echantillon 4.....	103
Figure 84 : Comparaison entre essai effectué _Echantillon 2 et essai Nigol et Barrett..	104
Figure 85 : Évaluation de la déformation plastique à divers niveaux de contrainte .....	105



# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques de l'acier galvanisé zinc slon la norme ASTM – B 498.....	17
Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques de l'acier haute résistance galvanisé zinc slon la norme ASTM – B 606.....	18
Tableau 3 : Caractéristiques mécaniques de l'acier haute résistance galvanisé zinc-aluminium slon la norme ASTM – B 803.....	18
Tableau 4 : Caractéristiques de l'aluminium 1350-H19.....	47
Tableau 5 : Valeurs de $\beta_i$ pour un conducteur ACSR classique selon [Papailiou,1995] ..	58
Tableau 6 : Valeurs contraintes – déformation .....	59
Tableau 7 : Tableau récapitulatif des valeurs pour chaque couche de l'approche brin ..	62
Tableau 8 : Valeurs de la force extérieure et de la contrainte calculée.....	63
Tableau 9 : Lectures d'allongement des indicateurs des trois fils de la série 1 .....	69
Tableau 10 : Valeurs coefficients de fluage pour brin.....	81
Tableau 11 : Valeurs des facteurs de fluage pour la température calculés pour les essais de juin et d'août .....	87
Tableau 12 : Caractéristiques conducteurs .....	88
Tableau 13 : Contraintes aluminium calculées .....	89
Tableau 14 : Valeurs coefficients de fluage pour conducteur.....	89
Tableau 15 : valeurs numériques obtenues pour la déformation plastique aux quatre niveaux de contrainte .....	105



# CHAPITRE 1 Introduction

Notre société est très dépendante de l'électricité et pour garantir cet approvisionnement, le réseau de transport doit être fiable. Plusieurs éléments peuvent altérer l'état du réseau et parmi ces éléments figure le fluage des conducteurs des lignes aériennes. En effet, le fluage peut causer une augmentation importante de la flèche des conducteurs et ainsi réduire les distances au sol en dessous des limites sécuritaires d'opération. Une connaissance insuffisante du comportement en fluage des conducteurs risque donc d'entraîner une reprise du réglage de la tension des conducteurs par des ajustements coûteux.

D'autre part, l'état thermique des conducteurs est une des causes qui influe considérablement sur le fluage. Cependant, il existe très peu de connaissances sur le fluage à haute température des conducteurs, et les données disponibles indiquent des valeurs de fluages très différentes selon la source. Ces résultats sont présentés dans le chapitre 2. En fait, il était jusqu'ici très rare de faire chauffer les conducteurs puisque la conductivité électrique diminue avec l'augmentation de la température. Les pertes de rendement, et les pertes économiques, explique le peu de recherches dans ce domaine. [CIGRE, 1981]. Aujourd'hui, certaines lignes sont exploitées à des températures moyennes d'opération largement au-dessus des températures ambiantes pour satisfaire à la demande croissante en électricité.

Ainsi, aucune solution réellement satisfaisante n'a été encore donnée au fluage à haute température d'exploitation des conducteurs située entre 50°C et 100°C, surtout en ce qui concerne la possibilité de prévoir le fluage d'un conducteur d'une ligne à partir de certaines caractéristiques expérimentales relevées lors d'un essai sur une longueur de ce conducteur et des conditions de fonctionnement et d'environnement de la ligne. Alors dans ce travail, seront présentées, une approche expérimentale et une approche de calcul qui permet l'évaluation du comportement mécanique à haute température d'exploitation pendant la durée de vie des lignes. La mise en place de cette approche est une étape nécessaire qui permettra lors de prochains projets d'approfondir, à l'aide d'une série d'essais expérimentaux, la question du fluage à haute température des conducteurs aluminium acier de type ACSR (« Aluminum Conductor Steel Reinforced »). Étant donné que le coût des



essais de fluage sur les conducteurs est élevé, une approche brin qui permet la prédiction du fluage des conducteurs en fonction des brins d'aluminium, est présentée dans ce travail. Des essais de fluage ont été effectués sur des brins d'aluminium à des températures égales à 21°C et 38 °C et pour une durée égale à 1000 heures. Ces températures sont relativement faible, cependant, l'objectif de ce travail est surtout de valider l'approche adoptée. Cette approche pourra être utilisée lors de travaux ultérieurs pour étudier la gamme de température d'intérêt situé entre 50°C et 100°C. Les niveaux de contraintes dans les fils d'aluminium étudiés lors de cette étude varient entre 20% et 70 % de leurs limites de contraintes à la rupture.

Une revue bibliographique sur le fluage de l'aluminium, de l'acier et des conducteurs ainsi que sur la mécanique des câbles est présentée au deuxième chapitre de ce rapport. Dans le troisième chapitre, la problématique, les objectifs et la méthodologie sont exposés. Le quatrième chapitre est réservé à l'approche expérimentale et présente une description des protocoles et des appareils utilisés au laboratoire.

Le cinquième chapitre porte sur l'approche analytique et les résultats obtenus.

# CHAPITRE 2 Revue bibliographique

## 2.1 Fluage des métaux

### 2.1.1 Introduction

Le fluage est un phénomène physique qui produit une déformation lente irréversible d'un matériau soumis à une contrainte constante, inférieure à la limite d'élasticité du matériau. Le taux de fluage n'est pas directement proportionnel à la contrainte et augmente avec une hausse de la température du matériau. La principale particularité du fluage est qu'il peut se développer dans le temps jusqu'à la rupture même si la température et l'effort appliqué restent constants (Saint-Antonin, 2013).

### 2.1.2 Courbes de fluage

La Figure 1 présente la forme classique d'une courbe de fluage qui présente la déformation,  $\epsilon$ , en fonction du temps. La déformation élastique,  $\epsilon_0$  de l'éprouvette correspond à la l'étape de la mise en charge (Saint-Antonin, 2013).

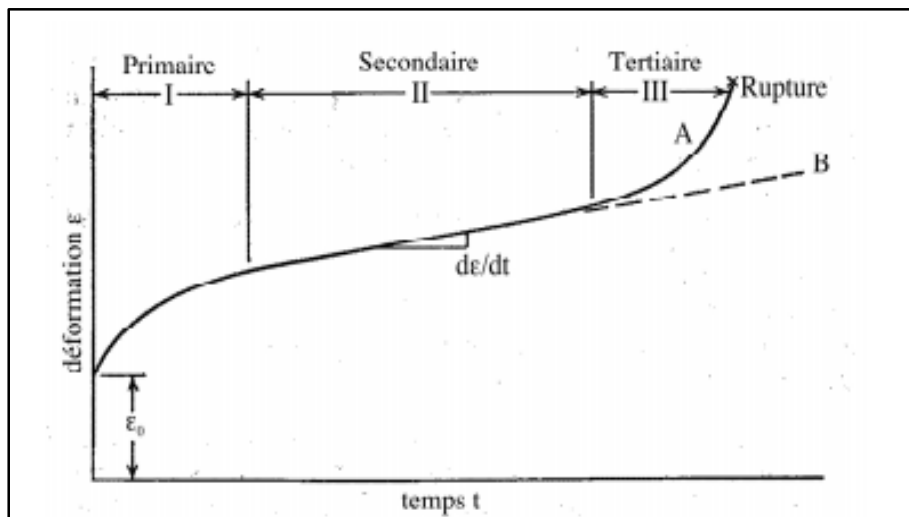


Figure 1 : Courbe classique du fluage (adaptée de [Saint-Antonin 2013])

Selon (Saint-Antonin, 2013), il y a trois phases de fluage (figure 1) :

- le fluage primaire : au cours de cette phase, il y a une diminution de la vitesse du fluage ce qui se traduit par une augmentation de la résistance du matériau ou encore une consolidation.
- Le fluage secondaire, ou stationnaire : au cours de cette phase, la vitesse de déformation est constante avec le temps.
- Le fluage tertiaire : pendant lequel la vitesse de déformation augmente jusqu'à la rupture.

Selon (Dorlot et col, 2000), pour des températures inférieures à  $0,5 \tau_f$  (température de fusion absolue° K), le fluage ne se manifeste pas de façon tangible. Selon (Boyer, 1988), pour des températures inférieures à  $0,4 \tau_f$ , soit  $100^\circ\text{C}$  pour l'aluminium, le fluage primaire peut se poursuivre indéfiniment (Figure 2). Dans le cas de ce projet, toutes les températures étudiées sont inférieures à  $100^\circ\text{C}$ . Alors uniquement le fluage primaire est observé.

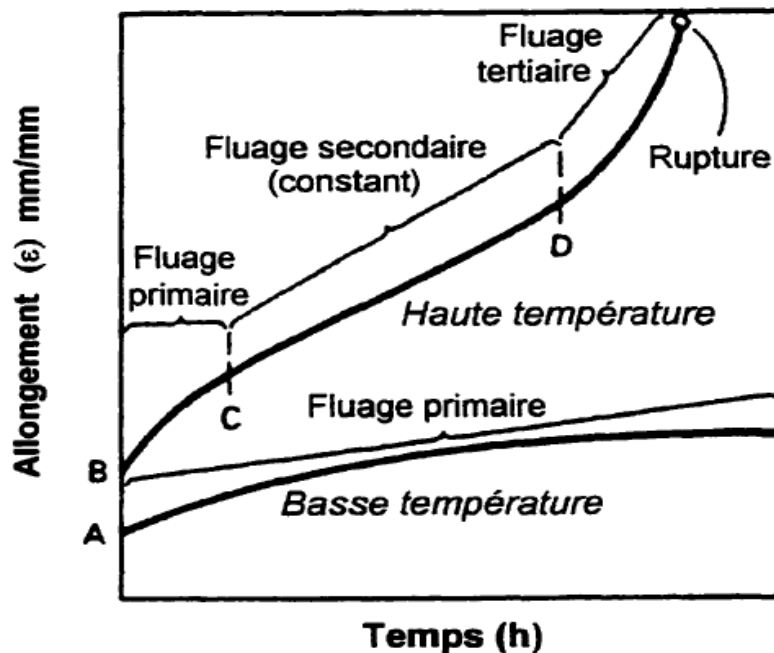


Figure 2 : Courbes typiques de fluage d'un matériau à basse et à haute température (Adapté (Boyer, 1988))

### 2.1.3 Effets de la température et de la contrainte

D'une façon générale, la température et la charge sont les deux principales variables qui déterminent le comportement en fluage d'un matériau.

Selon (Boyer, 1988) et en se référant à la figure 3.a, à basses températures inférieures à  $0,4$  ou  $0,5 \tau_f$  (où  $\tau_f$  est la température de fusion en ° K), une contrainte  $\sigma_4$  proche de la contrainte ultime produit une déformation rapide qui mènera à une fracture en un temps  $t_4$ . Pour une charge  $\sigma_3$  légèrement plus faible, le taux de déformation diminue pendant une grande durée de temps suivie d'une courte durée où il augmente jusqu'à la rupture. En diminuant la charge à  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ , le taux de déformation diminue dans le temps et le matériau n'atteint pas la rupture. La variation de charge nécessaire pour modifier le comportement de  $\sigma_4$  à  $\sigma_2$  est relativement faible.

Alors, pour le fluage à basse température, le taux de fluage diminue continuellement alors que la déformation augmente.

En effet, à basses températures des mécanismes de dislocations provoquent une déformation plastique. Au cours du chargement et du fluage primaire, des dislocations enchevêtrées se créent et se propagent (Saint Antonin, 2013).

À haute température, supérieures à  $0,4$  ou  $0,5 \tau_f$ , (voir figure 3.b), les temps à la rupture ( $t_8$ ,  $t_7$  et  $t_6$ ) diminuent lorsque la charge augmente. Aussi, le taux de fluage secondaire diminue lorsque la charge diminue. En définitive, la variation de charge nécessaire pour modifier le comportement de  $\sigma_8$  à  $\sigma_5$  est beaucoup plus importante que celle nécessaire pour produire le même changement à basse température.

Selon (Saint Antonin, 2013), à hautes températures, les mécanismes du fluage sont associés à la présence de mécanismes de montée de dislocations (phénomène qui est thermiquement activé). Selon (Dorlot et col, 2000), la température a pour effet d'augmenter la mobilité des dislocations à cause de l'augmentation de l'agitation thermique.

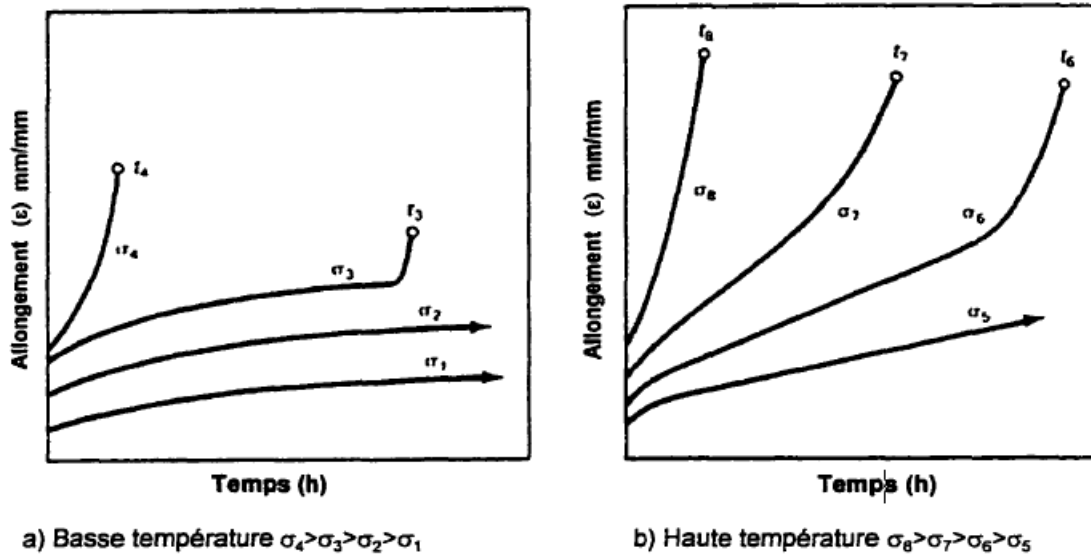


Figure 3 : Effet de la température et de la charge sur le comportement en fluage (adapté de (Boyer, 1988))

## 2.1.4 Facteurs métallurgiques affectant le fluage

### 2.1.4.1 Solution solide

Dans le cas général, la solution solide dans un solide cristallin se fait par deux mécanismes : Lorsque les atomes des éléments d'alliage prennent la place des atomes du métal majoritaire, il s'agit de substitution. À l'inverse, on parle d'insertion lorsqu'ils se glissent entre les atomes de l'alliage majoritaire. En général, les éléments d'addition en solution solide augmentent la résistance mécanique de l'alliage. (Dorlot et col, 2000)

Selon (Dorlot et col, 2000), la résistance au fluage est améliorée par solution solide si le soluté augmente le module d'élasticité, augmente la température de fusion ou diminue la diffusivité des atomes.

Les atomes en solution solide, que ce soit en insertion ou en substitution créent des distorsions élastiques. Ces distorsions induisent une force d'interaction entre les atomes d'alliage et les dislocations, ce qui entraîne un durcissement du métal et augmente la résistance au fluage (Dorlot et col, 2000).

#### **2.1.4.2 Précipités**

Selon (Honeycombe, 1984), la présence de précipités fins et dispersés dans la structure des métaux est un facteur qui augmente la résistance au fluage des métaux. Un précipité est un dépôt solide qui va se former dans une solution à la suite d'une réaction chimique. Les précipités apparaissent soit par traitement thermique ou soit lorsque la limite de solubilité du soluté est atteinte.

Selon (Honeycombe, 1984), les processus de précipitation peuvent mener à une grande réduction dans le taux de fluage secondaire. En effet, la formation des nouveaux précipités se fait souvent sur les dislocations responsables de la déformation, ce qui rend leur mouvement plus actif. Lors des premiers stades de formation, les particules sont très petites et faiblement espacées, ce qui empêche le déplacement des dislocations, cependant, lorsque les particules deviennent plus grossières, les dislocations peuvent être affranchies. Les précipités les plus efficaces sont ceux qui grossissent lentement.

#### **2.1.4.3 Taille des grains**

Selon (Honeycombe, 1984), l'effet de la taille des grains sur les propriétés de fluage n'est pas tout à fait clair. Dans nombre de conditions, un matériau dont les grains sont grossiers aura un taux de fluage plus faible. En effet, une taille de grains optimale a été observée pour plusieurs alliages. Cette taille optimale produit un taux de fluage secondaire minimum. Ainsi, si la taille des grains est supérieure ou inférieure à cette taille optimale, le taux de fluage secondaire augmente.

Selon (Saint-Antonin, 2013), pour des températures ( $\tau < 0,5 \tau_f$ ) et une petite taille de grain, les déformations plastiques instantanées, lors de la mise en charge, sont importantes et, le fluage primaire est alors plus grand.

### **2.1.5 Lois de comportement du fluage**

#### **a. Fluage primaire**

L'expression la plus couramment utilisée pour décrire le fluage à une température et une contrainte données est la loi d'Andrade (Lemaitre et Chaboche, 2004) :

$$\varepsilon = At^{1/q}$$

**Équation 1**

Où A et q sont des coefficients qui dépendent du matériau, de la contrainte et de la température, les valeurs de q sont généralement proches de 3 et t est le temps exprimé en heures.

### b. Fluage secondaire

A basse température, c'est en général le fluage primaire qui prédomine. Plus la température s'élève et plus le fluage secondaire s'établit rapidement et la déformation augmente continuellement dans le temps. À des températures supérieures à  $0,5 \tau_f$ , le taux de fluage secondaire de la plupart des métaux et alliages varie en fonction de l'expression suivante utilisée :

$$\dot{\varepsilon} = A\sigma^n \quad \text{Équation 2}$$

L'équation 2 est appelée loi de Norton (Lemaitre, Chaboche 2004).

Où A et n sont des constantes. Pour les métaux purs, n varie généralement entre 4 et 5. Pour des alliages en solution solide ayant des précipités, n peut atteindre une valeur aussi élevée que 30, voir même 40 (Boyer, 1988).

Selon (Dorlot et col, 2000), il existe aussi une relation exponentielle entre le taux de fluage secondaire et la température. Il peut donc en être déduit que le fluage secondaire obéit à la Loi d'Arrhenius:

$$\dot{\varepsilon} = C \exp\left(-\frac{Q}{R\tau}\right) \quad \text{Équation 3}$$

Avec C constante dépend de la température et de la contrainte,

Q ( $J \cdot mol^{-1}$ ) énergie apparente d'activation qui régissent le phénomène de fluage.

La valeur de Q est fonction du coefficient d'autodiffusion des atomes du matériau, mais elle dépend aussi de l'intervalle de température considéré, du type de liaison atomique, de la structure cristalline, de la taille des grains, etc. (Dorlot et col, 2000).

L'énergie d'activation Q est donnée par la pente de la courbe  $\lg \dot{\varepsilon}$  reportée en fonction de  $1/\tau$  (Saint Antonin, 2013)

R constante molaire des gaz ( $8,314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $\tau$  (K) température

Pour des essais réalisés à des températures et des contraintes différentes, la vitesse de déformation pendant le fluage secondaire peut être décrite en groupant la loi en puissance (Éq. 2 et la loi d'Arrhenius Éq. 3), on a alors (Saint Antonin, 2013) :

$$\dot{\varepsilon} = A \dot{\varepsilon}_d \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \text{Équation 4}$$

L'ensemble des lois présentées dans cette partie sont des lois de nature empirique ou, dans le cas de la loi d'Arrhenius semi-empirique.

### 2.1.6 Fluage de l'aluminium

L'aluminium est utilisé d'une manière intensive dans la fabrication des conducteurs électriques parce qu'il est moins cher que les autres matériaux.

#### a. Principaux alliages industriels pour conducteurs électriques

Dans la suite, les principaux alliages industriels pour les conducteurs électriques selon (Murry, 2004) et la norme ASTM seront présentés.

##### ➤ Aluminiums non alliés de la série 1000

L'aluminium 1350 est réservé à la fabrication des fils tréfilés à l'état H19 (extra dur) pour câbles isolés de transport d'énergie électrique. L'aluminium 1350H19 est un aluminium non allié, pur à 99,5 %. C'est un fil d'aluminium écroui à froid. Le durcissement est effectué par écrouissage. L'écrouissage des alliages d'aluminium augmente sa dureté, sa limite élastique et la charge de rupture (Murry, 2004).

Selon ASTM- B230, pour un diamètre  $\varnothing = 3$  mm, la résistance mécanique d'un aluminium 1350-H19 est  $R_m = 175$  MPa et sa conductivité électrique  $C = 61,6$  % IACS (*International Annealed Copper Standard*).

##### ➤ Alliages aluminium-magnésium de la série 5000

Les alliages aluminium-magnésium constituent une famille importante et variée d'alliages industriels. Selon (Murry, 2004), l'alliage 5005 (ancienne dénomination A-G0, 6 L) peut être utilisé sous forme de fils élaborés par des procédés de coulée et laminage en continu pour des usages dans le domaine de l'électricité.

Pour les conducteurs des lignes aériennes de distribution d'énergie électrique, les fils écrouis à l'état H19 ont une résistance à la rupture supérieure à 230-275 MPa suivant le



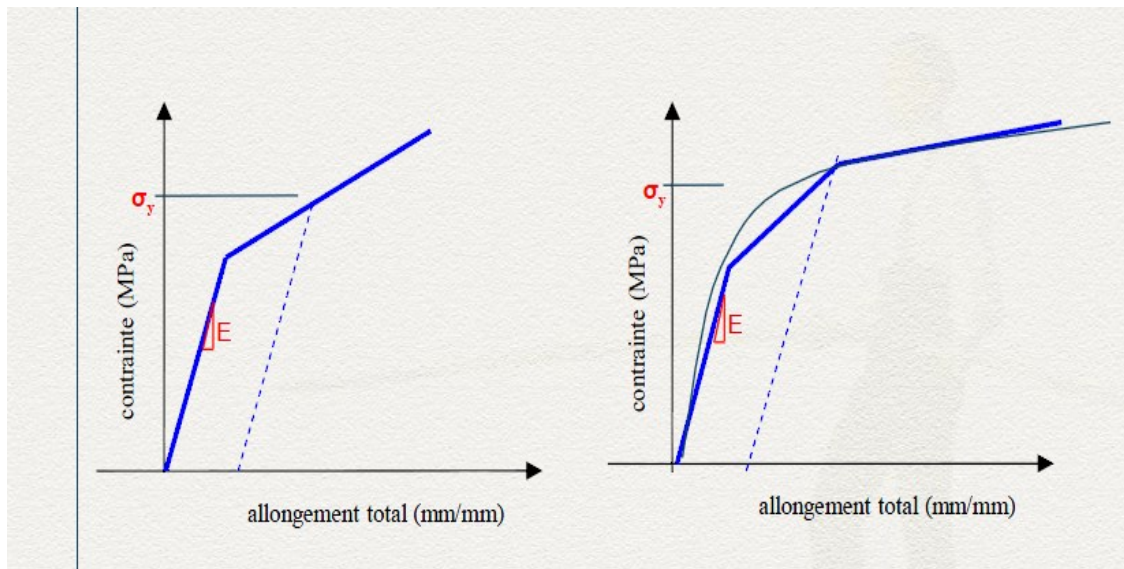
diamètre du fil. Cette résistance est bien supérieure à la résistance mécanique des fils en aluminium non allié et qui varie de 150-200 pour l'aluminium nuance 1350. Cependant, la conductivité électrique du 5005 est diminuée à cause de la présence du magnésium. Elle est supérieure à 53,5 % IACS contre une valeur supérieure à 61 % IACS pour l'aluminium 1350.

➤ **Alliages aluminium-magnésium-silicium de la série 6000**

Selon (Murry, 2004), l'alliage représentatif de cette série est le 6101 (ancienne dénomination A-GS/L ou Almelec). Par une association de traitements thermiques et mécaniques, cet alliage permet l'obtention d'une résistance mécanique égale au double de celle de l'aluminium conducteur non allié (nuance 1350). En contrepartie, sa conductivité électrique est de 10 % à 15 % inférieure. Cet alliage est surtout utilisé dans la fabrication des câbles nus aériens pour lignes de transport et de distribution d'électricité. En France, RTE (Réseau de Transport de l'Électricité) a généralisé l'utilisation de cet alliage à toutes les lignes moyenne et hautes tensions.

**b. Essai de fluage sur les brins d'aluminium**

Cette section présente quelques résultats d'essais de fluage effectués sur des brins d'aluminium disponibles dans la littérature scientifique. La figure 4 prise du cours de (Binette, 2012) présente des courbes typiques du comportement d'un fil d'aluminium. La figure 4 présente la cinématique linéaire et montre les modélisations usuelles pour l'étude des structures.



**Figure 4 : Modèles courants pour analyse — aluminium (adapté de [Binette 2012])**

La figure 4 illustre un comportement linéaire au début de l'essai, jusqu'à la contrainte  $\sigma_y$  appelée limite d'élasticité, suivie d'une réponse non linéaire.

Selon (Roest 1969), au début de 1967, une série systématique de tests a été lancée au sein des *laboratoires Reynolds* pour déterminer les propriétés de fluage des fils d'aluminium sous différentes conditions de contrainte et de température. Les figures 5 et 6 présentent quelques exemples de ces courbes de fluage des fils d'aluminium publiés par (Roest 1969). Les courbes présentent le fluage en fonction du temps pour des fils d'aluminium 1350 H19 de 4,5 mm de diamètre, pour différentes températures : 25 °C, 50 °C, 75 °C et 100 °C et sous deux niveaux de contraintes; 25 % et 20 % de la contrainte à la rupture.

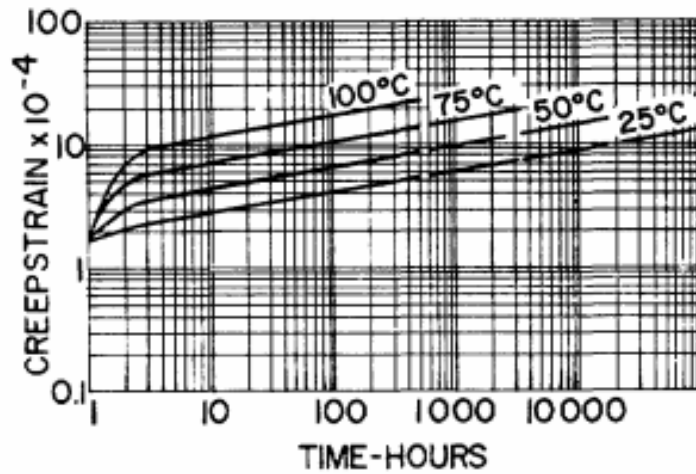


Figure 5 : Fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19 – contrainte = 25 %  $R_m$  (adapté de [Roest 1969])

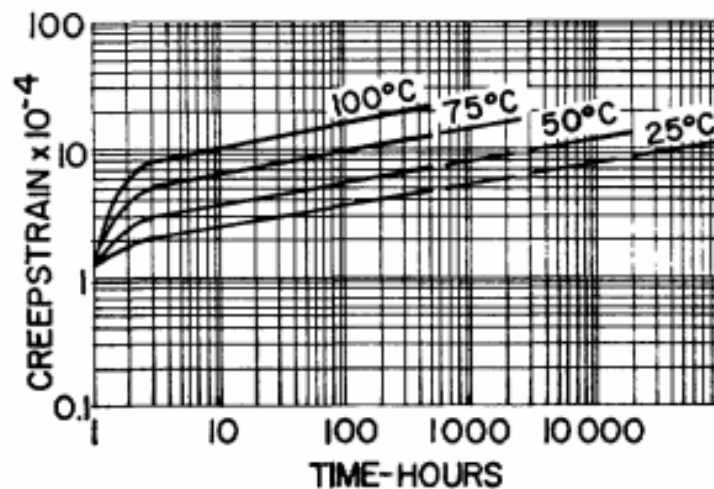
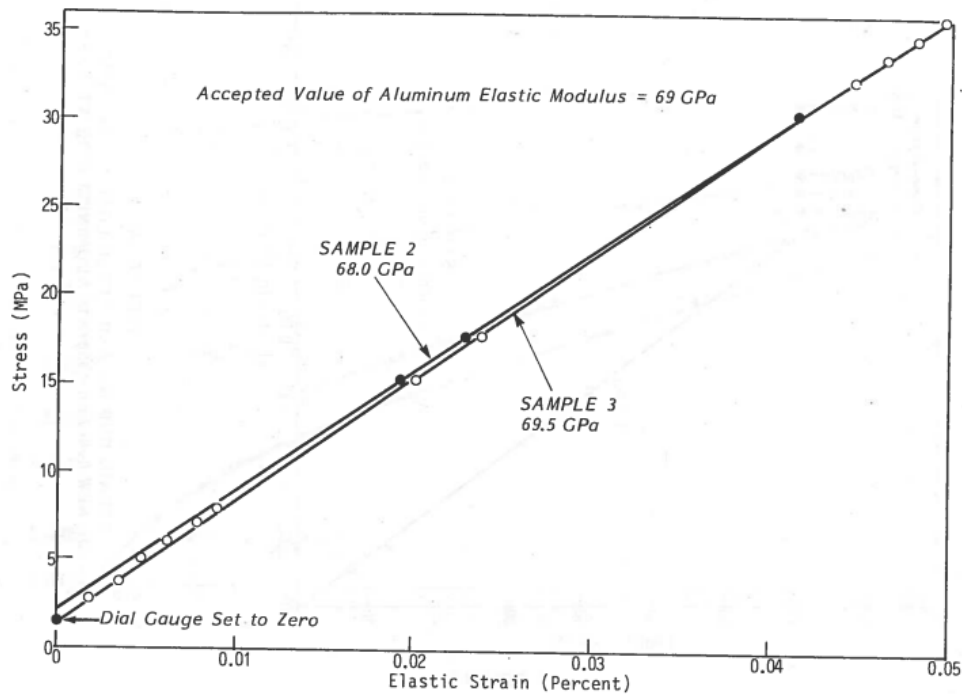


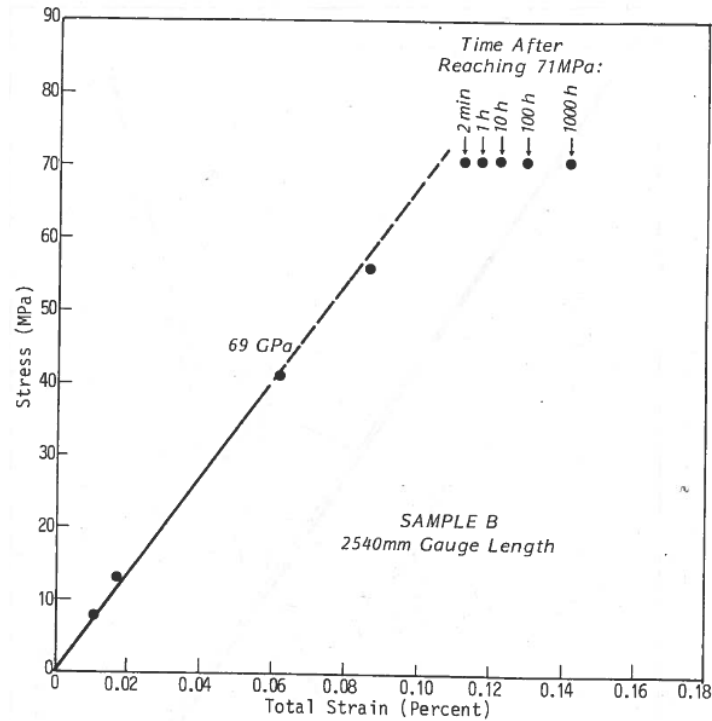
Figure 6 : Fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19 – contrainte = 20 %  $R_m$  (adapté de [Roest 1969])

Les figures 7 à 11 présentent des courbes de contrainte-déformation ainsi que des courbes de fluage pour différentes conditions de chargement. Ces courbes ont été déterminées à partir des essais effectués sur un fil d'aluminium 1350-H19 de diamètre 4.42 mm. Ces courbes sont les résultats des essais effectués par (Nigol et Barrett., 1982). Ce type de brins est couramment utilisé pour la fabrication des conducteurs ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*). Les figures 7 et 8 schématisent la déformation élastique d'un brin d'aluminium. La figure 7 présente les pentes élastiques pour deux échantillons

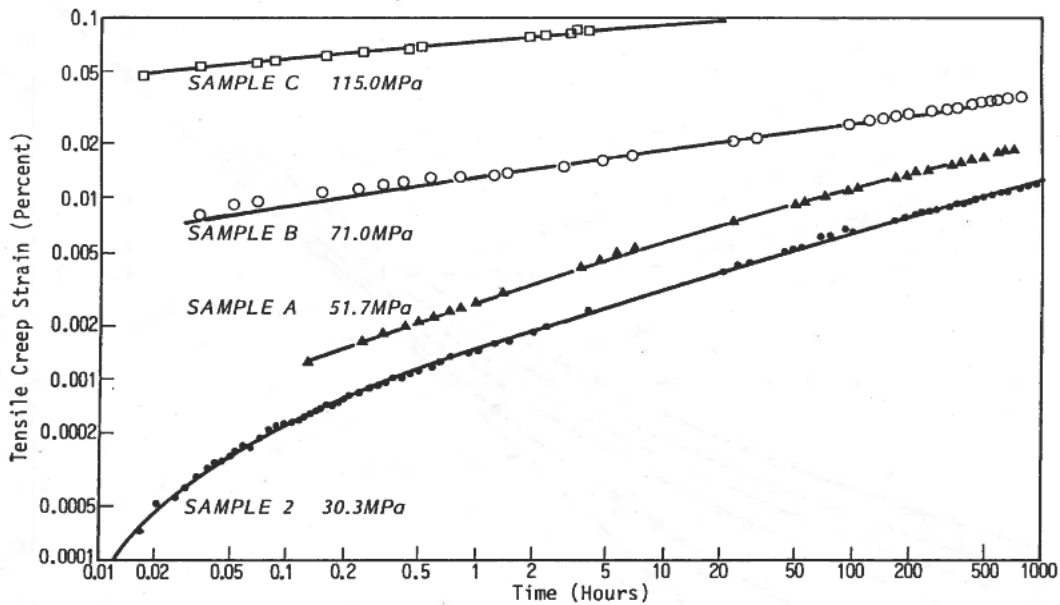
d'aluminium 1350-H19, à une température égale à 23,5 °C. Les valeurs de modules des modules élastiques obtenues sont égales à 68 GPa et 69,5 GPa. Ces deux valeurs sont très proches du module élastique théorique de l'aluminium égal à 69 GPa. La figure 8 présente la déformation durant le chargement jusqu'à 71 MPa d'un fil d'aluminium 1350-H19. Après l'application d'une charge croissante jusqu'à 71 MPa pendant une brève durée de temps, la déformation atteint 0,11%. Une fois la charge est maintenue constante à 71 MPa pendant 1000 heures, la déformation augmente jusqu'à 0,14 %.



**Figure 7 : Déformation élastique d'un fil d'aluminium 1350-H19 de diamètre 4,42 mm et à 23,5°C (adapté de [Nigol et Barrett, 1982])**

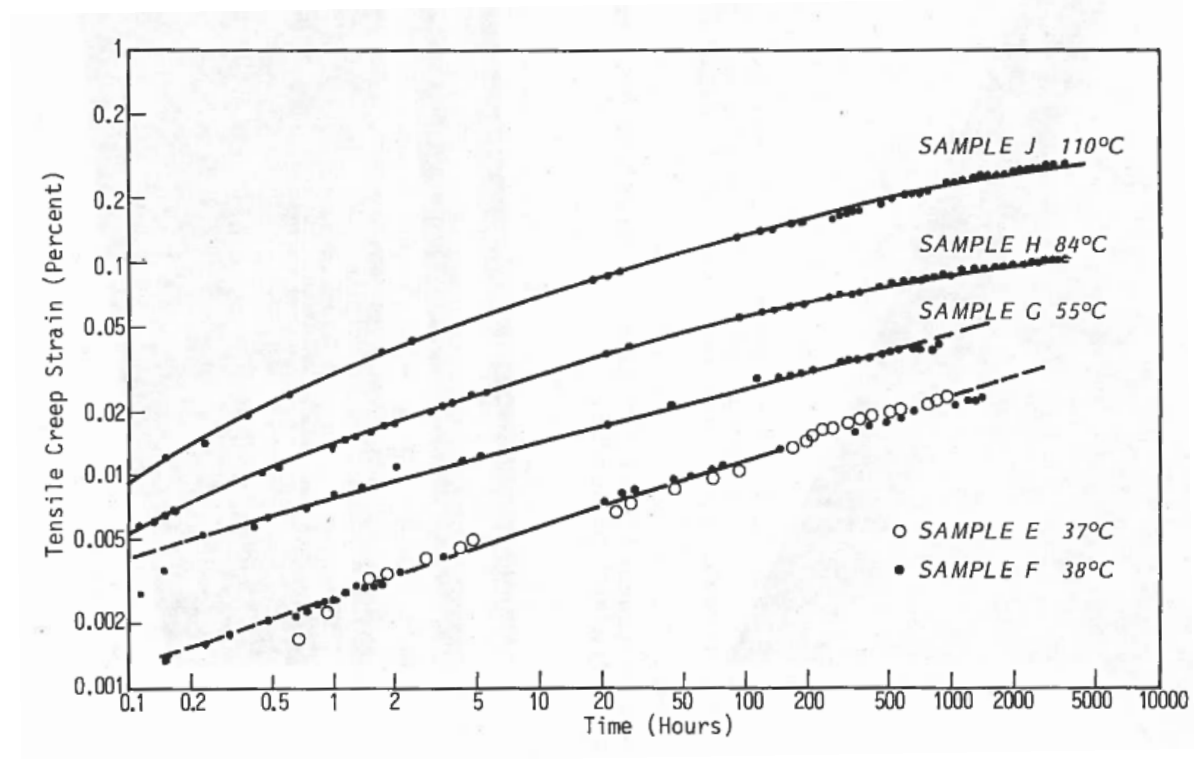


**Figure 8 : Déformation élastique d'un fil d'aluminium 1350-H19 pendant le chargement de 0 à 71 MPa et diverses déformées sous 71 MPa dans le temps à 23.5 °C (adapté de [Nigol et Barrett, 1982])**



**Figure 9 : Fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19 à 23.5 °C – contrainte constante (adapté de [Nigol et Barrett, 1982])**

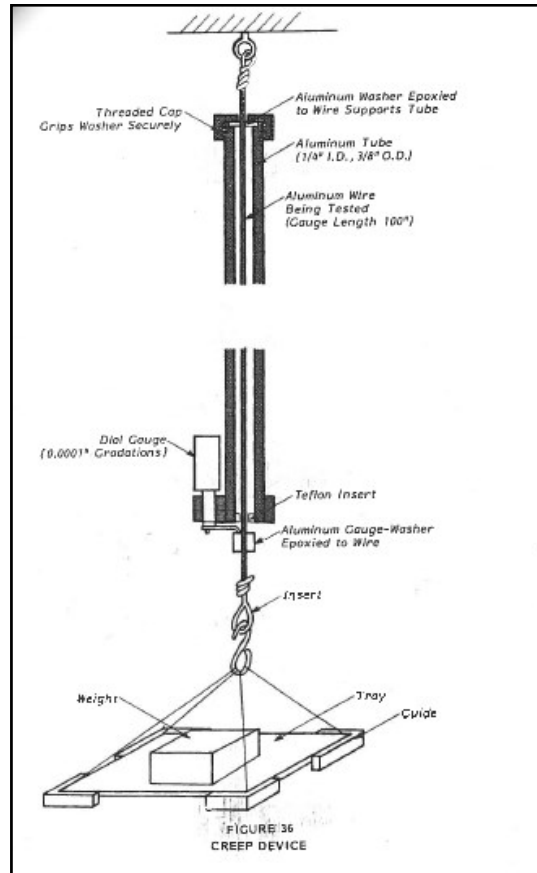
Les figures 9 et 10 présentent l'influence de la contrainte, du temps et de la température sur le fluage. La figure 9, qui présente l'influence de la contrainte appliquée sur le fluage de l'aluminium, montre que pour une contrainte égale à 115 MPa, la déformation atteint 0,1 % en 20 heures. Pour 71 MPa, la déformation est égale à 0,02% après 20 heures. De son côté, la figure 10 montre que pour des températures élevées situées entre 37°C et 110 °C, le fluage des brins d'aluminium augmente d'une manière remarquable. D'ailleurs, pour une température de 110 °C, on a un fluage qui est égal à 0,25 % à 3000 heures. Les essais à des températures plus élevées, qui sont présentés la figure 10 ont été réalisés en enroulant le dispositif de fluage avec un ruban de chauffage et une isolation.



**Figure 10 : Influence de la température et du temps sur le fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19 sous une contrainte de moins de 43 MPa (adapté de [Nigol et Barrett, 1982])**

Tous les essais présentés aux figures 8 à 11 ont été effectués par l'appareil de fluage illustré à la figure 11. Selon (Nigol, et Barrett, 1982), au-delà d'une certaine température transitoire

élevée, l'aluminium peut perdre toute sa tension et même subir une compression, le processus de fabrication impose alors des contraintes internes dans l'aluminium qui le maintiennent toujours sous tension à des températures élevées.



**Figure 11 : Dispositif de Fluage (adapté de [Nigol et Barrett, 1982])**

Dans cette partie, l'ensemble des résultats des essais effectués sur des brins d'aluminium utilisés pour des conducteurs ACSR ont été présentés. Ces essais ont été effectués par [Roest 1969] et [Nigol et Barrett, 1982]. Il est aussi à noter, que (CIGRE, 1981) présente en détail la procédure des essais sur les brins.

### **2.1.7 Fluage de l'acier**

L'acier est utilisé dans les âmes des conducteurs des lignes aériennes de transport d'énergie électrique afin d'assurer un renforcement mécanique. Les aciers sélectionnés pour cet usage possèdent une haute résistance en tension,  $\sigma_{ult} \geq 1200$  MPa, et sont reconnus pour

offrir une bonne résistance au fluage. En effet, l'acier est un matériau dont la déformation au fluage est moindre que celle de l'aluminium.

Selon (Murry, 1999), l'acier est constitué d'au moins deux éléments, le fer, très majoritaire, et le carbone, dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse.

### 2.1.7.1 Principaux fils d'acier pour conducteurs électriques

#### a. Acier galvanisé zinc– épaisseurs A, B, C

Selon la norme ASTM – B 498, les brins d'acier galvanisés zinc sont utilisés dans les conducteurs ASCR. La « galvanisation » de l'acier consiste à recouvrir ce dernier d'une fine couche de zinc. Le métal de base est en acier produit par le four à sole, four électrique, ou processus de four à oxygène. Le fil doit être étirés à froid et revêtus de zinc pour produire les propriétés désirées.

Les brins d'acier sont fournis dans trois classes de revêtement, Classe A, Classe B, ou C, conforme aux exigences du tableau 1 pour un brin d'acier de diamètre égal à 3 mm. (ASTM – B 498)

**Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques de l'acier galvanisé zinc slon la norme ASTM – B 498**

	Contrainte à 1% d'allongement (MPa)	Résistance à la traction ultime (MPa)	Allongement à 250 mm (%)
Classe A	1280	1410	3,5
Classe B	1210	1340	3
Classe C	1140	1280	3

#### b. Acier haute résistance galvanisé zinc

L'acier haute résistance galvanisé zinc est aussi utilisé dans les conducteurs ACSR. Le métal de base est en acier produit par le four à sole, four électrique, ou processus de four à oxygène. Le fil doit être étirés à froid et revêtus de zinc pour produire les propriétés désirées. Le tableau 2 présente les caractéristiques mécaniques de cet acier selon la norme ASTM- B606, pour un fil de diamètre 3 mm.



**Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques de l'acier haute résistance galvanisé zinc slon la norme ASTM – B 606**

Contrainte à 1% d'allongement (MPa)	Résistance à la traction ultime (MPa)	Allongement à 250 mm (%)
1410	1590	3

**c. Acier haute résistance galvanisé zinc-aluminium**

L'acier haute résistance galvanisé zinc-aluminium est utilisé dans les conducteurs ACSR. Le métal de base est en acier produit par le four à sole, four électrique, ou processus de four à oxygène.

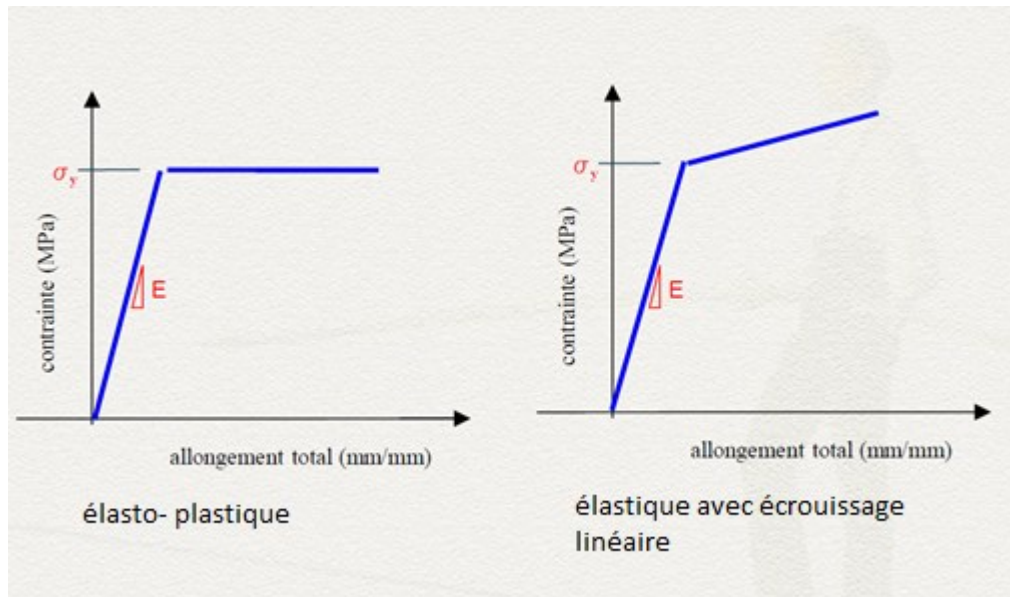
Le fil doit être étirés à froid et revêtu d'alliage Zn-5Al-MM pour produire les propriétés désirées.

**Tableau 3 : Caractéristiques mécaniques de l'acier haute résistance galvanisé zinc-aluminium slon la norme ASTM – B 803**

Contrainte à 1% d'allongement (MPa)	Résistance à la traction ultime (MPa)	Allongement à 250 mm (%)
1410	1590	3

**2.1.7.2 Essai sur les brins d'acier**

La figure 12 prise du cours de (Binette, 2012) présente des courbes typiques du comportement de l'acier. Ces courbes sont obtenues à partir d'une éprouvette standard et elles illustrent les modèles couramment utilisés pour l'analyse de structures en acier.



**Figure 12 : Modèles courants pour analyse structurale — Acier (adapté de [Binette 2012])**

La figure 13 présente les résultats des essais sur les brins d'acier effectués par (Nigol et Barrett, 1980). Afin de déterminer si l'allongement permanent du noyau d'acier a été causé par la mise en place des brins ou bien produit par les brins d'acier, des essais de contrainte-déformation ont été effectués sur les fils en acier droits. Les fils sont tendus jusqu'à ce que leur allongement atteigne environ 0,5 % dans chaque cas, puis sont tenus pendant 1 heure à tension constante. Ensuite, les fils ont été déchargés et le décalage avec l'axe zéro donne l'allongement permanent  $C_s$ .

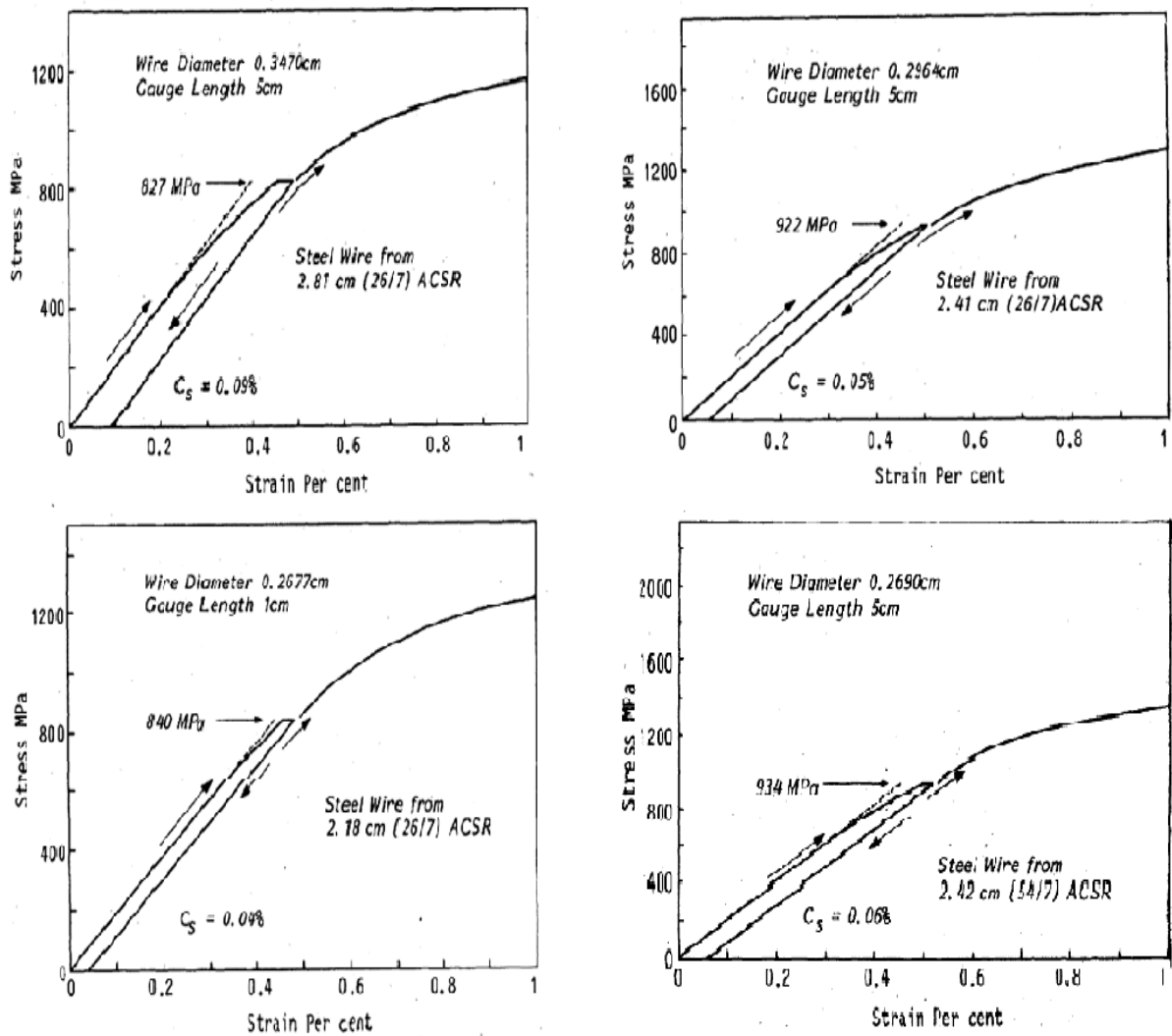
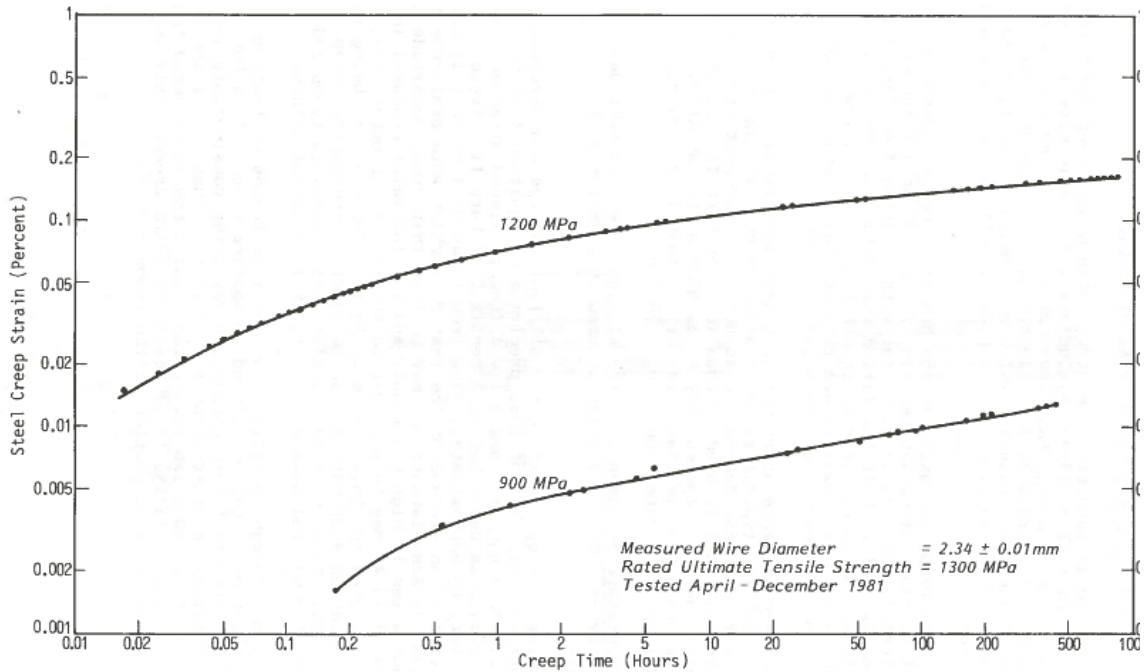


Figure 13 : Courbes de contrainte — déformation d'un fil en acier d'un conducteur ACSR (adapté de [Nigol et Barrett, 1980])

La figure 14 présente le fluage en fonction du temps à température ambiante d'un fil d'acier retiré du noyau du conducteur ACSR effectué par (Nigol et Barrett, 1980).



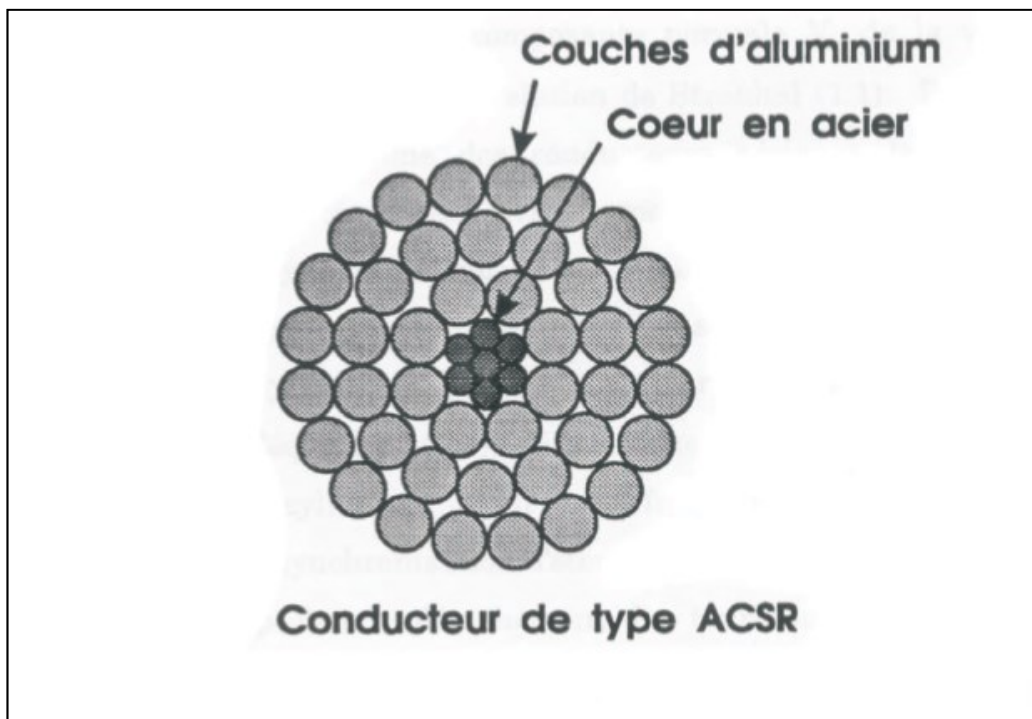
**Figure 14 : Fluage d'un fil en acier d'un conducteur ACSR (adapté de [Nigol et Barrett 1980])**

La courbe présente le fluage de l'acier en fonction du temps à des contraintes élevées de 1200 MPa et 900 MPa. On est dans le domaine élastique puisque les contraintes appliquées sont inférieures à la contrainte de rupture égale à 1300 MPa. On remarque qu'après une heure, le taux de fluage de l'acier diminue considérablement. Dans cette partie, le fluage de l'aluminium et le fluage de l'acier ont été étudiés séparément. Dans la partie suivante, le comportement mécanique du conducteur complet sera examiné.

## 2.2 Comportement mécanique des conducteurs

### 2.2.1 Introduction

Les conducteurs aluminium acier (ACSR : "Aluminum Conductor Steel Reinforced ») sont largement utilisés sur les lignes d'Hydro-Québec et en général dans le monde. La figure 15 montre une section transversale d'un conducteur ACSR classique. Ce câble est constitué de brins hélicoïdaux enroulés autour d'un fils d'âme, en couches successives à pas inversés. Pour le conducteur représenté à la figure 15, sept fils d'acier forment le noyau du conducteur et trois couches de fils d'aluminium sont ensuite enroulées autour.



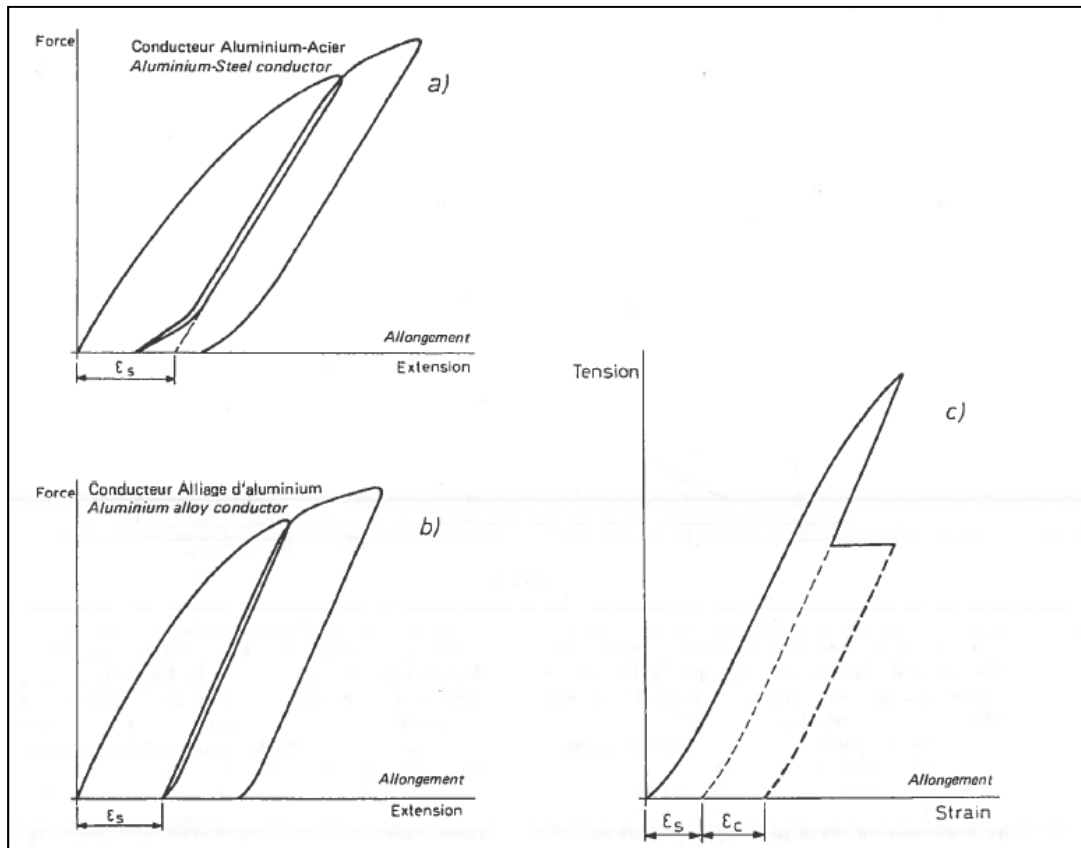
**Figure 15 : Section transversale d'un conducteur ACSR typique (adapté de [Leblond, 1995])**

Dans cette partie, le comportement mécanique et en particulier le fluage des conducteurs est étudié. Tout d'abord une brève description qualitative est présentée sur la façon dont se produit l'allongement inélastique d'un conducteur soumis à une tension mécanique

constante. Ensuite, les résultats de quelques essais de fluage sur des conducteurs ACSR disponibles dans la littérature sont présentés.

### 2.2.2 Allongement inélastique du conducteur

La figure 16, prise de (CIGRE. 1981), présente le comportement d'un conducteur toronné sous une charge mécanique croissante pendant une courte durée. La valeur de l'allongement  $\epsilon_s$  présentée sur la figure dépend de la charge maximale atteinte.



**Figure 16 : Comportement mécanique d'un conducteur soumis à une tension croissante (adapté de [CIGRE. 1981])**

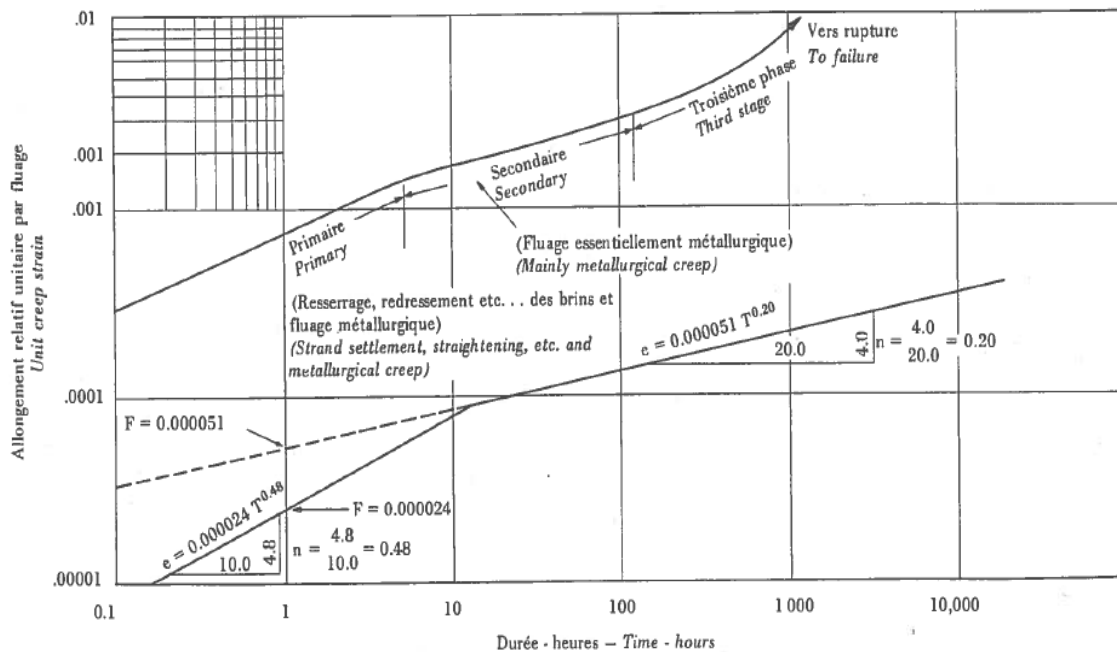
D'autre part, une valeur d'allongement  $\epsilon_c$  vient s'ajouter à  $\epsilon_s$  une fois que le conducteur est déchargé. Cette valeur varie en fonction du temps et elle est due au maintien de la charge pendant une durée de temps assez prolongée.

En fait, l'allongement permanent a trois composantes différentes :

- L'allongement du matériau dépendant de la tension maximale appliquée sur le conducteur : allongement plastique instantané.

- L'allongement dû aux efforts s'exerçant au croisement des fils : mise en place des brins
- L'allongement du matériau, dépendant de la durée pendant laquelle une charge donnée a été appliquée. : fluage métallurgique.

Ces trois types d'allongement sont définis en détail ci-dessous. L'allongement qui dépend du temps est en principe fonction du fluage métallurgique seulement. Cependant, en pratique, les deux autres formes d'allongement et surtout la mise en place des brins sont présents en particulier dans les premières heures suivant la mise responsable du conducteur. Par exemple, la courbe de la figure 17, adaptée de (CIGRE. 1981), expose l'allongement du fluage en fonction du temps sur un graphique log-log. Suivant la courbe, le fluage primaire est rapide, entre autres parce qu'il inclut une composante due à la mise en place des brins. Pendant la phase secondaire, le taux de fluage décroît et il est surtout métallurgique. Pour des charges et températures élevées, et après une durée importante, le conducteur entre dans la troisième phase du fluage qui peut provoquer la rupture des brins.



**Figure 17 : Courbes types d'allongement relatif par fluage en fonction du temps pour un conducteur (adapté de [CIGRE, 1972])**

### **2.2.2.1 Allongement plastique instantané**

C'est la déformation irréversible qui se produit par un réarrangement de la position relative des atomes, ou plus généralement des éléments constitutifs du matériau. C'est un allongement instantané qui est fonction de la charge appliquée et de la nature du matériau.

### **2.2.2.2 Mise en place des brins**

Ce phénomène est surtout présent durant une courte période après la mise en tension du conducteur. L'explication de ce phénomène réside dans la structure composite des conducteurs toronnés. Le processus de câblage ne serre pas suffisamment les fils ensemble, de sorte que si le toron est étiré, chaque fil prend une position vis-à-vis des autres. En outre, la production d'une action interne entre les couches provoque une déformation locale aux points de contact entre les fils des différentes couches, ce qui augmente l'allongement longitudinal durant la mise en place.

Il faut savoir que ce phénomène n'est pas tout à fait indépendant du temps. Cependant, pour des raisons pratiques, il peut être considéré comme terminé dans une période limitée de temps. (CIGRE. 1981).

## **3 Fluage métallurgique**

Quand un matériau est soumis à un effort mécanique pendant une longue période de temps, sa structure moléculaire interne connaît une modification permanente qui dérive directement des modifications internes de la structure du métal. Donc, le fluage métallurgique est une déformation qui dépend non seulement de la charge appliquée, des caractéristiques du conducteur et de sa température, mais aussi de la durée de la charge appliquée.

## **4 Facteurs influençant l'allongement inélastique total**

Les facteurs qui affectent la déformation inélastique et qui sont déjà indiqués dans la description du phénomène peuvent être classés comme suit :

### **➤ Facteurs externes**

Ces paramètres sont indépendants du conducteur, ils dérivent du milieu extérieur, des caractéristiques de construction, de l'utilisation de la ligne :

- Charge mécanique
- Température



- Équipement et procédés de pose.

➤ **Facteurs internes**

Ces paramètres concernent directement les caractéristiques des conducteurs:

- Type de matériaux (composition chimique, structure microscopique)
- Type de conducteur (caractéristiques géométriques et générales)
- Méthodes de fabrication

### **2.2.3 Essais sur les conducteurs**

#### **2.2.3.1 Essais de contrainte déformation sur les conducteurs**

Les figures 18 et 19 prises du cours de (Binette, 2012) présentent le modèle théorique de comportement d'un conducteur composite lorsque l'enveloppe d'aluminium ne reprend pas de compression. On remarque que la déformation plastique de l'aluminium devient importante pour des niveaux de contraintes élevées alors que la déformation plastique de l'acier est beaucoup plus faible. Ainsi, dans un conducteur ACSR (aluminium- acier), pour de faibles contraintes, une proportion importante de la charge est reprise par l'aluminium. À mesure que la contrainte augmente, la proportion de la charge qui est reprise par l'aluminium diminue. La charge reprise par chaque composant (aluminium, acier) varie donc selon l'allongement plastique de chaque composant.

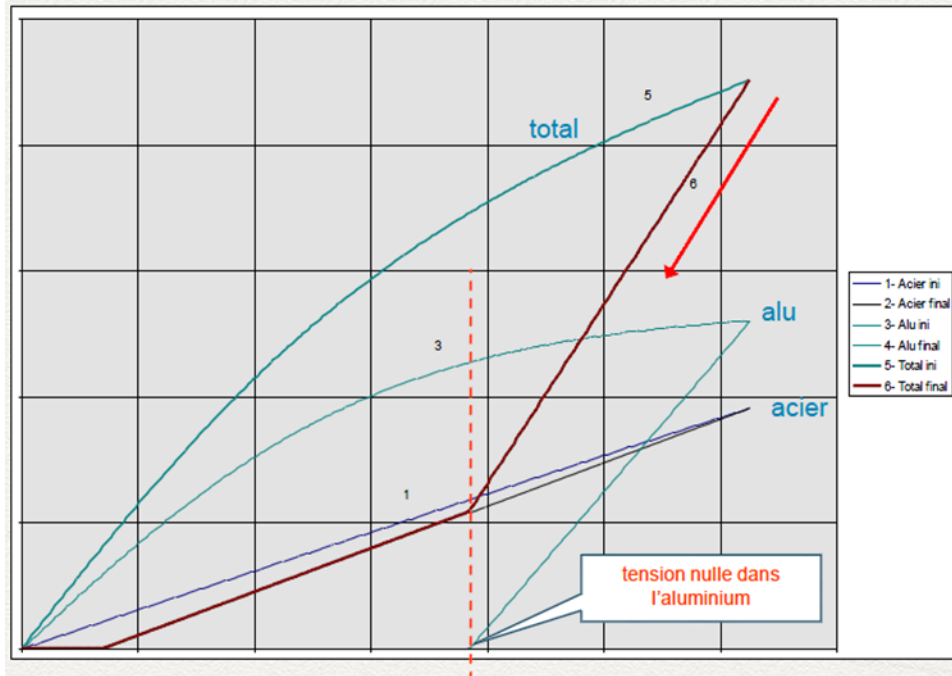


Figure 18 : Modèle théorique de comportement d'un conducteur composite (adapté de [Binette 2012])

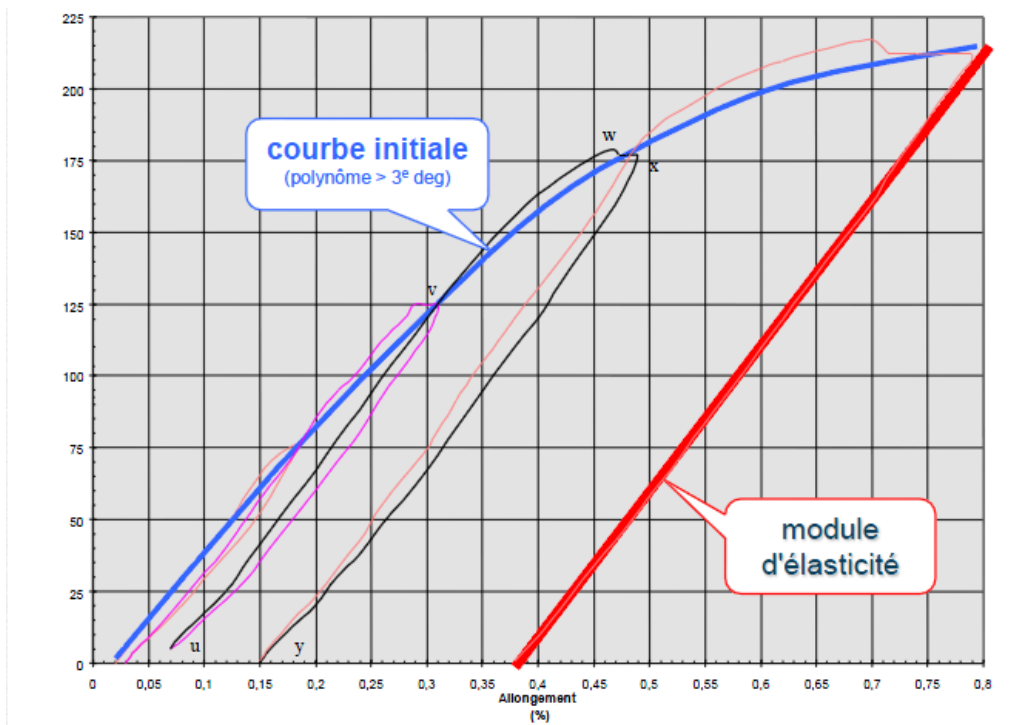
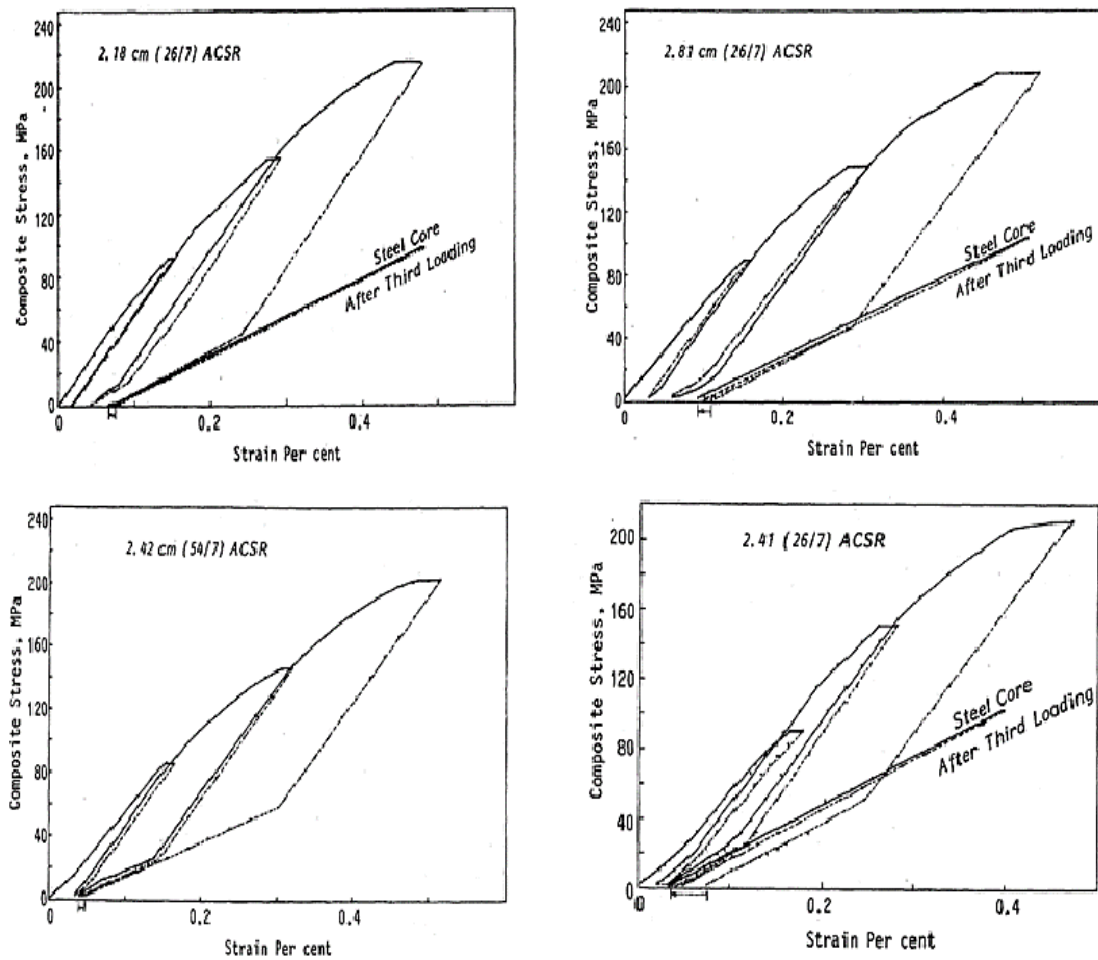


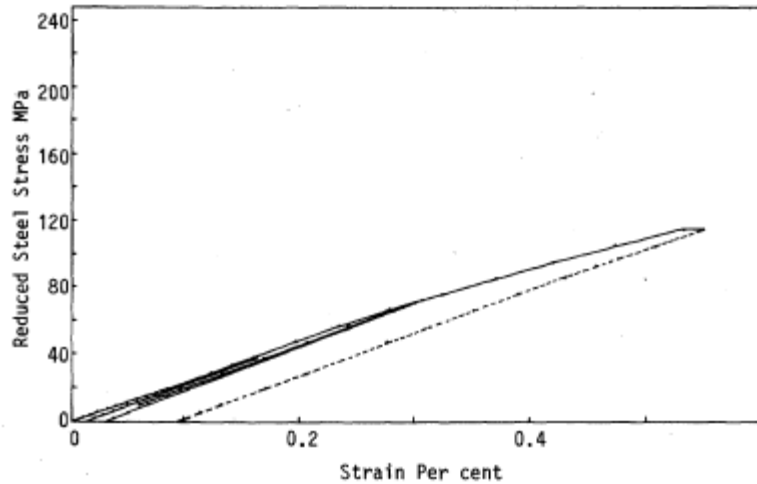
Figure 19 : Modélisation de la courbe initiale d'essai (adapté de [Binette 2012])



**Figure 20 : Courbes de contrainte déformation d'un conducteur ACSR (adapté de [Nigol, Barrett 1981])**

La figure 20 présente les courbes contrainte-déformation des conducteurs ACSR selon (Nigol, Barrett 1981). La "composite stress" dans les figures veut dire la contrainte moyenne appliquée sur le conducteur. Ces courbes sont à température ambiante, et présentent des courbes de charge décharge pour trois cycles de chargement. Les courbes illustrent également le comportement de l'acier après le troisième cycle de chargement. On remarque particulièrement un grand allongement après le troisième cycle de chargement jusqu'à 70 % de la tension ultime.

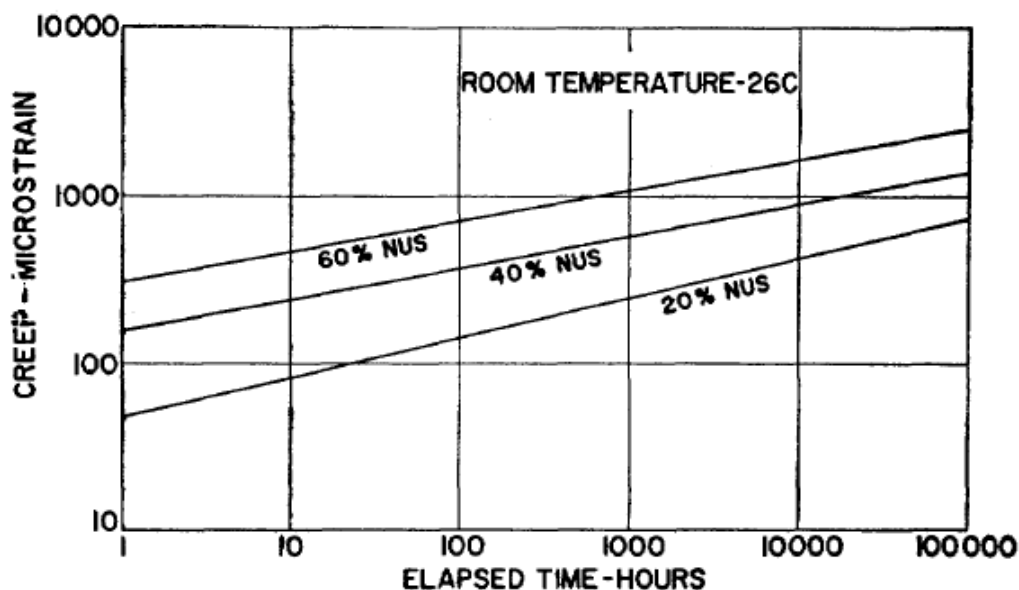
La figure 21 présente un essai de contrainte- déformation d'une nouvelle âme en acier. L'allongement permanent mesuré dans l'âme d'acier présenté dans la figure 21 est essentiellement le même que ceux des essais sur le conducteur complet dans la figure 20. Cela montre que l'allongement permanent de l'âme d'acier dans les courbe de contrainte déformation est dû au fluage du matériau et non pas à la mise en place.



**Figure 21 : Courbe de contrainte- déformation d'une nouvelle âme d'acier (adapté de [Nigol, Barrett 1981])**

### 2.2.3.2 Essais de fluage sur les conducteurs

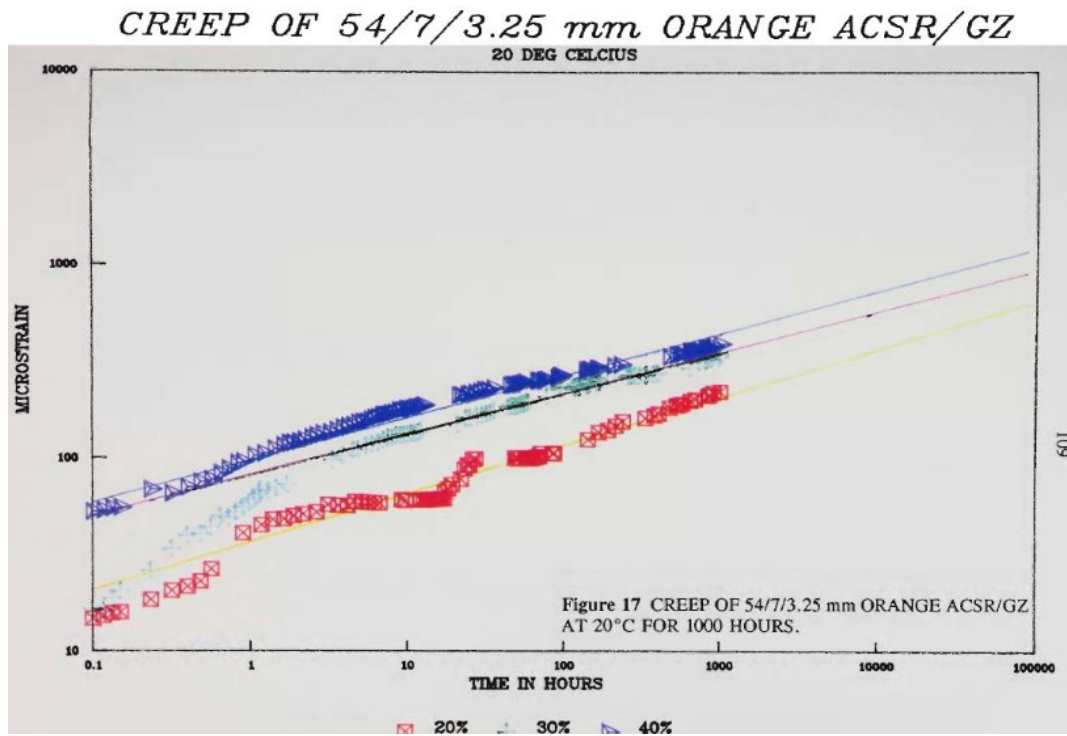
Selon (Harvey, 1969), depuis le milieu des années 1930, la méthode graphique Alcoa de calcul de flèche et de la tension a inclus l'effet de fluage. Cette méthode utilise les données obtenues à partir des essais de fluage réalisés en laboratoire pour déduire la valeur de fluage qui se produit sur une ligne donnée. Alcoa, de même que plusieurs autres fabricants tels Alcan, a fait de nombreux essais de fluage sur les conducteurs électriques dans différentes conditions depuis 1957. La figure 22 présente un essai de fluage sur un conducteur ACSR sous différentes contraintes.



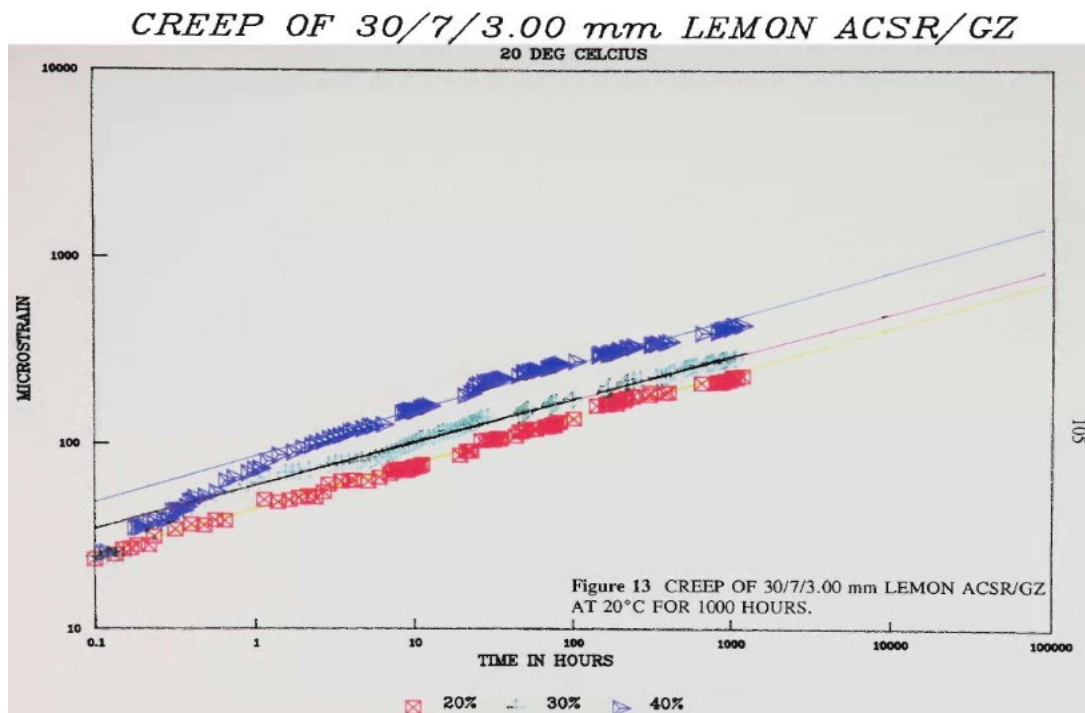
**Figure 22 : Fluage d'un conducteur ACSR à température ambiante (adapté de [Harvey, 1969])**

Les essais de fluage sous une tension constante et à la température ambiante sont utilisés pour prévoir le fluage des conducteurs ACSR utilisés dans les lignes aériennes. Ces essais ont été effectués pour des tensions égales à 20%, 40% et 60% de la résistance ultime nominale NUS (*nominal ultimate strength*). D'après (Harvey, 1969), le fluage seul a peu d'intérêt pour les industriels, mais l'effet de fluage sur la flèche des conducteurs a un grand intérêt.

Les figures 23 et 24 présentent des courbes de fluage pour deux types de conducteurs ACSR 30/7/3 mm et ACSR 54/7/3, 25 mm. Ces essais ont été effectués par (Drury, 1993) à une température égale à 20 °C et pour trois niveaux de contrainte 20 %, 30 % et 40 % de la tension ultime. Sur les figures, les nuages de point sont présentés pour chaque niveau de contrainte. La courbe tendance linéaire après une heure est également présentée. Les points avant une heure ne sont pas situés tout à fait sur la ligne tendance linéaire. Ceci est admissible puisque suivant la norme (IEC 61395, 1998) les résultats avant une heure sont pris pour information seulement.



**Figure 23 : Courbes de fluage d'un conducteur ACSR 30/7/3 mm (adaptée de (Drury, 1993))**



**Figure 24 : Courbes de fluage d'un conducteur ACSR 54/7/3,25 mm (adaptée de (Drury, 1993))**

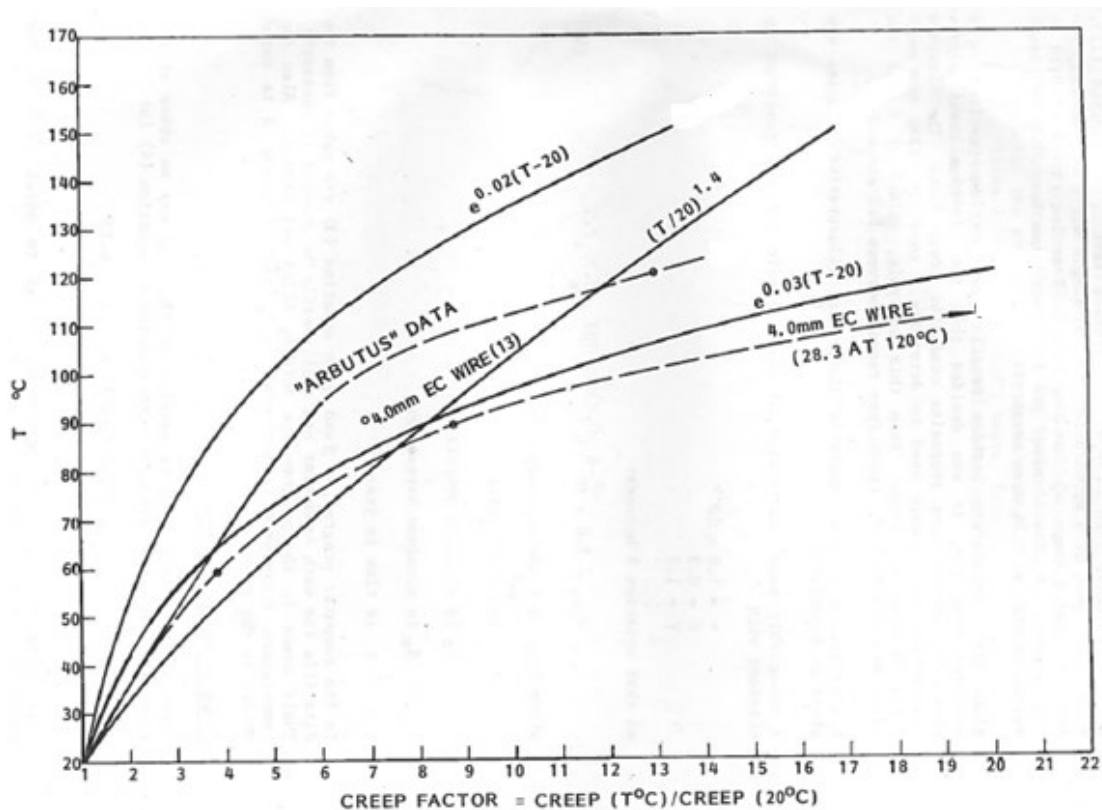
#### **a. Influence de la température sur le fluage**

Les courbes de fluage des conducteurs composites qui sont couramment utilisées ne comportent pas l'influence de la température. Selon (IEEE Committee Report, 1964) et (Harvey 1969), à des températures élevées (70°C à 150°C), l'augmentation de la ductilité des brins d'aluminium dans les conducteurs ACSR est assez compensée par la diminution de la contrainte dans l'aluminium, ce qui peut justifier l'utilisation des courbes de fluage à température ambiante dans l'estimation du fluage du conducteur. Cependant, (Harvey, Larson 1970) et (Bradbury, Dey et al. 1975) ont observé l'excès de fluage à des températures élevées et particulièrement dans les conducteurs ayant un petit rapport de l'acier à l'aluminium. La figure 25 présente la température (°C) en fonction du facteur

fluage selon (Nigol et Barrett, 1980). Le facteur de fluage est défini par le rapport du fluage à une température T au fluage à température ambiante (20°C).

(Harvey, Larson 1970) ont exprimé le facteur fluage en fonction de la température du conducteur composite par la relation suivante  $(T/20)^{1.4}$  pour des températures entre 25 °C et 150 °C. (Bradbury, Dey et coll. 1975) ont utilisé la fonction  $e^{0.02(T-20)}$  et les données de (Roest 1969) semblent correspondre avec cette fonction assez bien. (Nigol et Barrett, 1980) ont utilisé la fonction  $e^{0.03(T-20)}$  pour décrire le facteur fluage en fonction de la température pour les fils d'aluminium.

On remarque à partir de la figure 25 que les connaissances sur le fluage à haute température des conducteurs donnent des valeurs de fluages très différentes. Par exemple, pour une température de 70 °C, le facteur de fluage varie entre approximativement 3 et 6.



**Figure 25 : Comparaison des données réelles de fluage de références différentes avec différentes lois de fluage adaptées de (Nigol et Barrett, 1980))**

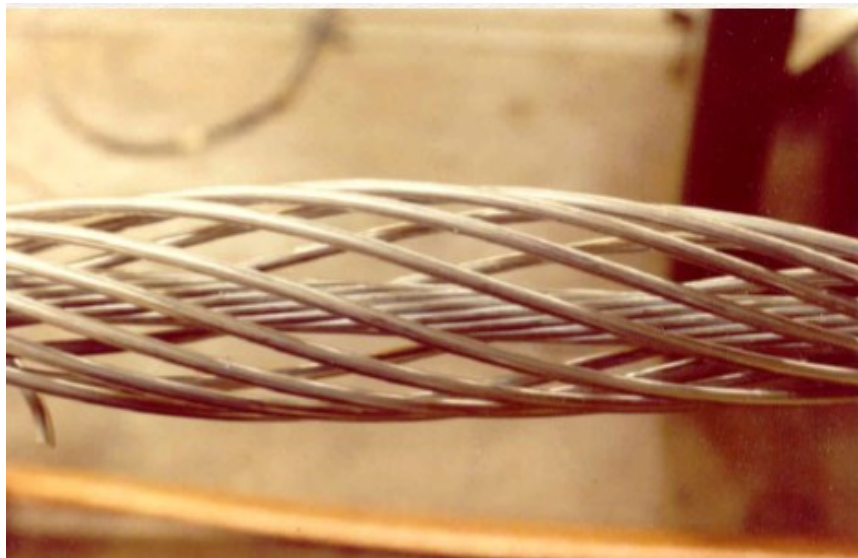


### **b. Phénomène de birdcaging**

Au fur et à mesure que la température d'un conducteur en aluminium acier augmente, une partie proportionnellement plus grande de la charge de tension du conducteur est reprise par l'âme d'acier puisque le coefficient de dilatation thermique de l'aluminium est plus élevé que celui de l'acier. En fait, au-delà d'une certaine température transitoire élevée, l'aluminium peut perdre toute sa tension et même subir une compression : la température « birdcaging »

Dans la figure 26 prise de (Nigol et Barrett, 1980), la couche externe d'aluminium a été enlevée et par la suite, les brins de la couche suivante (en aluminium aussi) ont flambé. Ce qui prouve la présence de compression dans ces brins. Selon (Nigol et Barrett, 1980), le phénomène de « birdcaging » qui signifie la compression de l'enveloppe externe, quand la température dépasse la température « birdcaging », comme on le voit dans la figure 26.

L'enveloppe externe peut reprendre une légère compression pour une contrainte de 8 MPa à 15 MPa. En conséquence, il y aura une augmentation des flèches à haute température.



**Figure 26 : Compression de l'enveloppe (adapté de [Binette 2012])**

### c. Allongement thermique des conducteurs

La figure 27 présente l'allongement thermique des conducteurs ACSR selon (Michael et coll. 2008). Elle présente le comportement de l'allongement du conducteur en fonction de la température. Ces courbes ont été déterminées pour quatre niveaux de contrainte égales à 0 %, 10 %, 15 % et 20 % de la charge de rupture calculée.

Le diagramme qui en résulte peut être divisé en trois zones. La séparation des zones est présentée dans la figure 27 par une ligne pointillée rouge et indique le point de transition qui correspond à une température égale à 0°C. Les trois zones sont les suivantes :

1. La zone en dessous de la ligne pointillée rouge et pour les variations de températures supérieures à 0°C : les fils d'aluminium sont complètement déchargés et les propriétés du conducteur ACSR changent et ressemblent à un conducteur à âme d'acier à haute résistance ACSS (*Aluminum Conductor Steel Supported*). Dans ce cas, c'est l'acier uniquement qui porte la charge. Ceci est expliqué par la dilatation thermique plus élevée de l'aluminium. L'allongement en fonction de la température sera plus faible en raison du faible coefficient de dilatation de l'acier.
2. La zone en dessous de la ligne pointillée rouge et pour les températures inférieures à 0°C : l'aluminium seul qui supporte la charge. Ceci pourrait être expliqué par la contraction de l'acier, causée par la faible dilatation thermique de l'acier.
3. La zone au-dessus de la ligne pointillée rouge : l'aluminium et l'acier portent la charge avec distributions variables. Ça représente le comportement d'un conducteur ACSR.

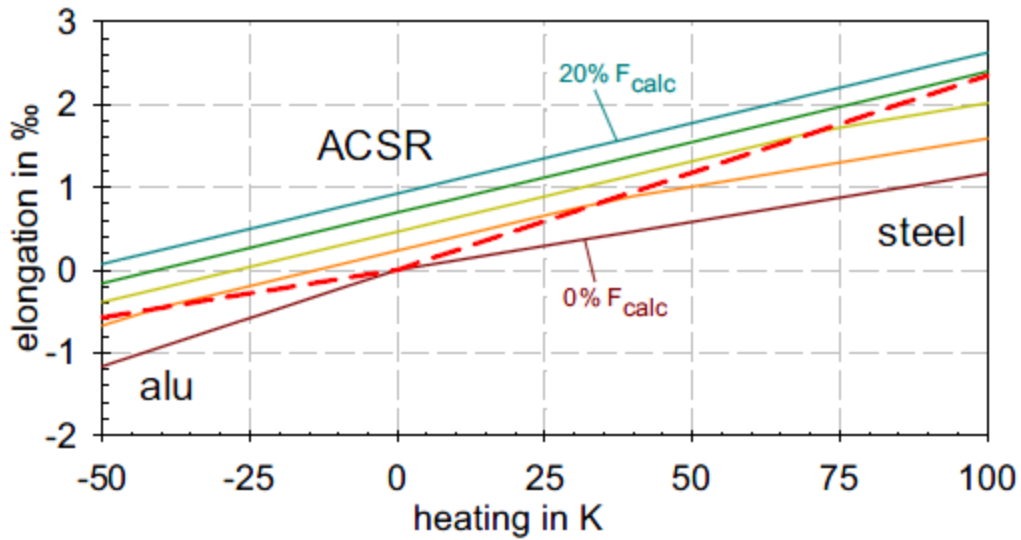


Figure 27 : Allongement thermique d'un conducteur ACSR (adapté de [Michael et coll. 2008])

La figure 28 présente l'allongement thermique de certains conducteurs ACSR selon [Nigol et Barrett, 1981].

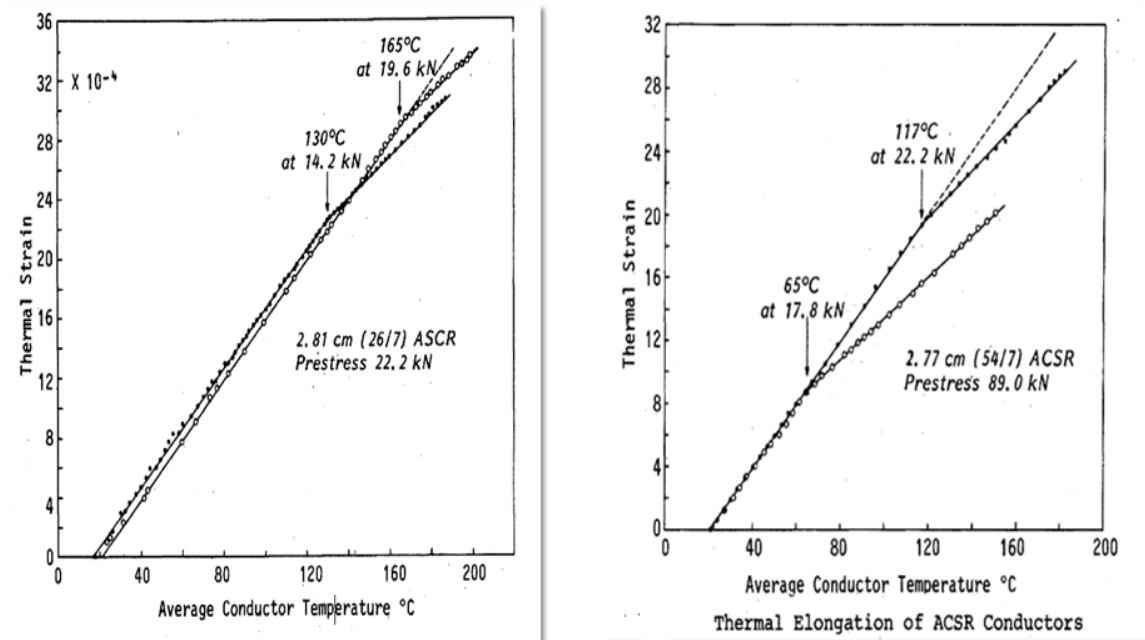


Figure 28 : Allongement thermique d'un conducteur ACSR (adapté de [Nigol, Barrett 1981])

Pour déterminer le comportement à haute température des conducteurs ACSR (supérieures à 50° C), les allongements ont été mesurés sur des échantillons de 25 m en fonction de la

température et à une tension constante. On remarque que plus la tension appliquée est élevée, plus la température de « birdcaging » du conducteur est élevée. Ceci est vrai, puisqu'une tension élevée sur les fils d'aluminium exige plus de dilatation thermique avant que la charge ne soit transférée au noyau.

#### d. Modèle thermique simple

Le comportement thermique des conducteurs ACSR à des températures de fonctionnement plus élevées est illustré par le modèle simple illustré à la figure 29.

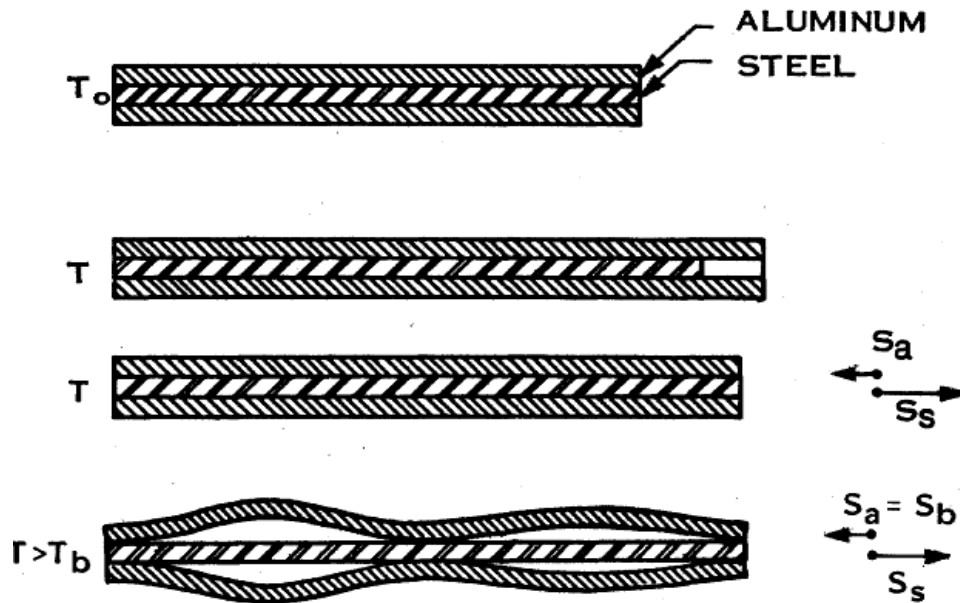


Figure 29 : Modèle thermique simple (adapté de [Nigol, Barrett 1981])

L'esquisse du haut montre le conducteur à la température ambiante de référence ou lorsque les longueurs non contraintes des éléments en aluminium et de l'acier sont égales. Le deuxième croquis montre la libre dilatation thermique du conducteur sans contrainte où les deux composants ont des longueurs différentes. Le troisième dessin montre la situation dans laquelle les deux membres sont obligés d'occuper la même longueur, ce qui entraîne une plus grande élongation de l'âme d'acier que dans le cas de l'expansion libre. Ceci est dû à une charge de compression dans l'aluminium qui doit être équilibré par une force de traction égale à l'âme en acier. L'esquisse inférieure illustre la condition de fils

d'aluminium avec une contrainte de compression  $S_b$  constante sur l'aluminium au-dessus de la température « birdcaging ».

#### **e. Adaptation pour fluage total**

Grâce aux figures 30, 31 et 32 provenant de (CIGRE. 1981), il est possible d'adapter à d'autres conducteurs, pour des tensions et des températures différentes, les caractéristiques de fluage connues pour un conducteur donné. Les courbes (figures 30, 31 et 32) fournissent les éléments nécessaires à l'évaluation du fluage de n'importe quel conducteur aluminium-acier et aluminium homogène.

Dans la figure 30, la ligne solide permet de déterminer directement le fluage pour 30 ans à 20 % de la charge de rupture et à température ambiante pour des conducteurs avec des brins d'aluminium obtenus à partir de fils laminés. La ligne en pointillé donne le facteur de fluage en fonction du pourcentage d'acier du poids total à température ambiante et à 20 % de la charge de rupture. Plus le pourcentage d'acier augmente, plus le fluage diminue. Le point de base correspond à 20 % d'acier.

Dans la figure 31, le fluage à une tension donnée (exprimée en pour cent de la charge de rupture) est égal au fluage à 20 % de la charge de rupture multipliée par le facteur de fluage. Les données de la figure 32 proviennent surtout de renseignements obtenus par l'intermédiaire du CIGRÉ (Conseil international des grands réseaux électriques) ou de l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Cette courbe montre que le fluage des conducteurs tout aluminium est beaucoup plus élevé que le fluage des conducteurs aluminium-acier. En outre, on observe qu'elle donne un facteur de fluage de seulement 1,4 à 70°C pour les conducteurs aluminium-acier. Ceci est beaucoup plus faible que les facteurs de 3 à 6 observés à la figure 25. Le facteur de fluage étant défini par le rapport du fluage à une température T au fluage à température ambiante (20°C).

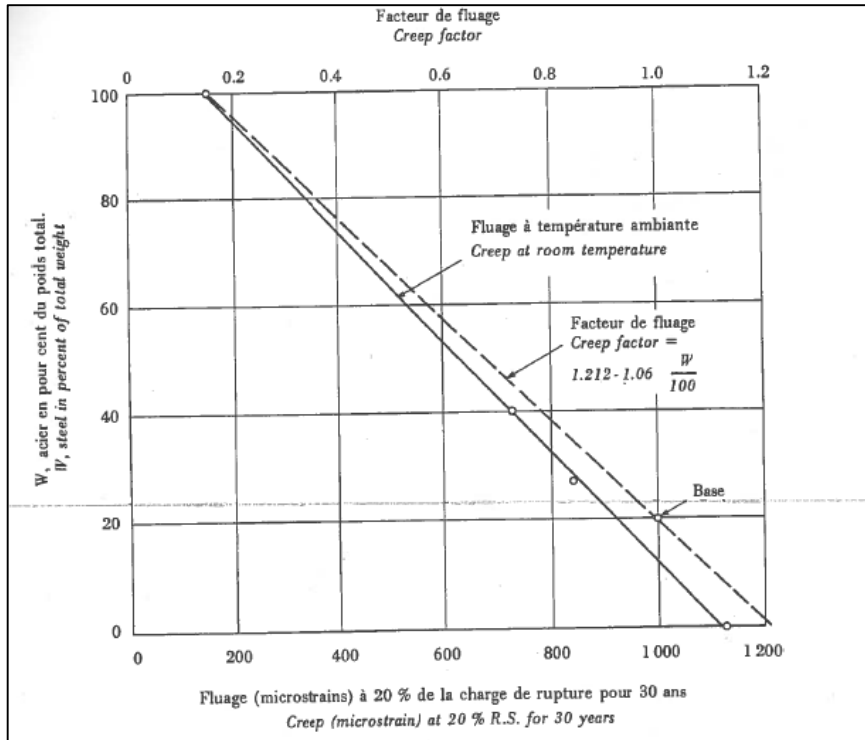


Figure 30 : Fluage à 20 % de la charge de rupture pour 30 ans en fonction du % d'acier V facteur de fluage [adaptée de (CIGRE. 1981)]

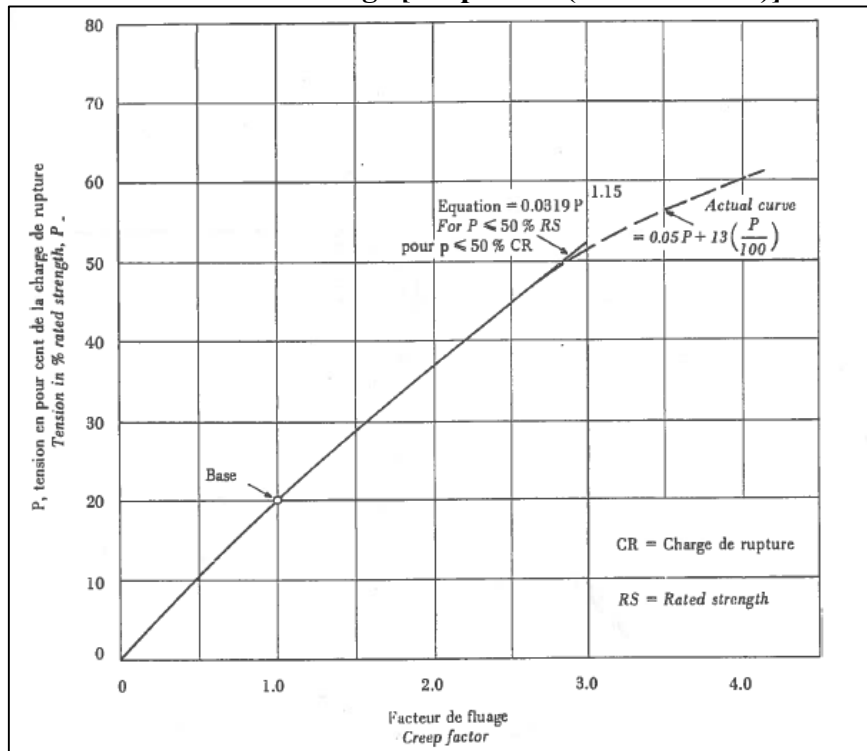


Figure 31 : Tension en fonction du facteur de fluage [adaptée de (CIGRE. 1981)]

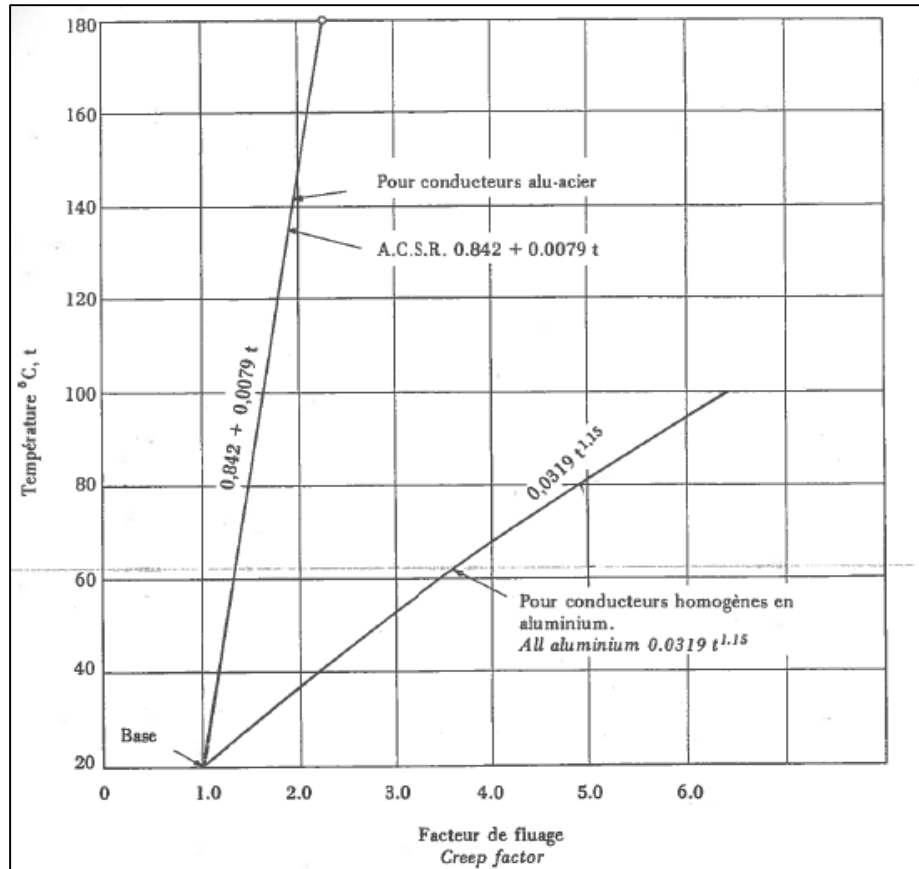


Figure 32 : Courbes température- Facteur de fluage (adaptée de (CIGRE. 1981))

## 2.3 Mécanique des câbles

### 2.3.1 Introduction

La principale propriété mécanique des câbles est leur capacité à résister à des charges élevées en tension, tout en présentant des rigidités relativement faibles en flexion et en torsion. La modélisation du cas le plus simple, le chargement axial d'un câble dans le domaine élastique, peut être réalisée de manière généralement satisfaisante, alors que la modélisation du comportement en flexion s'avère plus complexe à traiter (Cardou 2006).

### 2.3.2 Comportement du brin

La déformation peut être d'origine mécanique ( $\epsilon_m$ ), thermique ( $\epsilon_t$ ) et de fluage ( $\epsilon_{creep}$ ). Chaque déformation est évaluée individuellement et elles sont ensuite additionnées pour obtenir la déformation totale du brin (Albizu, Mazon et al. 2009) :

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^m + \varepsilon_i^\tau + \varepsilon_i^{creep} \quad \text{Équation 5}$$

### a. Comportement mécanique

Le comportement mécanique est supposé élastique linéaire. La relation entre la contrainte dans le fil et la déformation dans le fil est déterminée par le module d'élasticité du brin.

$$\varepsilon_i^m = \frac{\sigma_i}{E_i} + \varepsilon_{pl} \quad \text{Équation 6}$$

Où :  $\varepsilon_{pl}$  : la déformation plastique qui correspond au décalage entre le zéro et la pente élastique.

### b. Comportement thermique

La déformation due à la dilatation thermique est caractérisée par le coefficient de dilatation thermique.

$$\varepsilon_i^\tau = \alpha_i \times (\tau - \tau_0) \quad \text{Équation 7}$$

La température de référence correspond à la température de fabrication, car elle est la température à laquelle si le noyau et l'aluminium ont la liberté de mouvement, ils ont la même longueur.

### c. Fluage

Le fluage du fil est exprimé à partir d'une loi approximative qui provient de CIGRE, 1981) :

$$\varepsilon_i^{creep} = K \cdot e^{\phi\tau} \cdot \sigma_i^\alpha \cdot t^\mu \quad \text{Équation 8}$$

Où :  $\alpha$ ,  $\mu$ ,  $\phi$  et  $K$  sont des coefficients évalués d'une façon expérimentale. La méthode d'évaluation des coefficients sera présentée dans la partie méthodologie du chapitre 5. (Paragraphe 5.5)

La déformation totale du brin peut alors être obtenue :



$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_i} + \varepsilon_{pl} + \alpha_i \cdot \Delta\tau + K \cdot e^{\phi\tau} \cdot \sigma_i^\alpha \cdot t^\mu$$

**Équation 9**

### 2.3.3 Comportement du câble

#### a. Géométrie d'un câble

Ce travail concerne les conducteurs utilisés dans les lignes de transport d'énergie électrique et qui partagent les caractéristiques suivantes :

- Câble hélicoïdal à un seul toron.
- Tous les brins d'une même couche sont du même matériau et ont le même diamètre.
- Tous les brins sont ronds.
- Il y a alternance du sens d'enroulement des couches.
- La tension est répartie dans l'ensemble des brins.

#### b. Câble soumis à un chargement axial

Sous l'action d'une force de traction externe F, les brins constitutifs des conducteurs sont soumis à des efforts de traction, de flexion, de torsion et de cisaillement. Selon (Lanteigne, 1985), et en se rapportant à la figure 33, la relation d'un brin est reliée à l'élongation du câble  $\varepsilon_c = dl_c/l_c$  par la relation suivante :

$$\varepsilon_i = \varepsilon_c \cos^2 \beta_i + \tau_c R_i \sin \beta_i \cos \beta_i$$

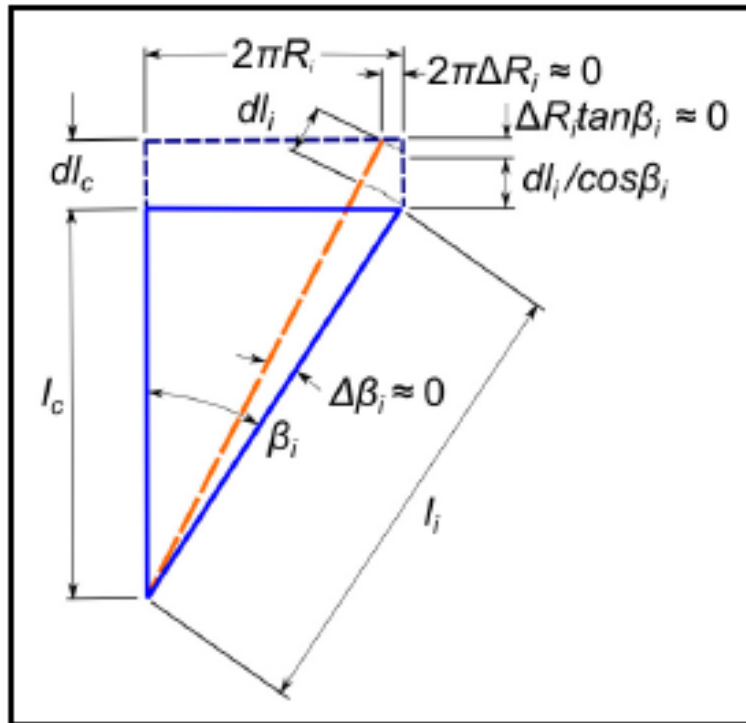
**Équation 10**

Où  $\beta_i$  représente l'angle d'enroulement de la couche i,  $R_i$  correspond au rayon de la couche i et  $\tau_c = d\Phi_c / l_c$  représente l'effet de rotation.

Cependant (Hruska 1951), propose une relation plus simple qui tient compte uniquement de l'effort axial dans le brin et suppose une rotation nulle du câble :

$$\varepsilon_i = \varepsilon_c \cos^2 \beta_i$$

**Équation 11**



**Figure 33 : Relation entre l'élongation du câble et celle du brin (adapté de (Feyrer 2007))**

Où  $l_c$  : la longueur du câble,  $l_i$  : la longueur d'un brin  $i$

Plusieurs modèles plus complexes, tenant compte de la flexion, de la torsion et du cisaillement des brins, ont été publiés par (Costello 1990) et (Knapp 1979).

### c. Flexion d'un câble

Lorsque la section d'un câble est soumise à un moment de flexion, chacun des brins doit être traité séparément, car l'uniformité des brins d'une même couche disparaît. Par conséquent, la complexité du problème s'accroît.

La flexion d'un câble est généralement étudiée en imposant une courbure constante  $k_c$  à l'axe central et en calculant le moment de flexion  $M$  correspondant. La rigidité sécante en flexion peut ensuite être déterminée par la relation  $EI=M/k_c$  (Cardou, Jolicoeur 1997).

#### d. Équilibre statique interne du câble

La relation suivante présente l'équilibre statique interne du câble :

$$F = \sum_{\text{tous les brins}} F_{i,j} = \sum T_{i,j} \cos \beta_i \quad \text{Équation 12}$$

Avec  $T_{i,j}$  : tension dans le brin  $j$  de la couche  $i$ .

Le câble subit un allongement relatif  $\varepsilon_c$  sous l'action de la force externe  $F$ . Dans une section droite de câble, la tension est uniforme pour tous les brins d'une même couche, ce qui donne  $T_{i,j}=T_i$ . On aura alors:

$$F = \sum_i F_i = \sum T_i \cos \beta_i \quad \text{Équation 13}$$

$$= \sum \sigma_i A_i \cos \beta_i \quad \text{Équation 14}$$

Avec  $A_i$  : Aire d'un brin de la couche  $i$

Dans la section 5.2, un exemple de calcul des contraintes dans les brins est fait en utilisant les expressions analytiques présentées dans cette partie.

La contrainte dans une couche du conducteur dépend de la rigidité axiale de ses brins et donc du matériau utilisé pour cette couche. Les équations 15 et 16 expriment les contraintes dans les brins d'aluminium et d'acier en fonction de la tension équivalente dans le conducteur (EPRI, 2006) :

$$\sigma_{AL} = \frac{T * E_{AL}}{E_{AL} * A_{AL} + E_{ST} * A_{ST}} \quad \text{Équation 15}$$

$$\sigma_{ST} = \frac{T * E_{ST}}{E_{AL} * A_{AL} + E_{ST} * A_{ST}} \quad \text{Équation 16}$$

Avec :

$T$  : Tension équivalente dans le conducteur

$A_{al}$  et  $A_{st}$  : respectivement les sections d'aluminium et d'acier dans le conducteur

$E_{al}$  et  $E_{st}$  : modules d'élasticité d'aluminium et d'acier

# CHAPITRE 3 Problématique, objectifs et méthodologie

## 3.1 Problématique

Le contrôle de la flèche des conducteurs joue un rôle important dans la conception et l'entretien des lignes de transport d'électricité. La tension du conducteur doit être suffisamment élevée pour que la distance de sécurité au sol soit maintenue. En outre, la flèche augmente à cause du fluage du conducteur et ceci doit être pris en compte afin que les conditions précitées soient remplies au cours de toute la durée de vie de la ligne.

D'autre part, l'état thermique des conducteurs est un des paramètres qui influe considérablement sur le fluage. Cependant, il existe très peu de connaissances sur le fluage à haute température des conducteurs et ces sources prédisent des valeurs de fluages très différentes. En fait, il était jusqu'ici très rare de faire chauffer les conducteurs puisque la conductivité électrique diminue avec l'augmentation de la température. Les pertes de rendement, et les pertes économiques qui en découlent, explique le peu de recherches dans ce domaine. (Nigol et Barrett, 1982) ont effectué des essais de fluage sur des brins d'aluminium à hautes températures et des essais de traction sur les conducteurs ACSR. (Michael, 1993) a réalisé des essais de fluage sur des conducteurs à température ambiante tandis que le (CIGRE, 1981) ont présenté des coefficients empiriques pour prédire le fluage des brins et des conducteurs.

Pour prédire le comportement des conducteurs à haute température, deux méthodes distinctes de recherche ont été suivies. La première consiste à effectuer des essais de laboratoire sur des conducteurs complets de différents types suivant la norme (IEC 61395 1998). Ce type d'essais exige des ressources financières importantes et des équipements imposants en plus de présenter des difficultés techniques, particulièrement au niveau du contrôle de la température.

La deuxième méthode de prédiction du fluage exploite les résultats d'essais en laboratoire sur les fils constituant les conducteurs, ou même sur les fils avant câblage. Cette deuxième méthode appelée ici l'approche brin. Elle est basée sur des essais plus simples, ce qui facilite l'exécution d'essais sur de nombreux échantillons. Le calcul permet également dans

ce cas d'obtenir des expressions analytiques du fluage du conducteur complet. Cependant, cette méthode ne permet pas de prévoir divers effets complexes reliés à la mise en place des brins, notamment lors du câblage.

La question qui se pose est donc : **Est-ce qu'une approche brin permet de prédire correctement le fluage des conducteurs complets ou à tout le moins permet de mesurer l'effet de la température d'opération sur le fluage des conducteurs?**

### **3.2 Objectifs**

L'objectif général de ce projet de recherche est d'étudier l'effet de la température sur le fluage des conducteurs. Cependant, ce projet de maîtrise vise plutôt la mise en place et la validation d'une approche permettant de prédire le fluage des conducteurs complets en fonction des fils constituant les conducteurs. Les objectifs spécifiques sont donc :

1. Développement d'un banc d'essai de fluage adapté aux fils des conducteurs.
2. Élaboration d'un protocole expérimental pour effectuer des essais de fluage.
3. Validation de l'approche brin pour la prédiction du fluage.

### **3.3 Méthodologie**

La première phase du projet de recherche consiste à établir les critères et les paramètres des essais sur les brins. La deuxième phase porte sur le développement et la validation d'un banc de fluage adaptés aux fils des conducteurs, incluant le protocole expérimental basé sur la norme (IEC 61395 1998), avec des essais préliminaires de 100 heures. Ensuite, des mesures du fluage sur des brins d'aluminium ont été effectuées avec des tests d'une durée minimale de 1000 heures. Pour cette troisième phase, les brins d'aluminium ont été soumis à contraintes variant de 30 à 106 MPa et à des températures de 21 et 38 °C. Enfin, des comparaisons ont été faites entre les résultats de l'approche brin et des tests sur les câbles disponibles dans la littérature.

Dans les parties suivantes, la procédure d'essai, les moyens de mesure et l'interprétation des résultats seront décrits en détail.

# CHAPITRE 4 Approche expérimentale

## 4.1 Introduction

Cette section examine en détail la procédure d'essai, les moyens de mesure et l'interprétation des résultats. Lors de l'exécution des essais de fluage, il est essentiel de suivre une démarche très stricte, surtout pendant la phase initiale de charge et les premières minutes, au risque de ne pas pouvoir répéter les essais. Les conditions d'essais exposés ci-après sont basées sur le document *Overhead electrical conductors – Creep test procedures for stranded conductors* (IEC 61395 1998)

## 4.2 Choix des échantillons

Les échantillons pourront être prélevés sur les bobines de fils utilisés pour le câblage. Il s'agit donc de fils n'ayant pas encore été toronnés. Selon la norme (IEC 61395 1998), la longueur des échantillons doit être supérieure à 100 fois le diamètre du fil. Le choix de la longueur des variables a été évalué à partir des essais préliminaires. (Voir section 5.3.1)

Tous les essais ont été effectués sur les brins d'aluminium de nuance 1350 à l'état H19 (extra dur) qui est couramment utilisé dans la fabrication des câbles de transport d'énergie électrique. Les propriétés minimales requises par la norme ASTM-B230, aussi dites nominales, ainsi que celles mesurées (voir annexe 1) à partir d'essais de traction, effectués selon la méthode d'essai ASTM B557, sont présentées au tableau 4. La  $R_m$  mesurée est supérieure à la valeur minimale exigée par ASTM B230. La différence sur  $E$  est discutée à l'annexe. Aucun essai n'a été effectués sur des brins d'acier, car l'acier est utilisé dans l'âme du conducteur afin d'assurer un renforcement mécanique et est reconnu pour posséder une bonne résistance au fluage.

**Tableau 4 : Caractéristiques de l'aluminium 1350-H19**

	$\varnothing$ (mm)	$R_m$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$E$ (GPa)
Nominal	3,01-3,5	170	n.d	69
Mesuré	3,06	210	190	60

### 4.3 Étapes du programme expérimental

Le programme expérimental s'est déroulé en deux étapes. Pour la première étape, des essais préliminaires ont été effectués afin de déterminer la longueur optimale à utiliser. Ces essais ont été réalisés à la température ambiante du laboratoire et en appliquant trois niveaux de contrainte (figure 34) qui sont égaux à 20%, 35% et 50% de  $R_m$  nominale. Ces essais préliminaires ont permis aussi de déterminer l'emplacement des capteurs qui mesurent l'allongement des fils par rapport aux collets et la procédure de mise en tension. La section 5.3.1 présente les résultats des essais préliminaires en détail.



**Figure 34 : Vue d'ensemble des essais préliminaires**

La deuxième étape consiste à effectuer des essais de fluage à long terme sur les brins d'aluminium conformément aux directives du document IEC 61395 1998. Ces essais ont été effectués dans une enceinte isolée thermiquement afin d'obtenir des conditions de température stables et contrôlées (figure 35). Les sections 5.3.2 et 5.3.3 présentent les résultats des essais de fluage en détail.



Figure 35 : Vue d'ensemble des essais à long terme dans l'enceinte isolée

## 4.4 Équipement et méthodologie

### 4.4.1 Conditions ambiantes

Les essais de fluage doivent être réalisés à température constante. La température ne doit pas varier de plus de  $\pm 2$  °C par rapport à la valeur prescrite (IEC 61395 1998). Pour respecter cette condition, les essais ont été effectués dans une enceinte isolée et la température a été enregistrée. La température dans la chambre de fluage était contrôlée par un thermostat programmé avec une sensibilité de 0,5°C.

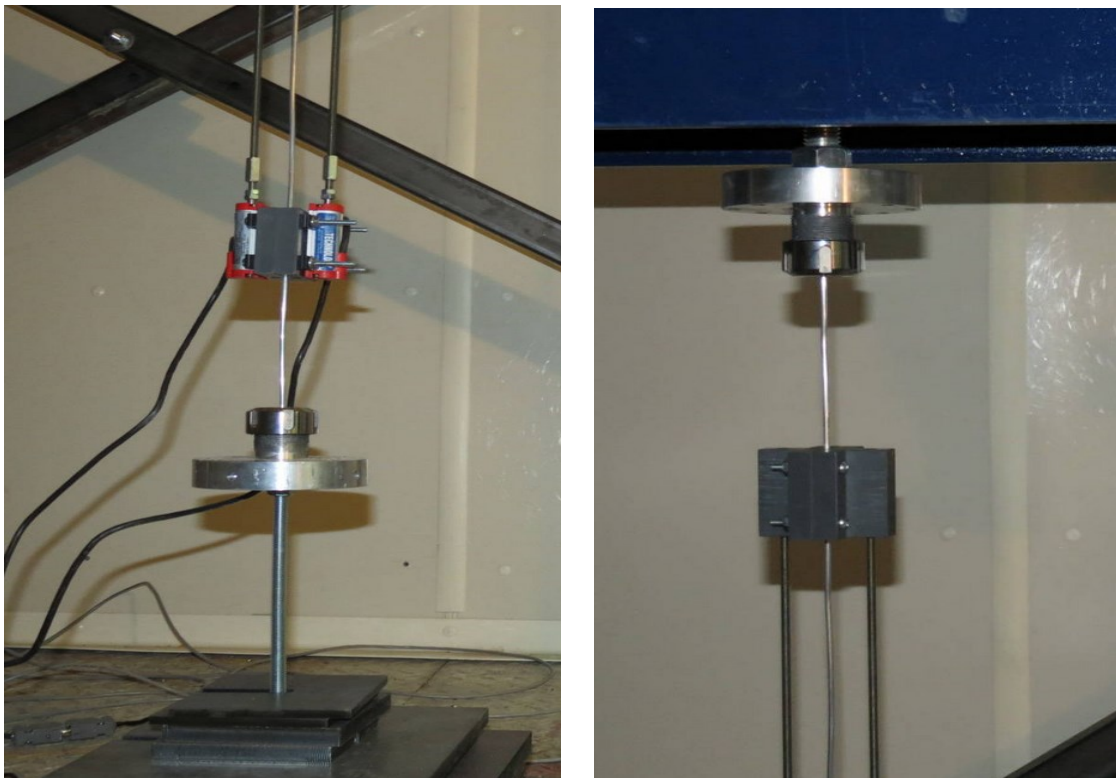
### 4.4.2 Mesure de l'allongement

Les mesures de l'allongement de fils ont été effectuées au moyen d'appareils suffisamment sensibles pour être compatibles avec les valeurs à mesurer. La précision dépend de l'appareil de mesure et de la longueur de l'échantillon. Selon la norme (IEC 61395 1998), la précision du dispositif de la mesure de la déformation doit être suffisante pour déterminer



l'allongement de l'échantillon de conducteur au  $5 \times 10^{-6}$  le plus proche. L'appareil de mesure doit, en outre, avoir une gamme de mesure suffisante pour couvrir la somme de l'allongement instantané dû à la mise en charge et du fluage prévu pour ces tests en fonction de la longueur initiale choisie. Pour ces essais, des capteurs de déplacement à potentiomètre, modèle SLPT, ont été utilisés. La précision de ce capteur est environ  $5 \times 10^{-6}$  m et sa course est de 10 mm. La longueur initiale qui permet d'obtenir la précision requise est de l'ordre de 1,0 m. Avec cette longueur initiale, la déformation totale qui peut être mesurée est égale à 0,01 m/m.

Pour mesurer l'allongement du fil, deux capteurs de déplacement sont attachés à l'opposé l'un de l'autre au moyen de blocs d'attache (figure 36). Les blocs d'attache des instruments de mesure doivent être éloignés des collets qui tendent les fils d'aluminium pour éviter les effets de bord. Selon (IEC 61395 1998), la distance minimale est de 25 fois le diamètre. Cet effet sera étudié lors des essais préliminaires afin de connaître la distance à respecter entre les collets et l'appareil de mesure.



**Figure 36 : Les deux capteurs de déplacement attachés à l'opposé l'un de l'autre au moyen de blocs d'attache en haut et en bas du fil**

### 4.4.3 Fixation de l'échantillon à l'appareillage d'essai

Les échantillons sont fixés par des collets, de façon à empêcher tout glissement. Les collets employés pour des essais sous tension cyclique réalisés à l'Université de Sherbrooke se sont révélés fiables et sans glissement pour des niveaux de contrainte allant jusqu'à 90 MPa durant plus d'un million de cycles. Le collet du bas est relié à un support pour y déposer les plaques d'acier qui exerceront la tension. Le collet du haut est suspendu à une poutre et les fils sont donc tendus verticalement en y appliquant des masses d'acier.

Les plaques d'acier, ainsi que les assemblages du collet du bas avec le support pour les plaques, ont été pesés individuellement au 1,0 gramme près. La force sur chaque fil testé est égale à la somme des masses suspendues multipliée par l'attraction gravitationnelle de la Terre  $g = 9.81 \text{ m/sec}^2$ .

La mise en place des fils dans les collets et l'installation des capteurs de déplacement est effectuée à température ambiante. Ensuite, les spécimens sont amenés à la température d'essai sans charge en chauffant l'enceinte isolée. Ce réchauffement des spécimens augmente la pression de serrage des collets, car le coefficient de dilatation thermique du fil d'aluminium est supérieur à celui de l'acier des collets.

## 4.5 Protocole d'essai

### 4.5.1 Lectures de l'allongement

Les lectures de l'allongement débutent lorsque seul l'assemblage du collet du bas et du support pour les plaques est suspendu au fil d'aluminium. L'allongement élastique,  $\Delta l_{inst}$ , est donc mesuré lors de la mise en tension du fil. L'allongement dû au fluage,  $\Delta l_{fl}$ , débute dès que la charge d'essai a été atteinte. Pour obtenir  $\Delta l_{fl}$ , il faut soustraire  $\Delta l_{ins}$  de l'allongement total mesuré par les capteurs de déplacement,  $\Delta l_{mes}$ , donc :

$$\Delta l_{fl} = \Delta l_{mes} - \Delta l_{ins} \quad \text{Équation 17}$$

Ensuite, la déformation du fluage est calculée par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{fl} = \frac{\Delta l_{fl}}{L}$$

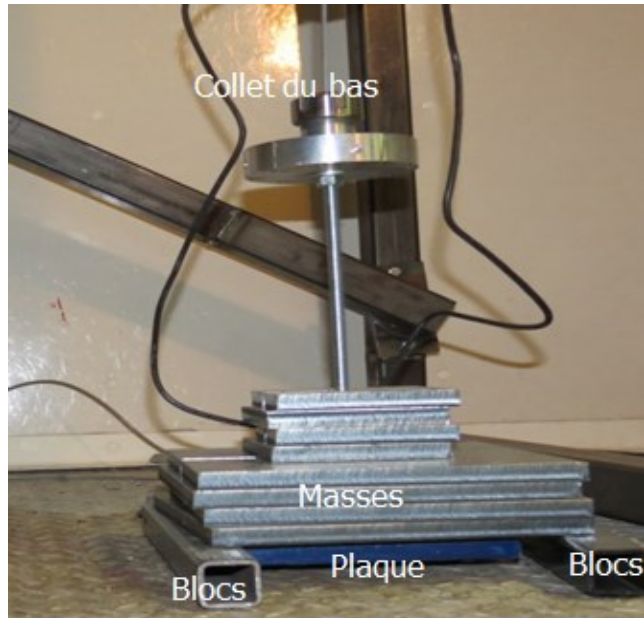
Où  $L$  est la longueur initiale sur laquelle sont mesurés les allongements.

Les directives du document (IEC 61395, 1998) exigent que le fluage soit mesuré au moins trois fois chaque fois que le temps est multiplié par dix à partir d'une durée de fluage de 1,0 heure. Les relevés du fluage doivent être uniformément répartis sur une échelle logarithmique du temps. Cependant, les courbes de fluage ont été produites avec les lectures de l'allongement suivant les intervalles ci-après :  $10^{-1.67}$  heure,  $10^{-1.33}$  heure,  $10^{-1}$  heure,  $10^{-0.67}$  heure,  $10^{-0.33}$  heure,  $10^0$  heures,  $10^{0.33}$  heures,  $10^{0.67}$  heures,  $10^{1.33}$  heures,  $10^{1.67}$  heures,  $10^2$  heures,  $10^{2.33}$  heures,  $10^{2.66}$  heures,  $10^3$  heures. Ces durées de fluage sont équidistantes sur une échelle logarithmique. Les courbes de ce mémoire montrent donc l'évolution de l'allongement au cours de la première heure des essais de fluage en plus de ce qui est exigé par la méthode d'essai.

Les lectures faites par le système d'acquisition WAVEBOOK. L'essai se prolongera pendant 1000 heures (41,67 jours) au moins. La fréquence des lectures affichées par le WAVEBOOK est : une lecture chaque seconde pendant la première heure, et une lecture par minute pour le reste de l'essai. La température est également mesurée suivant la même fréquence.

#### 4.5.2 Conditions d'essai

Dans le cadre de ce projet de maîtrise, des essais de fluage sur des fils d'aluminium ont été effectués pour deux températures différentes ; 21°C et 38°C. Pour chaque température, quatre niveaux de contrainte ont été étudiés : 30,3 MPa, 55,5 MPa, 79,2 MPa et 106,1 MPa. Pour un fil de 3,09 mm de diamètre, ces niveaux de contrainte exigent respectivement des masses de 23,15 kg, 42,42 kg, 60,55 kg et 81,07 kg. La masse de l'assemblage du collet du bas et du support pour les plaques est d'environ 3,4 kg. Deux répétitions des quatre niveaux de contrainte ont été effectuées à 21 °C pour estimer la variabilité des résultats, mais une seule répétition a été effectuée à 38 °C.



**Figure 37 : Collet du bas**

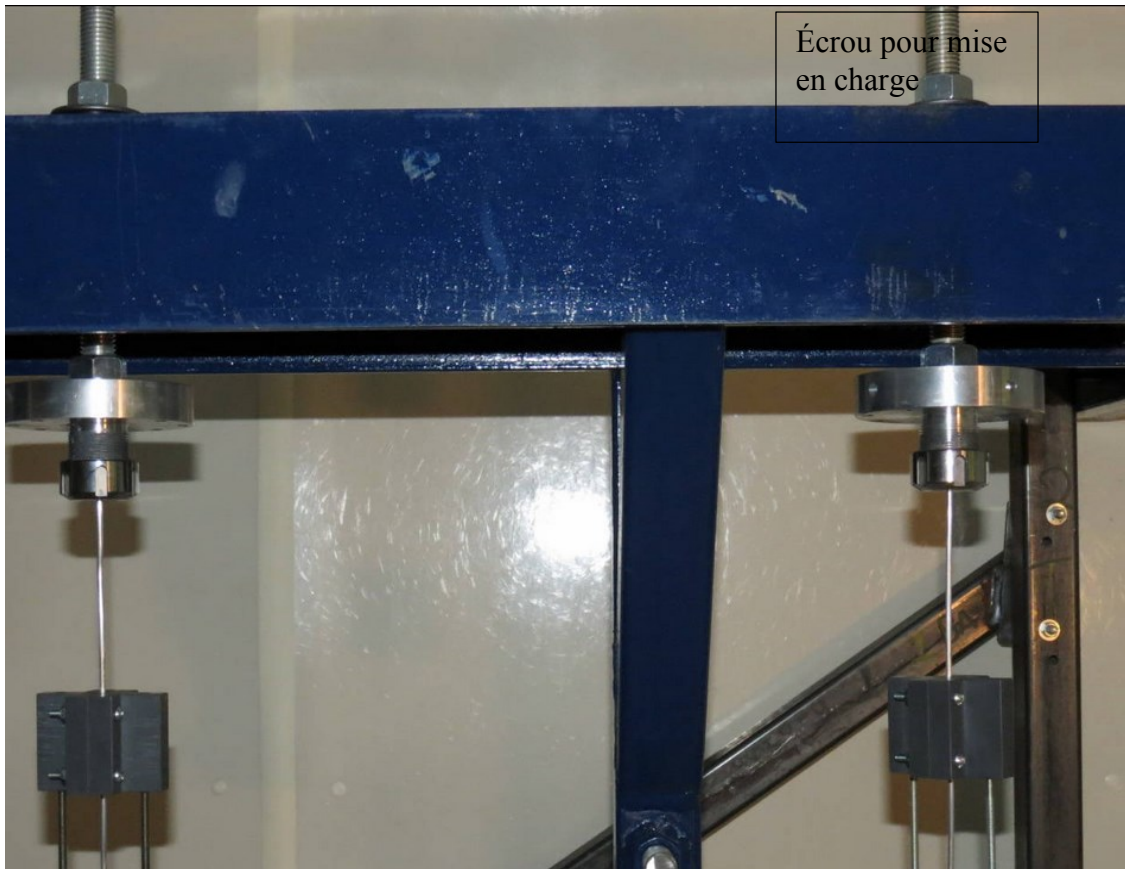
#### **4.5.3 Procédure de mise responsable**

La mise en charge a une très grande influence sur les premiers stades de fluage. Notamment lorsque la contrainte durant le fluage est supérieure à la limite d'élasticité, le matériau se plastifie lors du chargement. Le comportement en fluage dépend de cette plastification qui pour beaucoup d'alliages métalliques est une fonction de la vitesse de déformation. Il est donc important de contrôler la vitesse de chargement. De plus, il est essentiel de ne pas dépasser la contrainte de fluage pendant le chargement, par exemple laissant tomber une masse de quelques millimètres, car la déformation instantanée excédentaire faussera le fluage pour un laps de temps indéterminé.

La procédure de la mise en charge, qui a été déterminée grâce aux essais préliminaires, est la suivante :

- 1- Installer le fil dans le collet du haut et suspendre l'assemblage du collet du bas et du support pour les plaques;
- 2- Déposer les masses sur des blocs en position au-dessus du support pour les plaques (figure 37).
- 3- Installer et ajuster les capteurs de déplacement;

- 4- Chauffer l'enceinte isolée et maintenir la température spécifiée durant au moins 48 heures avant de poursuivre ;
- 5- Démarrer l'acquisition des données pour enregistrer les allongements et la température au taux d'un enregistrement par seconde;
- 6- Visser graduellement l'écrou qui suspend le collet du haut (figure 38) afin de soulever les masses. Il faut laisser un espace suffisant entre les plaques et les blocs pour que la charge soit maintenue constante pendant toute la durée de l'essai et;
- 7- Réduire la fréquence d'acquisition des données, allongements et température, au taux d'un enregistrement par minute après les trente premières minutes de fluage.



**Figure 38 : Collet du haut + tige filetée**

## **4.6 Rejet d'un essai**

Un essai sera considéré comme nul, selon la norme CEI (IEC 61395, 1998):

- Si la température diffère, d'une valeur supérieure à 2 °C, de la température moyenne dans plus de 2 pour cent des lectures de température.
- Si la durée de l'essai est inférieure à 1000 heures.

## 4.7 Interprétation des résultats

Cette section présente les méthodes recommandées par (CIGRE, 1981), pour l'évaluation des coefficients  $\alpha$ ,  $\mu$  et  $K$  de l'équation 11. Ces méthodes seront illustrées à partir des exemples typiques de données de (CIGRE, 1981) présentées aux figures 39 et 40.

La droite de régression construite sur la figure 39 montre la valeur d'augmentation du fluage,  $\Delta\epsilon_\sigma$ , entre 24 et 2000 heures pour deux contraintes différentes,  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ . En se basant à ces valeurs, le coefficient  $\alpha$  peut être obtenu par l'expression suivante :

$$\alpha = \frac{\log \frac{\Delta\epsilon_{\sigma_1}}{\Delta\epsilon_{\sigma_2}}}{\log \frac{\sigma_1}{\sigma_2}} \quad \text{Équation 19}$$

La figure 40 montre une droite de régression typique d'un essai de fluage. En considérant un point intermédiaire entre 24 et 2000 heures, par exemple  $t=100$  heures tel qu'illustré à la figure 40, la valeur du coefficient  $\mu$  peut être déduite en résolvant l'équation suivante :

$$\frac{2000^\mu - 24^\mu}{100^\mu - 24^\mu} = \frac{\Delta\epsilon_{2000}}{\Delta\epsilon_{100}} \quad \text{Équation 20}$$

En considérant, la valeur d'augmentation du fluage,  $\Delta\epsilon_\tau$ , entre 24 et 2000 heures pour deux températures différentes,  $\tau_1$  et  $\tau_2$ , la valeur de  $\phi$  est déterminée par l'expression suivante :

$$\phi = \frac{\log \frac{\Delta\epsilon_{\tau_1}}{\Delta\epsilon_{\tau_2}}}{\tau_1 - \tau_2} \quad \text{Équation 21}$$

En dernier lieu,  $K$  peut être calculé comme suit :

$$K = \frac{\Delta\epsilon_\sigma}{e^{\phi\tau} \cdot \sigma^\alpha \cdot (2000^\mu - 24^\mu)} \quad \text{Équation 22}$$

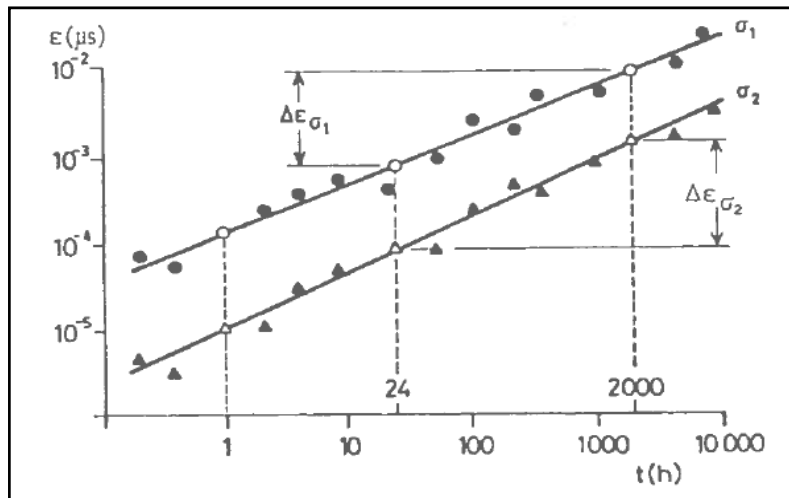


Figure 39: évaluation de coefficient  $\alpha$  (adapté de(CIGRE, 1981))

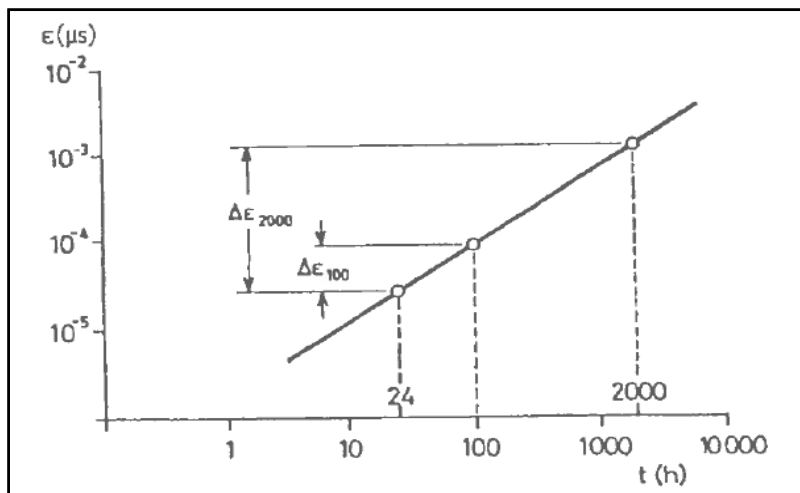


Figure 40: évaluation de coefficient  $\mu$  (adapté de(CIGRE, 1981))

# CHAPITRE 5 Résultats obtenus et approche analytique

## 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'approche analytique ainsi que les résultats trouvés suite aux essais sur les brins seront présentés. Tout d'abord, un exemple de calcul avec l'approche brin sera développé. Ensuite, les résultats des essais préliminaires sur les brins ainsi que les conclusions suite à ces essais seront exposés. Puis, les essais réguliers sur les brins et les différentes comparaisons avec la littérature seront présentés.

## 5.2 Exemple de l'approche brin

Un aspect important de ce projet de recherche est de prédire le fluage des conducteurs complets en fonction des fils constituant les conducteurs. Sans traiter directement le fluage, l'exemple présenté ici permet de définir si le comportement contrainte-déformation du conducteur peut être déterminé correctement à partir des courbes contraintes-déformations de ses brins constituants.

Les valeurs expérimentales ont été prises à partir de la courbe maitresse de contrainte – déformation effectuée sur un conducteur ACSR (42/7) (figure 41). Ensuite, les contraintes ont été calculées en utilisant les expressions analytiques présentées dans la section 2.3. Par la suite, les valeurs expérimentales ont été comparées aux valeurs calculées pour valider l'approche.

Le conducteur ACSR étudié est constitué d'un brin central et d'une couche de six (6) brins en acier de 2,46 mm de diamètre ainsi que de trois couches de brins d'aluminium de 4,43 mm de diamètre. Ce type de conducteur est nommé ACSR 42/7/34mm (nombre de brins d'aluminium/ nombre de brins d'acier/ diamètre du conducteur) et possède les caractéristiques suivantes :

$$\text{Aire totale d'acier} = 33.3 \text{ mm}^2$$

$$\text{Aire totale d'aluminium} = 647.3 \text{ mm}^2$$

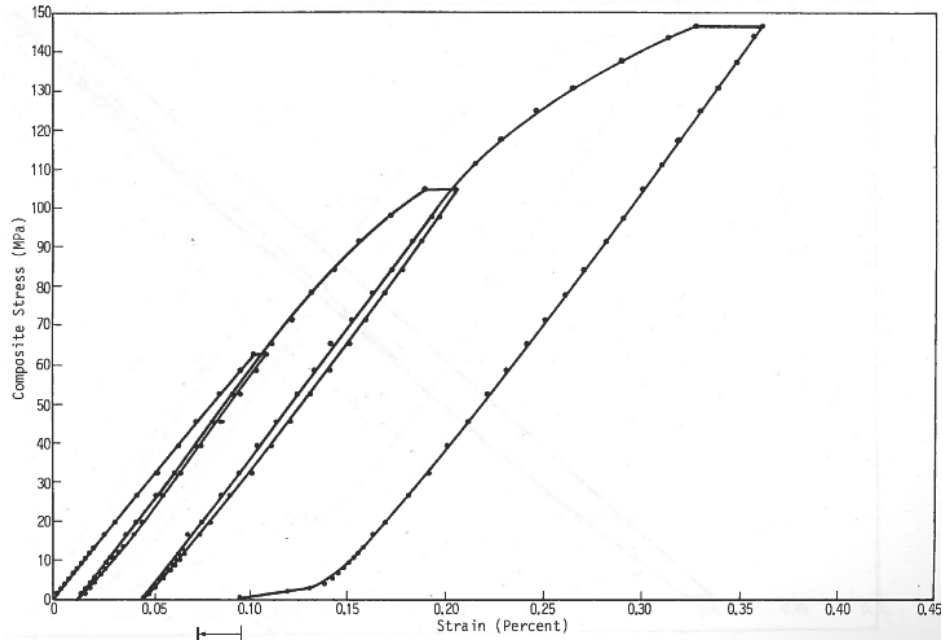
$$\text{Aire totale du conducteur} = 680.6 \text{ mm}^2$$

Les valeurs de  $\beta_i$  pour un conducteur ACSR classique selon [Papailiou, 1995] sont présentées dans le tableau 5.



**Tableau 5 : Valeurs de  $\beta_i$  pour un conducteur ACSR classique selon [Papailiou,1995]**

Couche i	1	2	3	4
$\beta$ (°)	-6,06	11,99	-11,80	13,10



**Figure 41 : Courbe contrainte- déformation d'un conducteur ACSR (42/7) 34mm (adapté de [Nigol, Barrett 1981])**

Le tableau 6 présente quelques valeurs de la contrainte lues à partir de la courbe maîtresse de la figure 41 pour différents niveaux de déformation.

**Tableau 6 : Valeurs contraintes – déformation conducteur ACSR (42/7) 34mm**

Déformation (%)	Contrainte (MPa)
0,000	0,0
0,034	23,0
0,070	46,0
0,099	62,4
0,137	83,1
0,156	92,5
0,189	106
0,213	114
0,242	124

### 5.2.1 Calcul de l'élongation et de la contrainte d'un brin

L'élongation d'un brin  $\varepsilon_i$  est reliée à l'élongation du câble  $\varepsilon_c$  par l'équation 11.

$$\varepsilon_i = \varepsilon_c \cos^2 \beta_i \quad \text{Équation 151}$$

Une fois que les déformations dans les brins sont calculées, les courbes des figures 42 et 42 sont utilisées respectivement pour définir les valeurs de la contrainte  $\sigma_i$  dans chacun des brins d'acier et d'aluminium. Sur la figure 43, les valeurs de la courbe *Fast Loading* ont été utilisées.

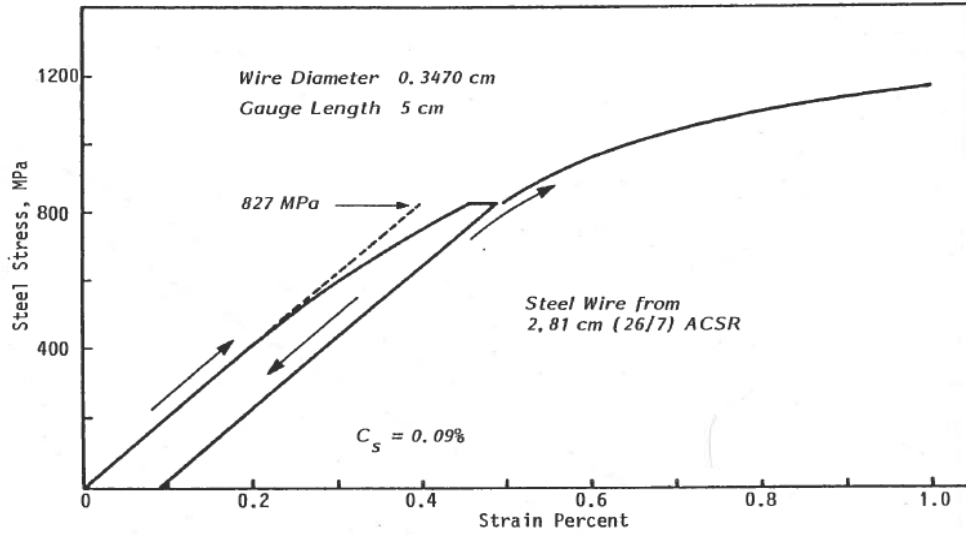


Figure 42 : Courbe contrainte- déformation d'un brin d'acier (adapté de [Nigol et Barrett, 1980])

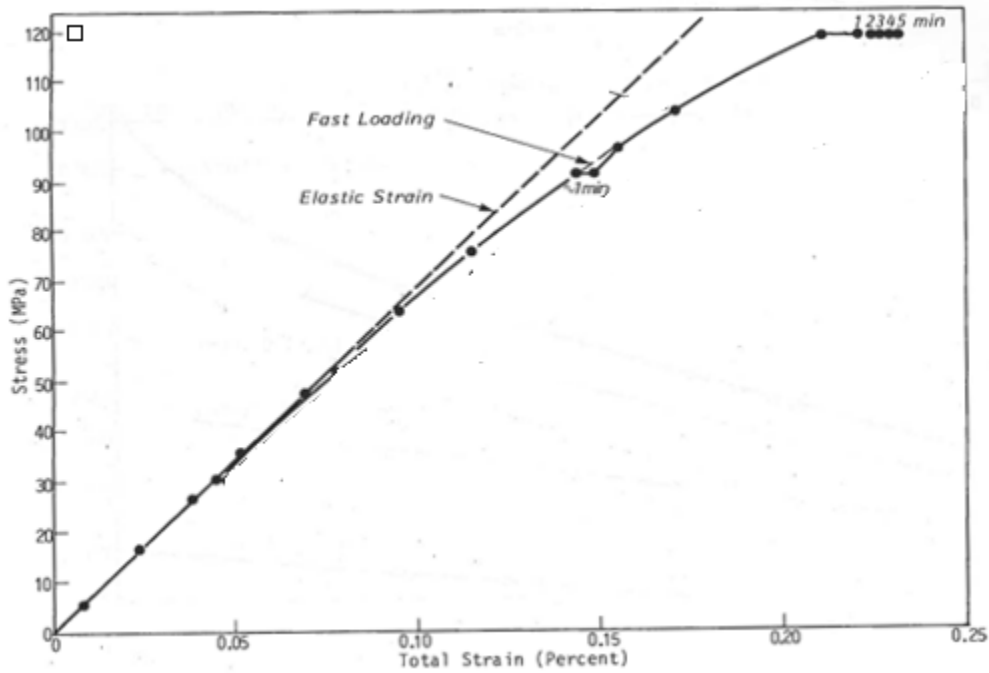


Figure 43 : Courbe contrainte- déformation d'un brin d'aluminium (adapté de [Nigol et Barrett, 1982])

### 5.2.2 Calcul de la force

Le tableau 7 présente les valeurs des déformations et des contraintes identifiées à la section 5.2.1 pour tous les brins de chaque couche. Ce tableau présente aussi la force active dans chacun de ces brins,  $F_{ci}$  telle que calculée avec l'équation suivante :

$$F_{ci} = \sigma_{ci} A_{ci} \cos \beta_i \quad \text{Équation 23}$$

Où  $A_{ci}$  et  $\sigma_{ci}$  sont respectivement l'aire de la section et la contrainte d'un brin de la couche i.

**Tableau 7 : Tableau récapitulatif des valeurs pour chaque couche de l'approche brin**

$\varepsilon_c$ (%)	Couche 1 (1+6) brins d'acier			Couche 2 (8 brins d'aluminium)			Couche 3 (14 brins d'aluminium)			Couche 4 (20 brins d'aluminium)		
	$\varepsilon_1$ (%)	$\sigma_1$ (MPa)	$F_{c1}$ (kN)	$\varepsilon_2$ (%)	$\sigma_2$ (MPa)	$F_{c2}$ (kN)	$\varepsilon_3$ (%)	$\sigma_3$ (MPa)	$F_{c3}$ (kN)	$\varepsilon_4$ (%)	$\sigma_4$ (MPa)	$F_{c4}$ (kN)
0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0.00	0.000	0,000	0.00	0.000	0,000	0.00	0.000
0,034	0,033	70,85	0,335	0,032	22.71	0.342	0,032	22.71	0.343	0,030	20.34	0.305
0,070	0,069	140,98	0,666	0,067	45.76	0.690	0,067	45.76	0.690	0,064	44.07	0.661
0,099	0,097	195,66	0,924	0,094	61.08	0.921	0,094	61.08	0.921	0,090	59.59	0.894
0,137	0,136	280,69	1,326	0,131	81.14	1.223	0,132	81.14	1.224	0,125	79.07	1.187
0,156	0,154	315,98	1,493	0,149	89.33	1.347	0,152	89.33	1.350	0,142	84.91	1.274
0,189	0,187	386,00	1,824	0,181	101.31	1.527	0,181	101.31	1.528	0,171	96.88	1.454
0,213	0,210	427,25	2,018	0,204	110.87	1.671	0,204	110.87	1.672	0,193	106.76	1.602
0,242	0,240	489,65	2,313	0,223	116.69	1.759	0,223	116.69	1.760	0,220	117.00	1.756

Par exemple, pour l'acier, pour  $\epsilon_c = 0,189$ ,  $\epsilon_1 = 0,189 \times \cos(6,06) = 0,187$ , la valeur de  $\sigma_1$  est lue à partir de la figure 42 et  $F_{c1} = 386 \times \cos 6,06 \times (2,462/4) \times 10^{-3} = 1,824 \text{ kN}$

Pour l'aluminium, pour  $\epsilon_c = 0,156$ ,  $\epsilon_3 = 0,156 \times \cos(11,80) = 0,152$ , la valeur de  $\sigma_3$  est lue à partir de la figure 43 et  $F_{c3} = 89,33 \times \cos 11,8 \times (4,432/4) \times 10^{-3} = 1,350 \text{ kN}$

Dans une section droite de câble, la tension est uniforme pour tous les brins d'une même couche et l'équation 12 peut être présentée sous la forme suivante :

$$F_c = \sum F_{ci} \quad \text{Équation 24}$$

La contrainte moyenne dans le câble est :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A_c} \quad \text{Équation 25}$$

Où  $A_c$  est l'aire totale du conducteur.

Le tableau 8 présente les valeurs de la force extérieure et de la contrainte calculées selon l'approche brin ainsi que le pourcentage d'erreur par rapport à la contrainte mesurée.

**Tableau 8 : Valeurs de la force extérieure et de la contrainte calculée**

Déformation (%)	F <sub>c</sub> (KN)	σ <sub>c</sub> (MPa)	Erreur (%)
0,000	0,00	0,00	0,0
0,034	15,98	23,48	5,6
0,070	33,07	48,59	5,1
0,099	44,62	65,57	6,0
0,137	59,94	88,07	4,2
0,156	65,57	96,35	4,6
0,189	75,46	110,87	6,9
0,213	82,96	121,89	6,7
0,242	90,02	132,28	2,1

Par exemple  $F_c = 75,46 = (7 \times 1,823) + (8 \times 1,527) + (14 \times 1,528) + (20 \times 1,454)$

La figure 44 présente une comparaison entre la courbe contrainte-déformation du conducteur obtenue par le calcul de l'approche brin et celle des données expérimentales.

La grande similitude des deux courbes de cet exemple démontre que l'approche brin permet

de prédire correctement la réponse mécanique d'un conducteur soumis à un effort de tension croissant. L'allongement dû au fluage étant fortement lié à ce comportement mécanique à court terme, il est probable que l'approche brin soit aussi satisfaisante pour l'étude du fluage.

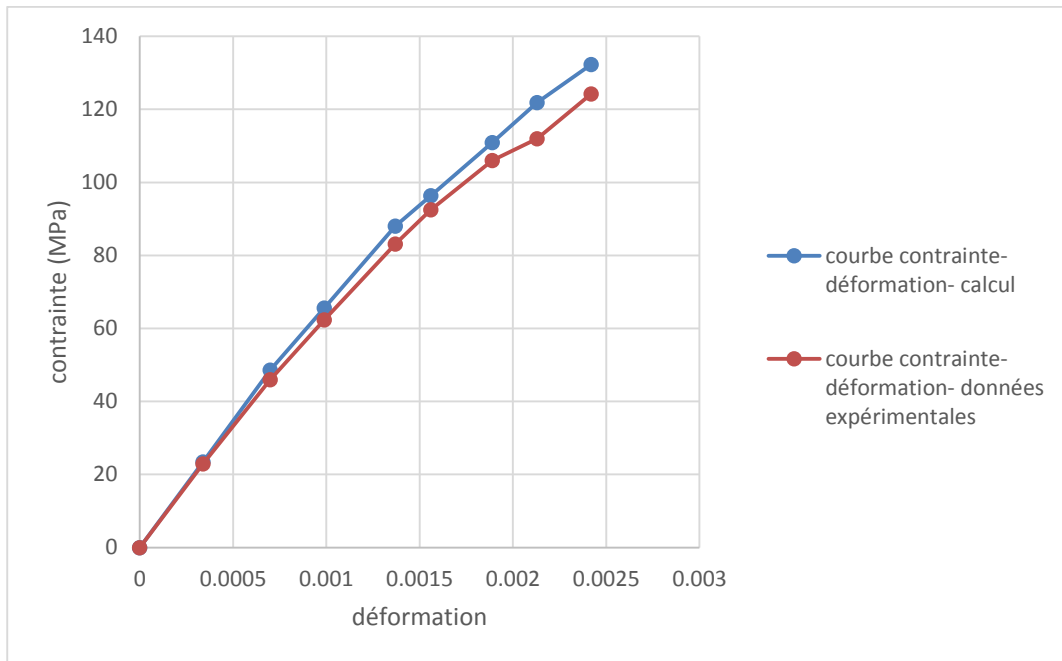


Figure 44 : Comparaison entre les résultats calculés et expérimentaux

## 5.3 Essais sur les brins

### 5.3.1 Essais préliminaires sur les brins

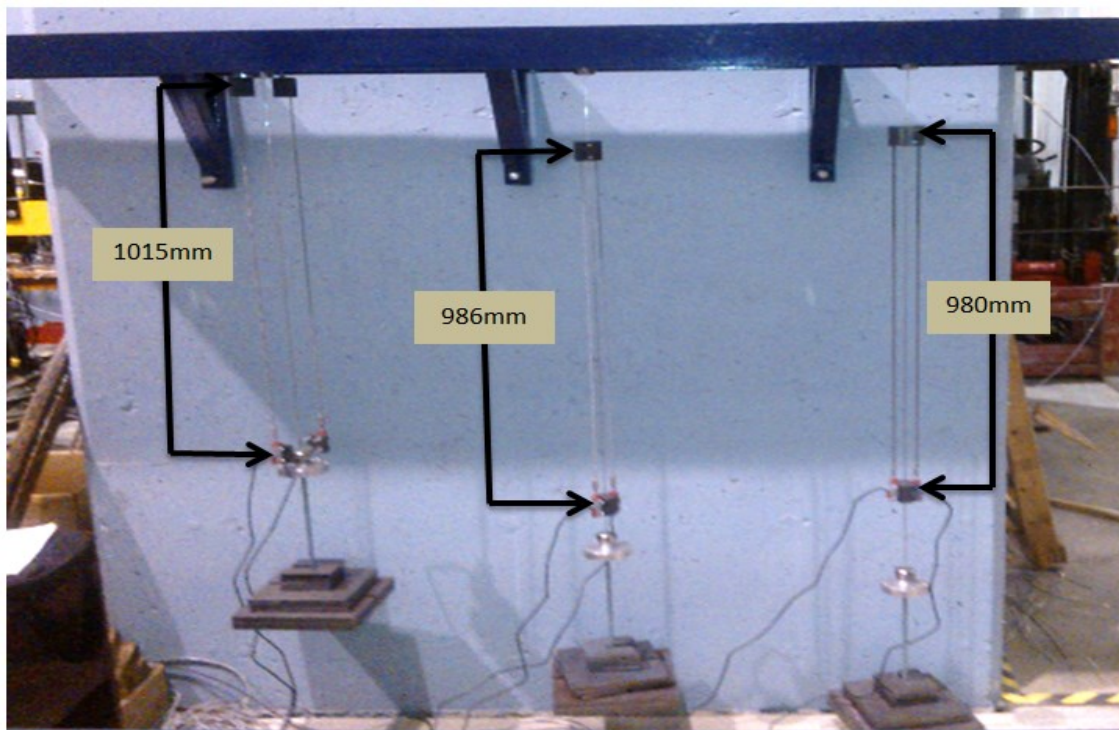
Cette partie présente les résultats de trois séries d'essais préliminaires. Lors de ces essais préliminaires, la température n'était pas contrôlée et les variations de la température ont parfois excédé la limite de 2 °C tolérée. Les variations de température provoquent des variations de l'allongement des brins sous tension ce qui a induit des erreurs importantes. Cependant, ces essais ont donné des résultats suffisamment cohérents pour permettre de définir la procédure d'essais à utiliser pour la suite. De plus, ces essais ont permis de faire des mesures sur de grandes longueurs de fils, ce qui est plus complexe à réaliser dans une pièce de l'Université de Sherbrooke où la température est contrôlée avec une précision suffisante.

Les fils de la première série d'essais (figure 45) ont été soumis à trois niveaux de contrainte 31, 53 et 78 MPa. Les essais de la deuxième série (figure 46) ont été effectués sur un fil redressé avec une technique spéciale, un fil régulier et un fil où les indicateurs sont placés sur les collets. Le protocole appelé « fil redressé » diffère uniquement sur la manière de redresser le fil après l'avoir déroulé de la bobine. Dans ce cas, le fil est redressé en le faisant passer avec une légère tension entre des barils ronds. L'opération est répétée pour enlever les courbures du fil dans toutes les directions. Finalement, pour la troisième série (figure 48), des longueurs de fils égales à 3575 mm, 2828 mm et 990 mm ont été sélectionnées pour examiner l'effet de la longueur du spécimen sur la précision de la lecture de l'allongement dû au fluage. Les trois fils de la deuxième série ainsi que les deux fils de la troisième série étaient tous soumis à une tension de 53 MPa. Les figures 48 à 51 montrent certains détails du montage préliminaire.



**Figure 45 : Série 1 - essais préliminaires sous différentes contraintes**





**Figure 46 : Série 2 - essais préliminaires pour un fil redressé avec une méthode particulière, un fil régulier et un fil avec indicateurs sur collets**

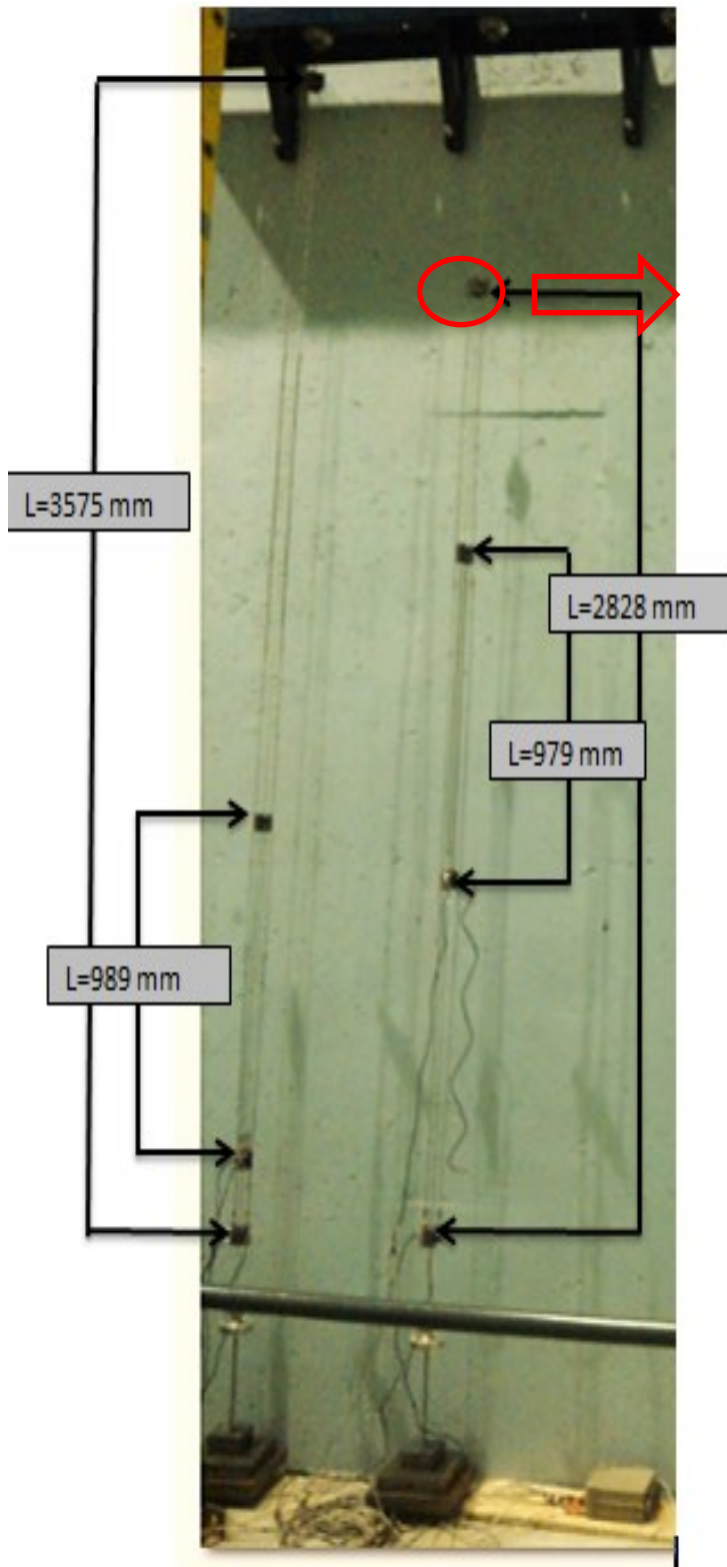


Figure 48 : Série 3 - essais préliminaires sur différentes longueurs

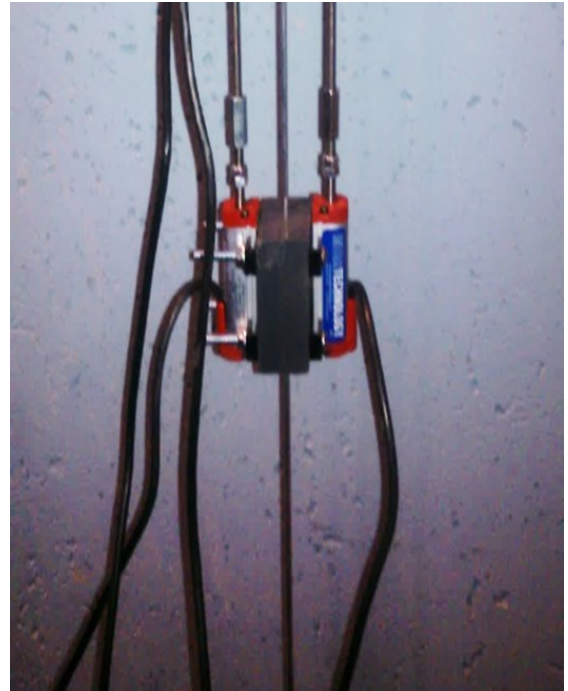


Figure 47 : Détail des indicateurs (2 indicateurs pour chaque longueur et 4 par fil pour la troisième série)



Figure 49 : Collet en haut



**Collet du bas + plaques**



**Indicateur sur collet du haut**



**Indicateurs sur collet du bas**

**Figure 50 : Détails du montage**

Cette partie présente les courbes de fluage des essais préliminaires. Le protocole pour le calcul du fluage est décrit à la section 4.5.1. Toutefois, l’allongement mesuré utilisé dans les équations 16 et 17 est la moyenne de la paire de capteurs sur un même fil.

### Série 1

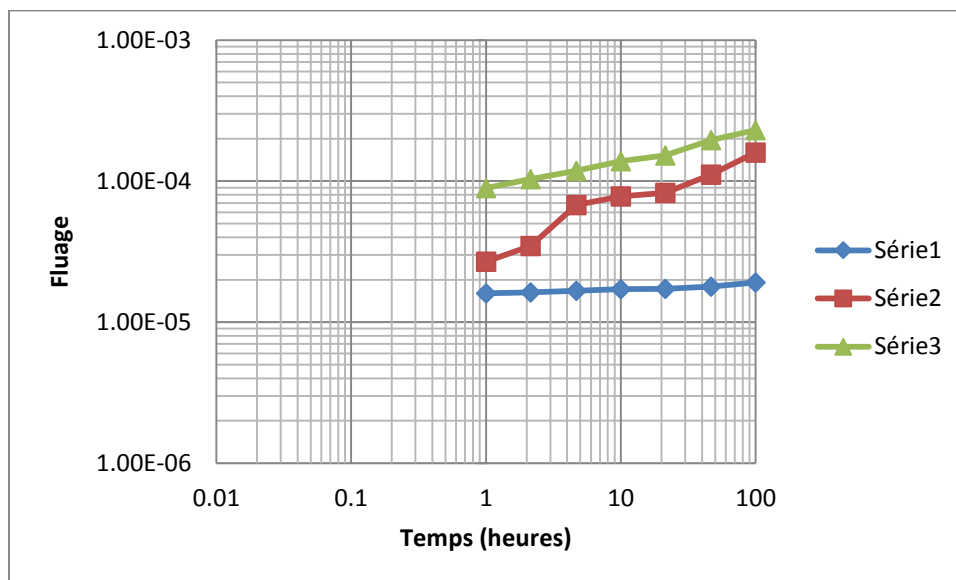
Pour cette première série préliminaire, les lectures des capteurs qui mesurent l’allongement des fils ont été faites manuellement à l’aide d’un multimètre. Le voltage mesuré a ensuite été converti en déplacement en multipliant par le facteur de proportionnalité propre à chaque capteur. Pour cette série, les deux capteurs de déplacement d’un même fil étaient fixés individuellement et la longueur initiale était d’environ 990 mm. Le tableau 9 présente les valeurs du fluage calculées pour chaque indicateur séparément.

**Tableau 9 : Lectures d’allongement des indicateurs des trois fils de la série 1**

temps (heures)	Fluage pour 31 MPa		Fluage pour 53 MPa		Fluage pour 78 MPa	
	Indicateur1	Indicateur2	Indicateur3	Indicateur4	Indicateur5	Indicateur6
0.020	-3.84E-07	-3.72E-06	5.54E-06	-3.15E-06	1.67E-05	1.41E-05
0.046	-2.83E-07	-3.72E-06	5.75E-06	-3.05E-06	2.26E-05	1.85E-05
0.100	-2.83E-07	3.23E-07	5.95E-06	-2.85E-06	3.98E-05	2.90E-05
0.214	-2.83E-07	1.33E-06	2.14E-05	-7.34E-07	5.83E-05	5.50E-05
0.470	1.12E-05	2.14E-05	2.19E-05	1.02E-05	6.89E-05	5.80E-05
1.000	1.11E-05	2.09E-05	3.35E-05	2.02E-05	9.48E-05	8.42E-05
2.140	1.12E-05	2.13E-05	4.20E-05	2.73E-05	1.11E-04	9.53E-05
4.680	1.17E-05	2.17E-05	7.48E-05	6.08E-05	1.29E-04	1.09E-04
10.000	1.19E-05	2.23E-05	8.24E-05	7.35E-05	1.54E-04	1.23E-04
21.380	1.17E-05	2.27E-05	8.74E-05	7.83E-05	1.62E-04	1.43E-04
46.770	1.24E-05	2.33E-05	1.07E-04	1.16E-04	2.16E-04	1.75E-04
100.000	1.39E-05	2.45E-05	1.68E-04	1.51E-04	2.43E-04	2.16E-04

Dans le tableau 9, les valeurs de fluage mesurées par chaque indicateur d'un même fil sont assez différentes ce qui justifie le choix d'attacher les capteurs par paire. En effet, quand les capteurs sont affichés par paire, l'effet des courbures est annulé. Dans le tableau 9, il y a également des valeurs négatives pour les premières lectures du fil 1. Ceci montre qu'il faut une tension minimale pour atteindre la pente élastique, c'est-à-dire, dépasser la force requise pour redresser le fil.

La figure 51 présente les courbes de fluage en fonction du temps pour les trois fils de la première série préliminaire. Les trois niveaux de contrainte, 31, 53 et 78 MPa qui représentent respectivement 20%, 35% et 50% de  $R_m$  nominale. Ces courbes n'affichent pas de valeurs de fluage avant le temps 1,0 heure parce que certaines valeurs seraient négatives. La figure 51 montre que le fluage augmente avec la contrainte, mais les variations de température du laboratoire introduisent des taux de fluage variables.



**Figure 51 : Courbe de fluage d'un fil d'aluminium sous trois niveaux de contrainte**

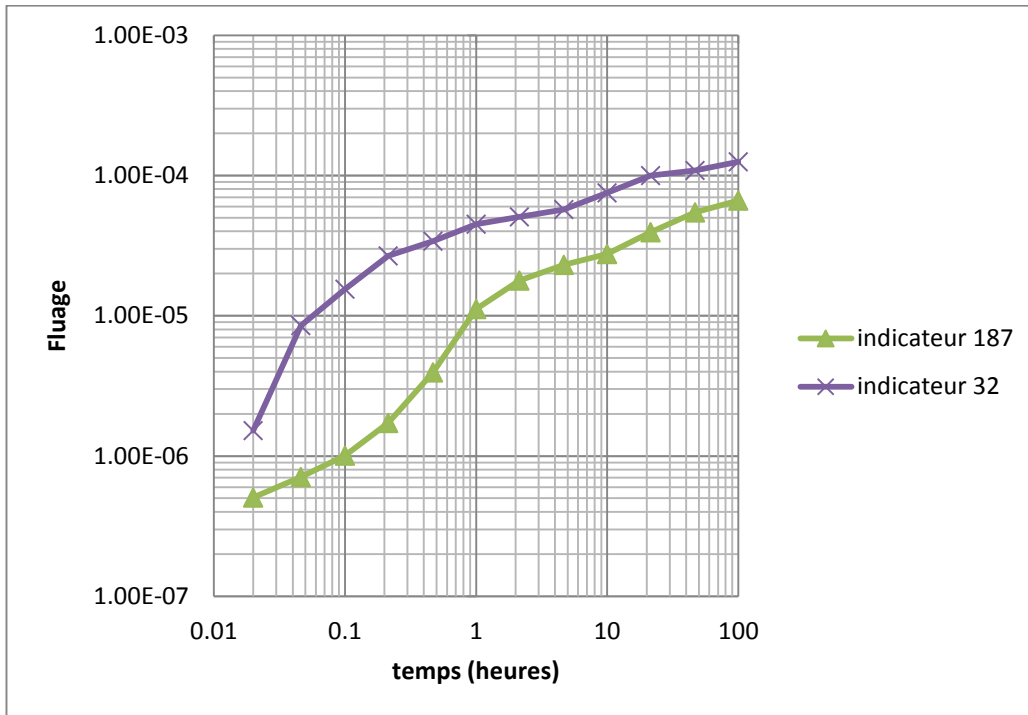
### Série 2

Les trois échantillons de la deuxième série préliminaire ont une longueur qui est de l'ordre de 990 mm. Les deux indicateurs de mesure sur chaque fil ont été placés par paire attachée aux mêmes points. Un seul niveau de contrainte égale à 53 MPa, soit 35%  $R_m$  nominale. Le but de ces trois essais est de voir s'il existe une différence dans les résultats de fluage

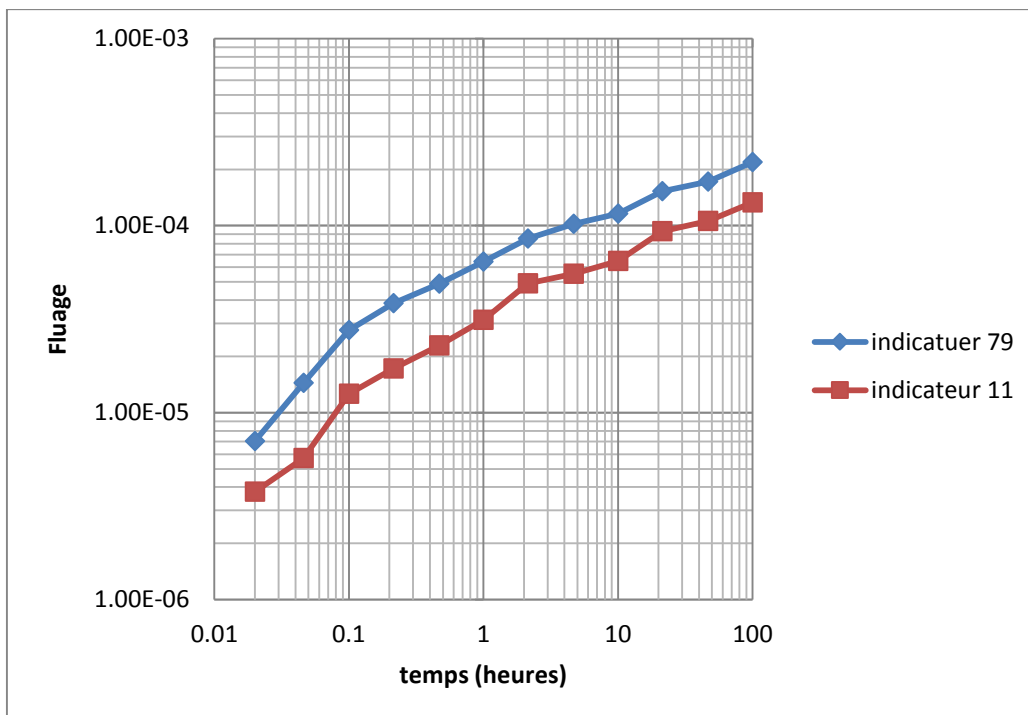
pour des protocoles différents. Le premier protocole est appelé « fil régulier » et est similaire à celui utilisé pour la première série préliminaire. Le fil est redressé à la main et les capteurs de déplacement sont attachés sur le fil par paire. Le deuxième protocole est appelé « fil redressé » et diffère uniquement sur la manière de redresser le fil après l'avoir déroulé de la bobine. Dans ce cas, le fil est redressé en le faisant passer avec une légère tension entre des barils ronds. L'opération est répétée pour enlever les courbures du fil dans toutes les directions. Le troisième protocole appelé « indicateurs aux collets » diffère du premier en fixant les capteurs de déplacement sur le disque d'acier des collets qui maintiennent le fil en tension (figure 51). Ce protocole ne respecte pas l'exigence d'exclure la zone d'attache de la longueur de mesure de l'allongement.

Les figures 52, 53 et 54 présentent les valeurs de fluage mesurées par chaque indicateur pour le fil redressé, le fil régulier et le fil avec indicateurs aux collets, respectivement. Malgré des efforts supplémentaires pour redresser le fil, la différence entre les deux indicateurs demeure notable, ce qui justifie l'utilisation de deux indicateurs pour chaque fil et le calcul de la moyenne.

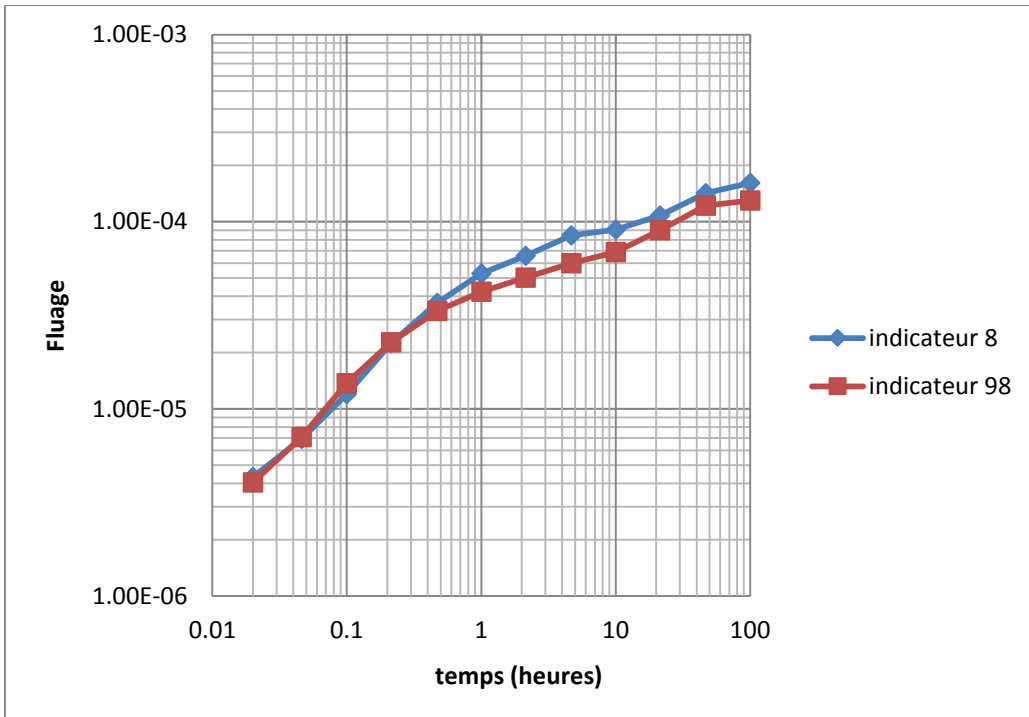
La figure 55 présente les courbes de fluage obtenues. Les capteurs utilisés donnent la précision demandée, car ils sont suffisants pour mesurer l'allongement du fil au  $5 \times 10^{-6}$  le plus proche, avec une longueur de mesure initiale de 990 mm.



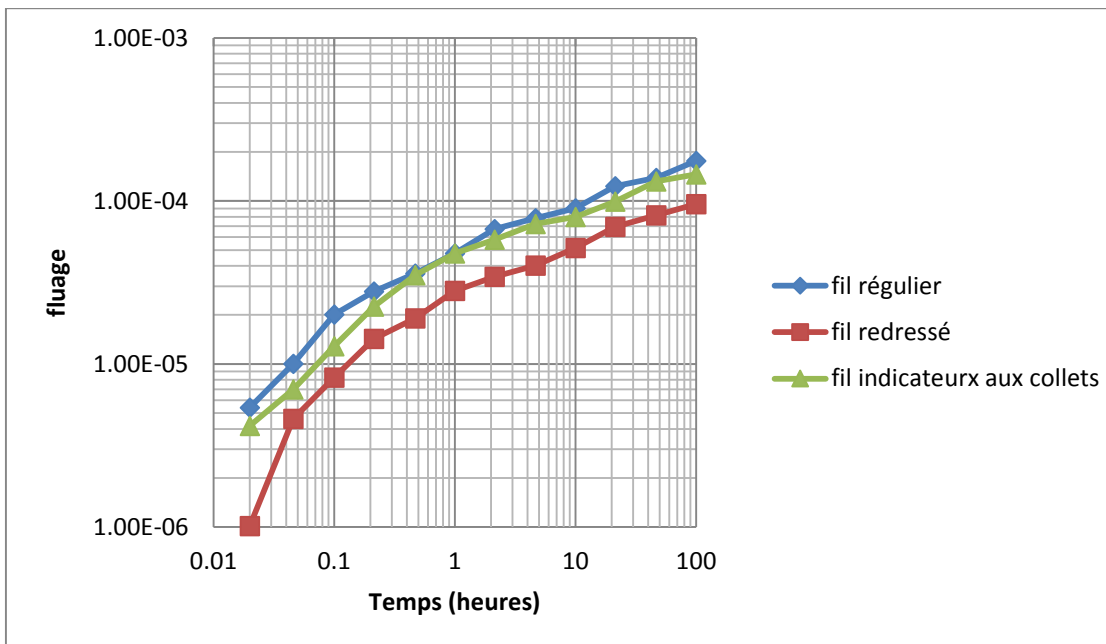
**Figure 52 : Fluage du fil redressé mesuré par chaque indicateur**



**Figure 53 : Fluage du fil régulier mesuré par chaque indicateur**



**Figure 54 : Fluage du fil avec indicateurs aux collets mesuré par chaque indicateur**



**Figure 55 : Courbe de fluage de 3 fils d'aluminium: régulier, redressé et indicateurs aux collets**



### Série 3

Le but de la troisième série d'essais est d'examiner l'influence de la longueur de mesure sur la précision des résultats de fluage. Le fil #1 a été muni de deux paires de capteurs d'allongement : une paire ayant une longueur initiale de 989 mm comparable à celle des deux autres séries préliminaires; et l'autre paire ayant une longueur initiale de 3575 mm. Le fil #2 a été muni d'une paire de capteurs d'allongement ayant une longueur initiale de 2828 mm et d'un capteur isolé ayant une longueur initiale de 979 mm.

La figure 56 présente les courbes de fluage des fils d'aluminium avec différentes longueurs. Cette figure ne montre aucun avantage à utiliser des fils très longs, puisque les courbes ne présentent pas des différences en fonctions des longueurs des fils. Par ailleurs, une longueur initiale plus grande implique des allongements plus grands, autant pour l'allongement initial lors de la mise en tension que pour le fluage, qui pourrait excéder la capacité des capteurs utilisés. L'absence apparente de fluage entre 5,5 et 10,0 heures est due à la baisse de la température dans le laboratoire durant la nuit et démontre l'importance de réaliser ces essais avec une température bien contrôlée.

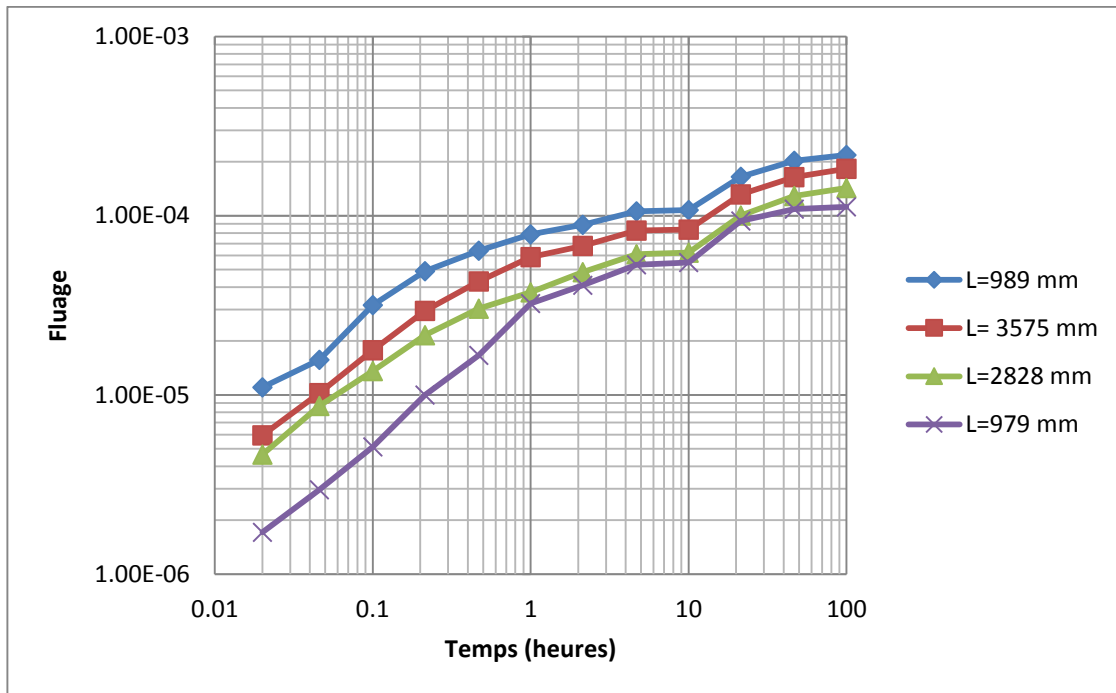


Figure 56 : Courbe de fluage de fils d'aluminium avec différentes longueurs

Les figures 51 à 56 montrent que les capteurs utilisés donnent la précision demandée, car ils sont suffisants pour mesurer l'allongement du fil au  $5 \times 10^{-6}$  le plus proche, avec une longueur de mesure initiale de 1 mètre.

Puisque les deux capteurs dans un même fil présentent des différences dans les résultats, on doit mettre plus d'un capteur sur un même fil. Les capteurs seront placés sur les fils plutôt que sur les collets. En plus de respecter les directives de la (IEC 61395 1998), l'installation des capteurs sur les fils s'est révélée plus simple à réaliser.

Pour la mise en charge, la démarche indiquée dans la section 4.5.3 sera suivie pour la suite des essais.

De cette façon, le problème d'impacts observé en plaçant les masses directement sur la plaque est évité. Toutefois, un vissage manuel complète généralement la mise en charge graduelle en environ une minute, ce qui est moins que les cinq minutes recommandé par la norme (IEC 61395, 1998).

### **5.3.2 Essais à long terme à 21 °C**

Cette partie présente les résultats des essais à long terme effectués à une température contrôlée de 21 °C. Pour cette température, il y a quatre niveaux de contraintes : 30,30 MPa, 55,55 MPa, 79,20 MPa et 106,05 MPa. Deux répétitions ont été effectuées pour ces conditions. La première répétition a débuté le 3 juin pour la série nommée « essai juin » et la deuxième le 25 juillet pour la série nommée « essai août ». L'essai de juin a duré 1225 heures et celui d'août a duré 1294 heures

Les figures 57 et 58 présentent les courbes de fluage d'un fil d'aluminium, 1350-H19 de diamètre égal à 3.09 mm, en fonction du temps pour les 4 niveaux de contraintes.

Ces figures montrent que les résultats sont cohérents, surtout après une heure d'essai. En effet, les valeurs sont du même ordre de grandeur dans les deux courbes pour chaque contrainte. Selon la norme (IEC 61395, 1998), les résultats avant une heure sont pris pour information seulement. Dans les figures 57 et 58, les quatre courbes ont des pentes similaires et sont placées l'une au-dessus de l'autre. La figure 59 présente la température enregistrée en fonction du temps pour l'essai de juin. Selon la figure, la température durant l'essai est égale à  $21 \text{ °C} \pm 2,5 \text{ °C}$  ce qui est conforme aux exigences de la norme. Ceci s'applique aussi pour l'essai d'août. Plus précisément, pour l'essai de juin, la température

maximale est égale à 22,04 °C et la minimale égale à 19,86 °C. Pour l'essai de juin, la température minimale atteinte est égale à 19,8 °C et la maximale égale à 22,42 °C.

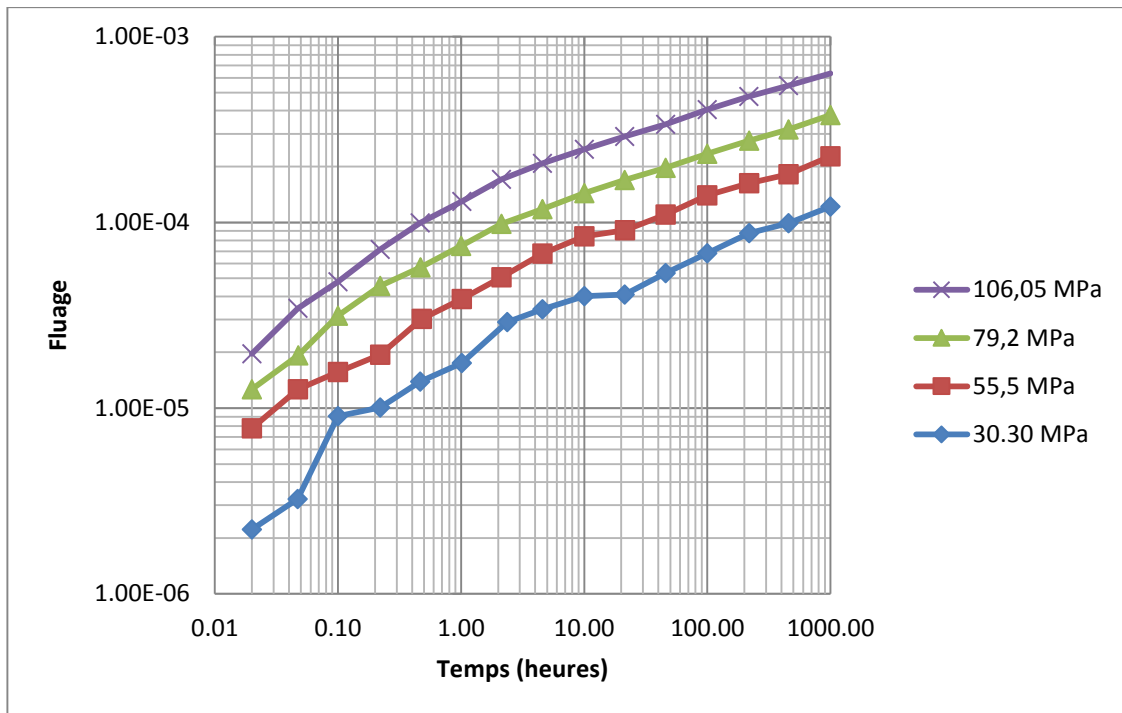


Figure 57 : Fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19, 3,09 mm à 21 °C - essai juin

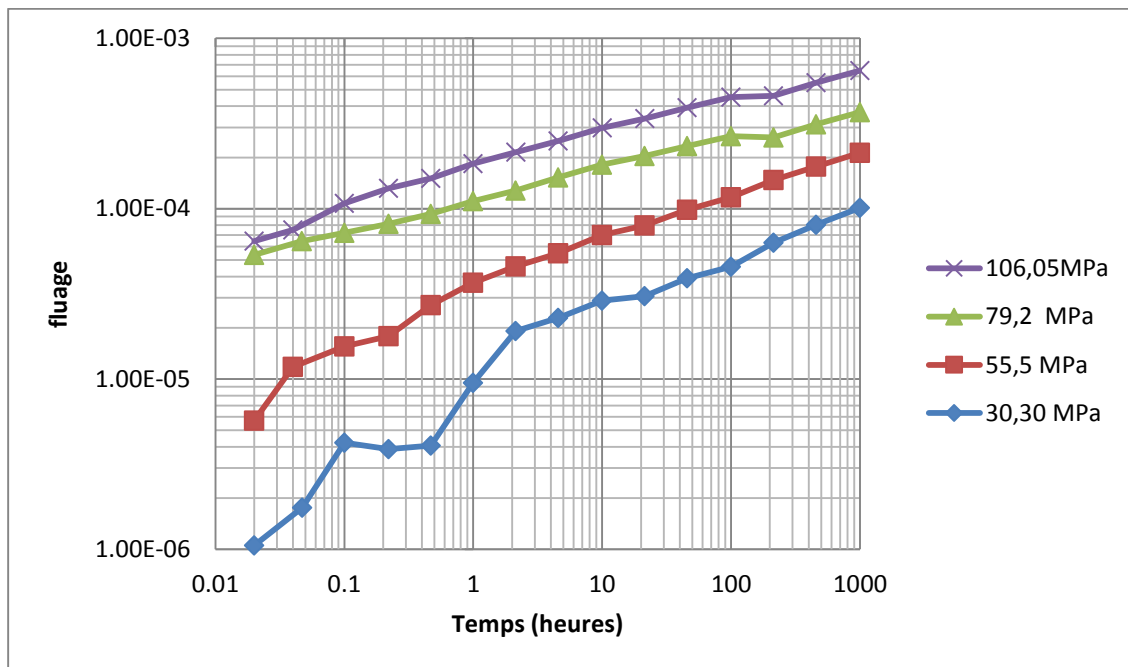
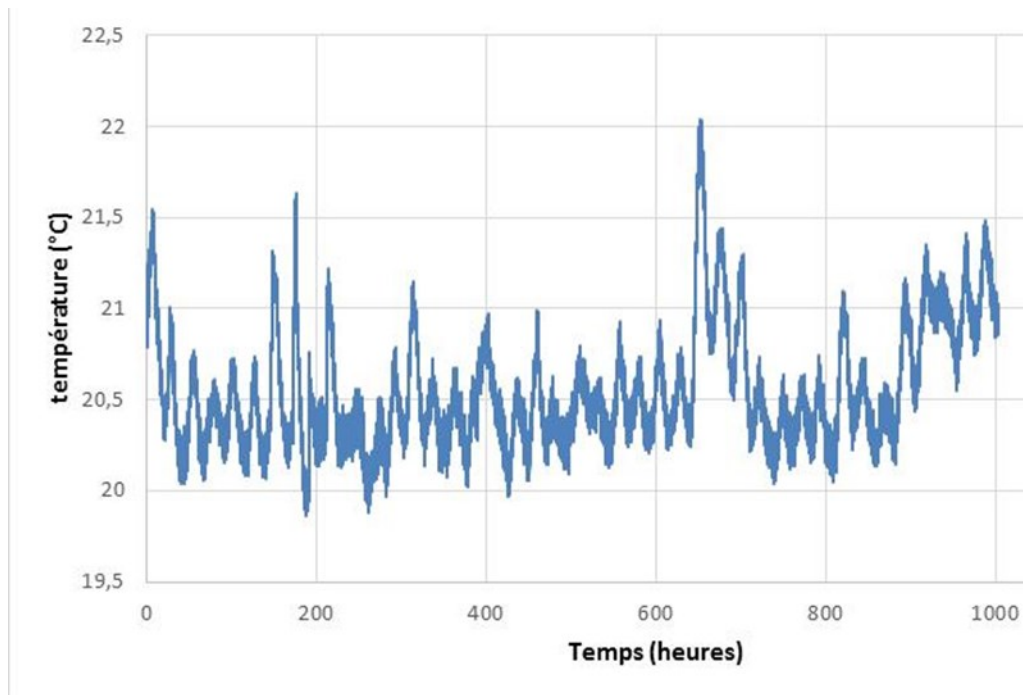


Figure 58 : Fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19, 3,09 mm à 21 °C - essai août



**Figure 59 : Variation de la température en fonction du temps\_ essai de juin**

### 5.3.3 Essai à 38 °C

Dans cette section, les résultats des essais à 38°C sont présentés. Les essais ont été réalisés avec quatre niveaux de contraintes : 30,3 MPa, 55,5 MPa, 79,2 MPa et 106,05 MPa et pour une durée égale à 1324 heures. La figure 60 présente les courbes de fluage d'un fil d'aluminium, 1350-H19 de diamètre égal à 3.09 mm, en fonction du temps pour les 4 niveaux de contraintes. Dans la figure 60, à 420 heures, il y a une augmentation brusque du fluage pour 79,2 MPa. Cette augmentation est mieux représentée à la figure 61 où les mesures de deux indicateurs sont montrées. Ce phénomène est présent, mais beaucoup moins marqué pour les autres fils (présentés dans les figures 62, 63 et 64). Il semble qu'un événement non identifié ait produit un allongement brusque des fils. Les résultats après 420 heures ne sont donc plus nécessairement représentatifs du fluage normal des fils. La figure 65 présente la variation de la température en fonction du temps durant l'essai. La température maximale atteinte est égale à 38,73 °C et la température minimale égale à 37,65 °C.

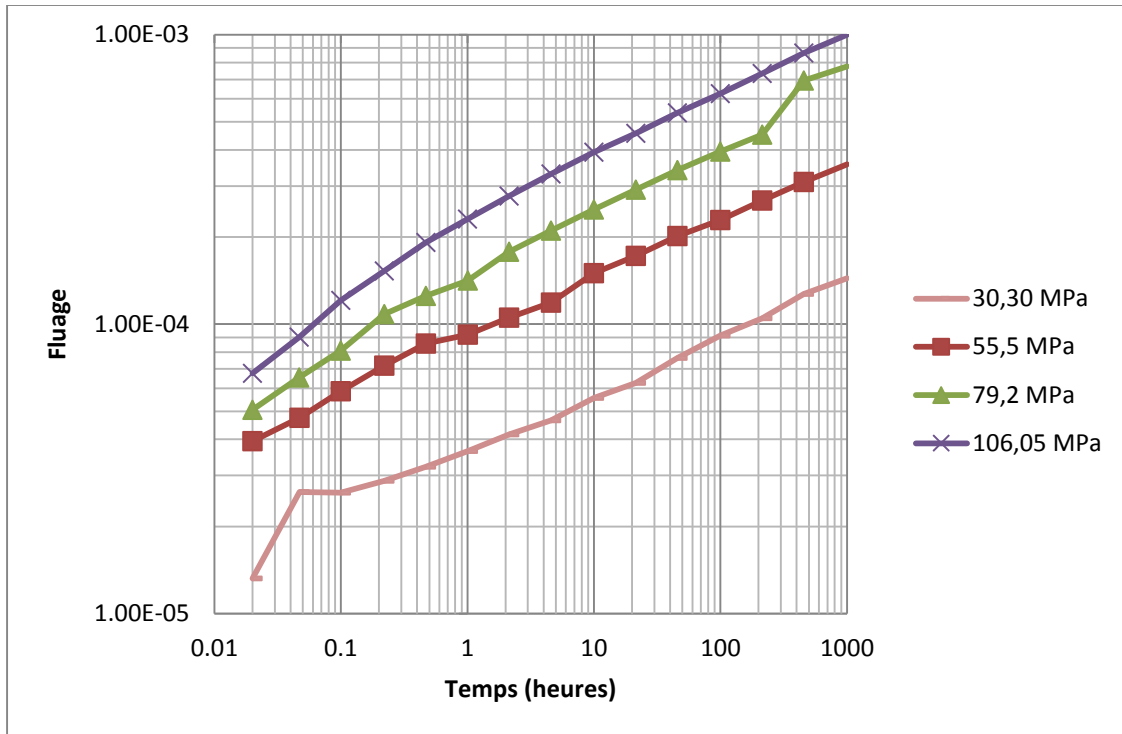


Figure 60 : Fluage d'un fil d'aluminium 1350-H19, 3,09 mm à 23°C

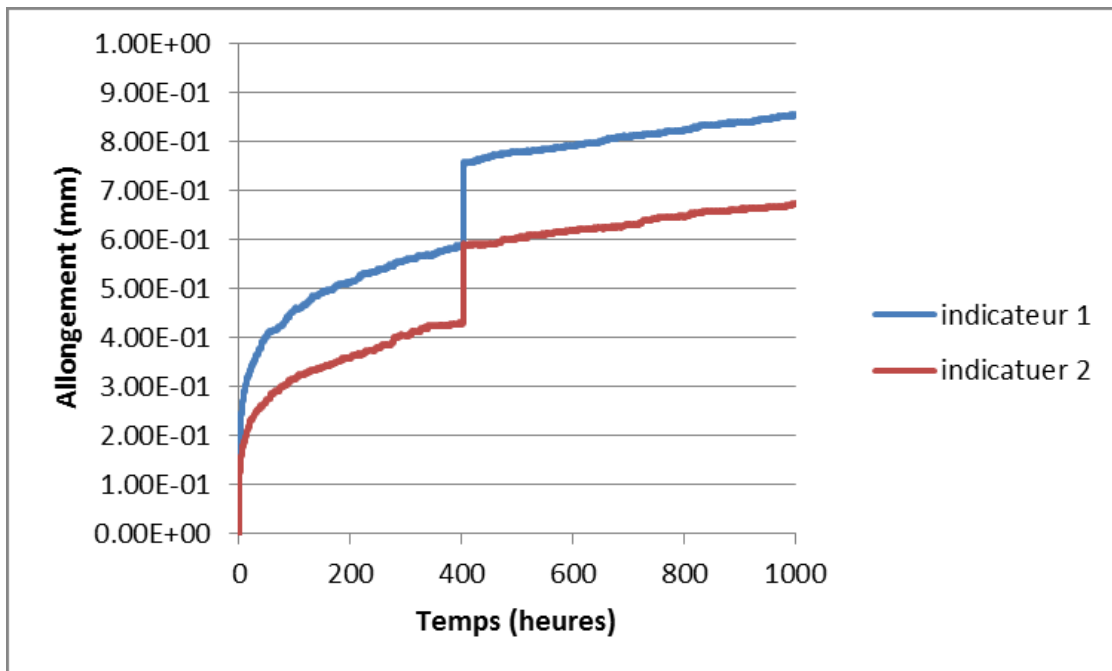
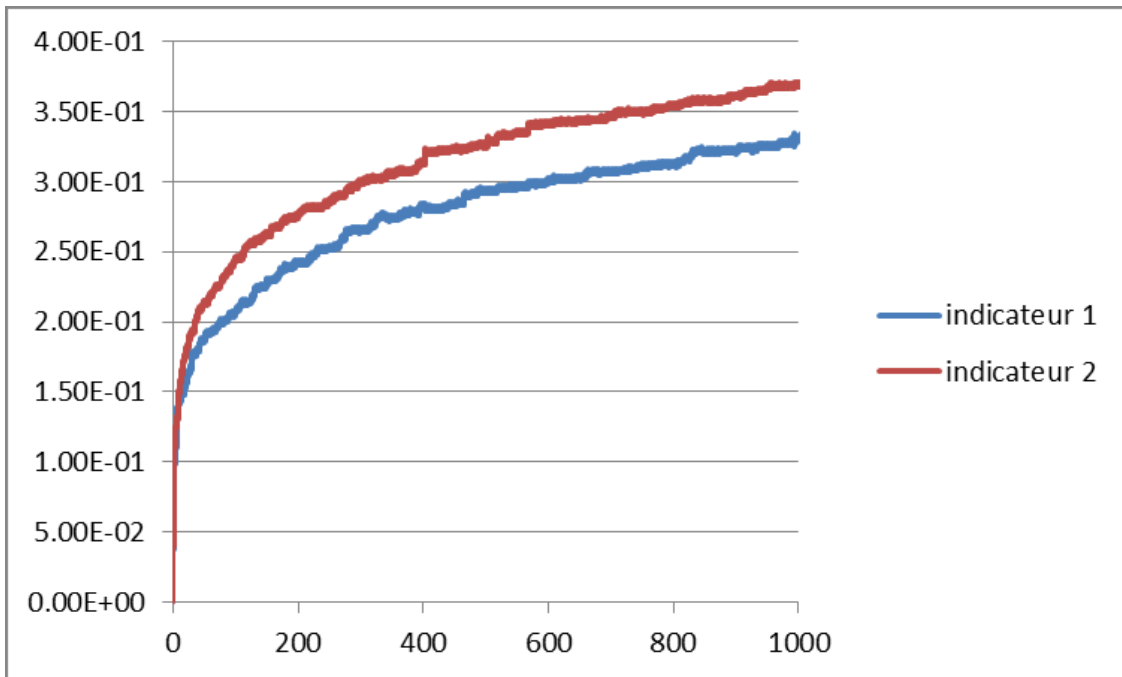
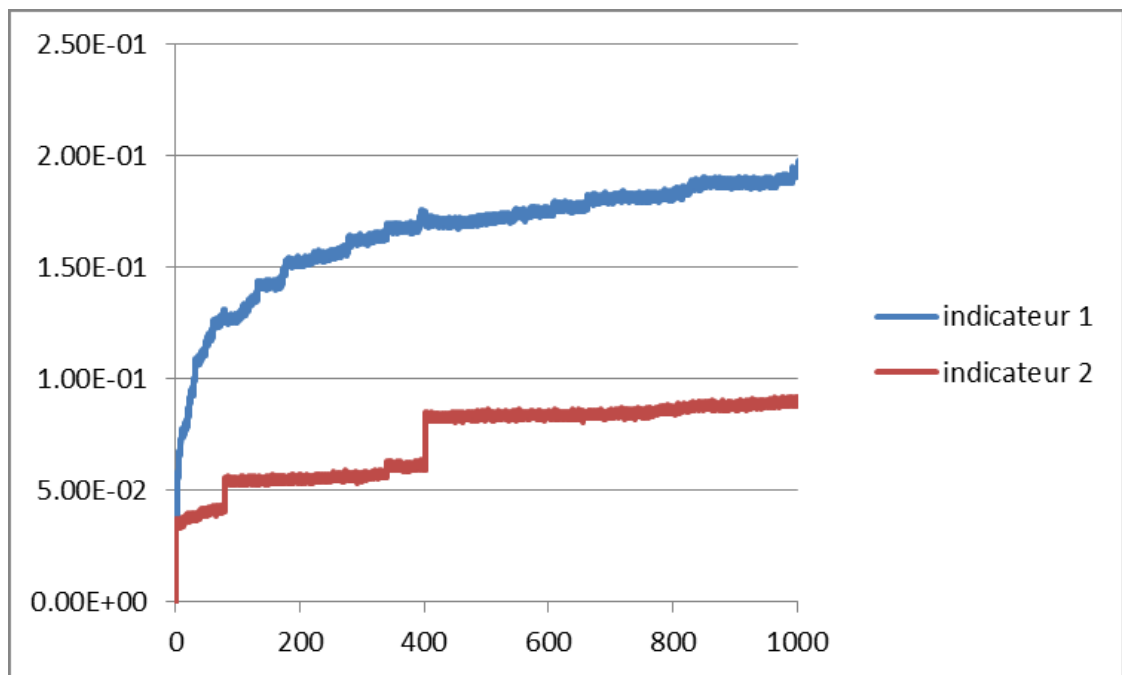


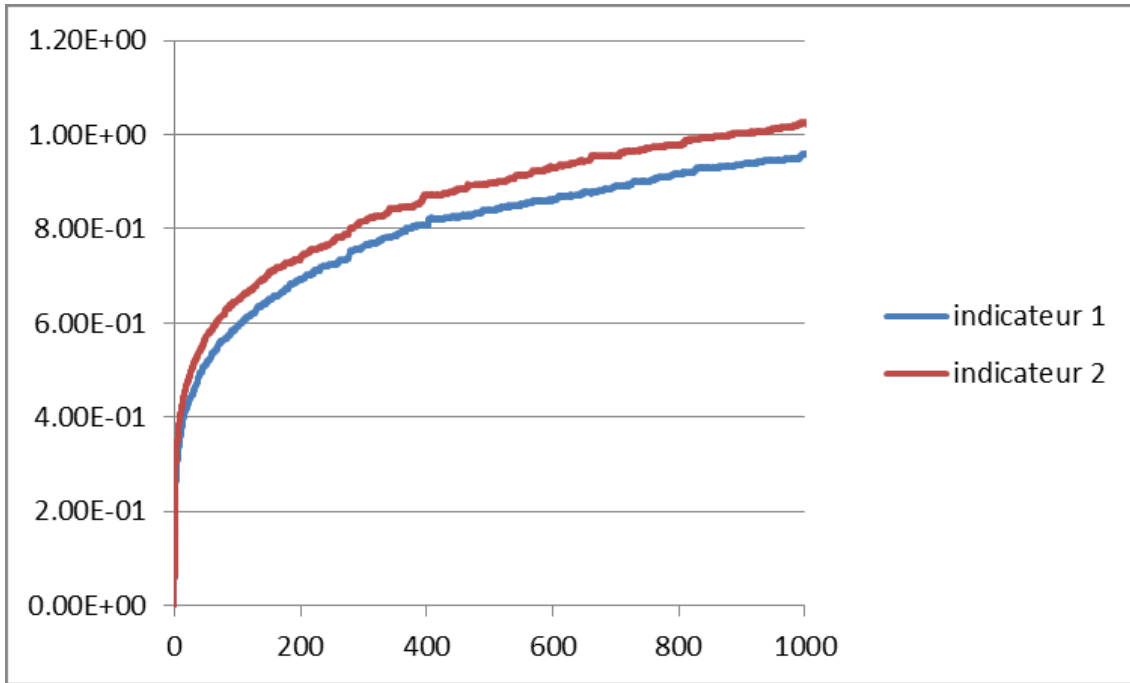
Figure 61 : Allongements du fil sous 79,20 MPa mesurés par les deux indicateurs



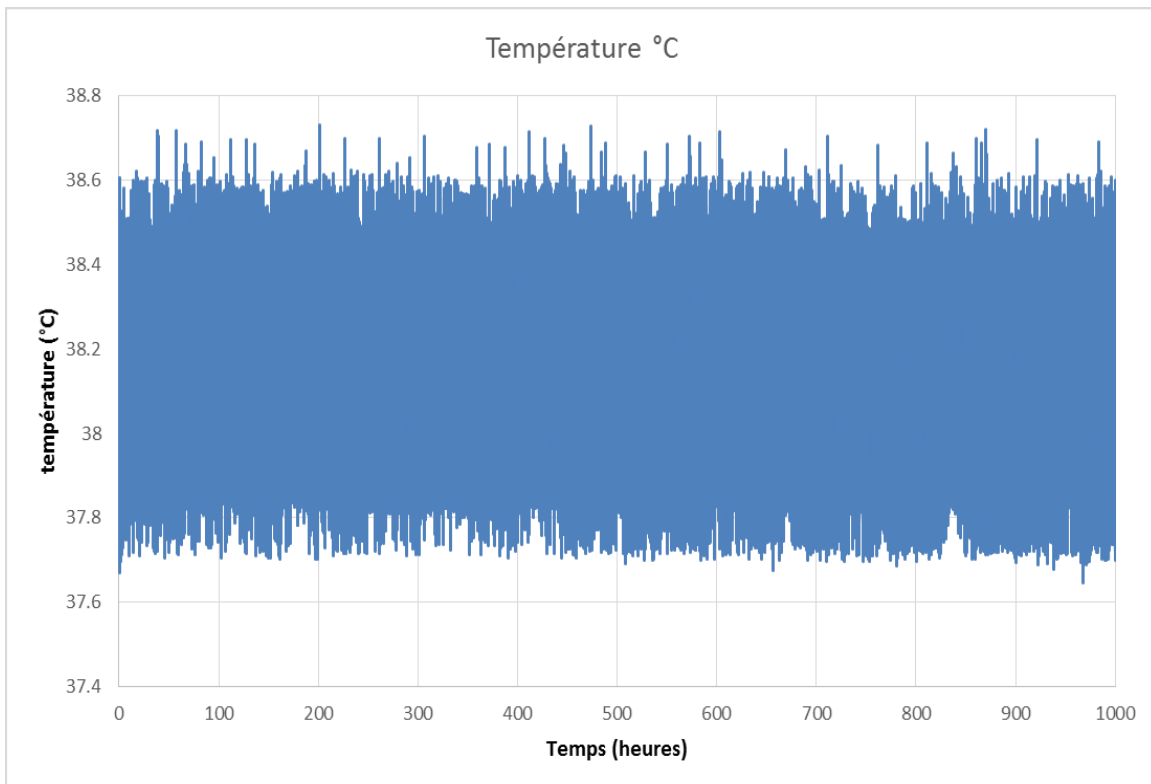
**Figure 62 : Allongements du fil sous 55,55 MPa mesurés par les deux indicateurs**



**Figure 63 : Allongements du fil sous 30,30 MPa mesurés par les deux indicateurs**



**Figure 64 : Allongements du fil sous 106,05 MPa mesurés par les deux indicateurs**



**Figure 65 : variation de la température en fonction du temps\_essai 38 °C**

## 5.4 Interprétation des résultats

D'après (CIGRÉ. 1981), les valeurs des coefficients à utiliser dans l'estimation du fluage, équation 9, sont présentées dans le tableau 10. Ce tableau présente aussi les valeurs des coefficients qui ont été extraits des résultats expérimentaux selon la procédure présentée à la section 4.7. Tel qu'attendu, les valeurs mesurées sont un peu inférieures à celles du CIGRE puisque les coefficients de CIGRE sont dans le sens de la sécurité.

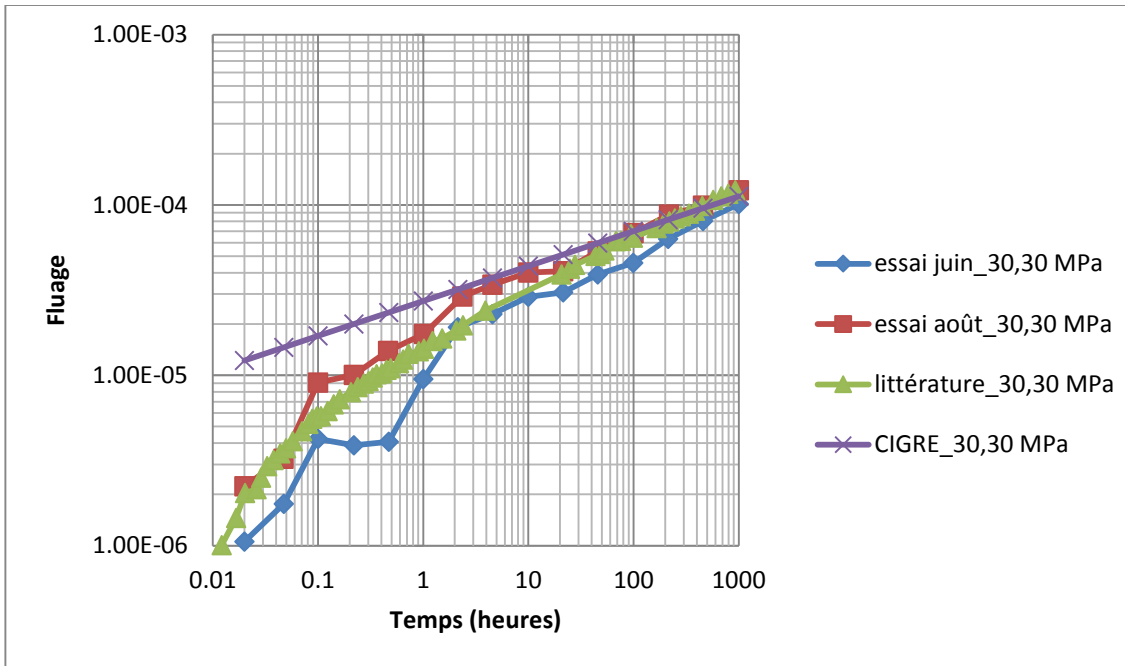
**Tableau 10 : Valeurs coefficients de fluage pour brin**

	d	K	$\phi$	$\alpha$	$\mu$
coefficients expérimentaux	3 mm	5,42	0,022	1,25	0,205
coefficients de fluage selon (CIGRE, 1981)	3 mm	5,95	0,025	1,35	0,205

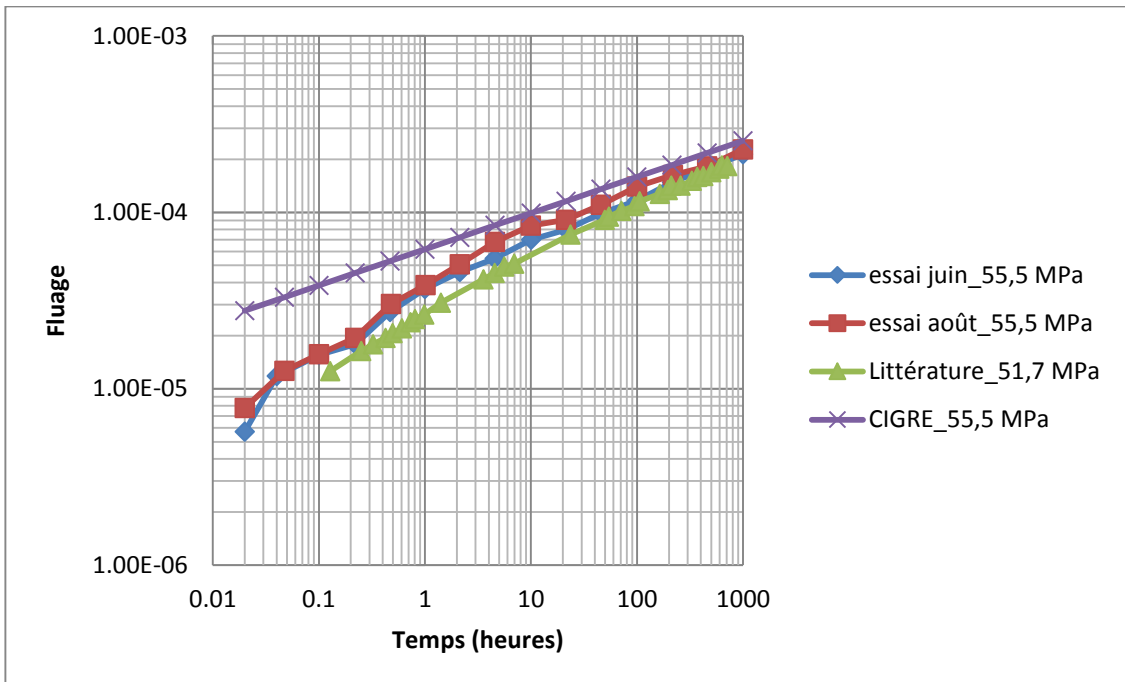
### 5.4.1 Comparaison avec CIGRÉ et les résultats de la littérature

Les figures 66 à 69 présentent une comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus, les données de la littérature et les estimations obtenues à partir de l'équation du CIGRÉ (équation 9). Les données de la littérature ont été prises des essais effectués par (Nigol et Barrett, 1982) présentées dans la figure 9 de la section 2. Les essais de Nigol et Barrett ont été réalisés sur des fils d'aluminium 1350-H19, de diamètres 4,442 mm à 23,5°C alors que les essais de cette étude ont été faits pour des fils de diamètre 3.09 mm à 21 °C. Il est probable que la différence de température induise de faibles écarts dans les résultats. De même, pour les essais autres que 30,3 MPa, les niveaux de contrainte ne correspondent pas tout à fait et les résultats doivent être interprétés avec soin. D'une manière générale, les résultats après une heure sont très comparables.





**Figure 66 : Comparaison avec CIGRÉ et les résultats de la littérature pour 30,3 MPa**



**Figure 67 : Comparaison avec CIGRÉ et les résultats de la littérature pour 55,5 MPa**

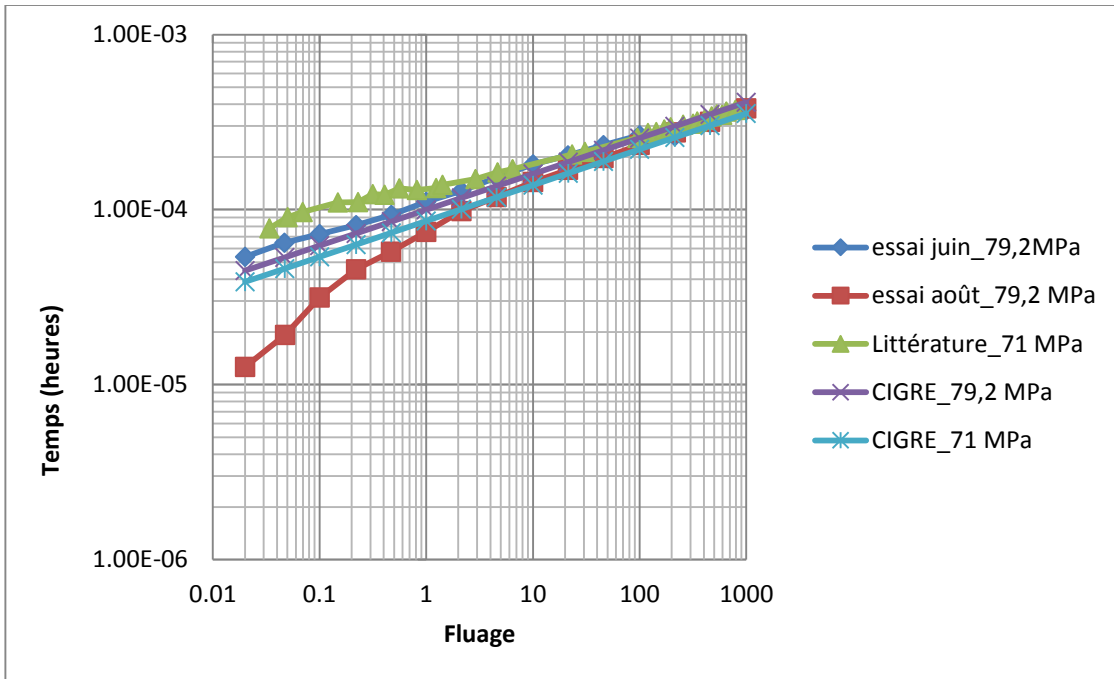


Figure 68 : Comparaison avec CIGRÉ et les résultats de la littérature pour 79,2 MPa

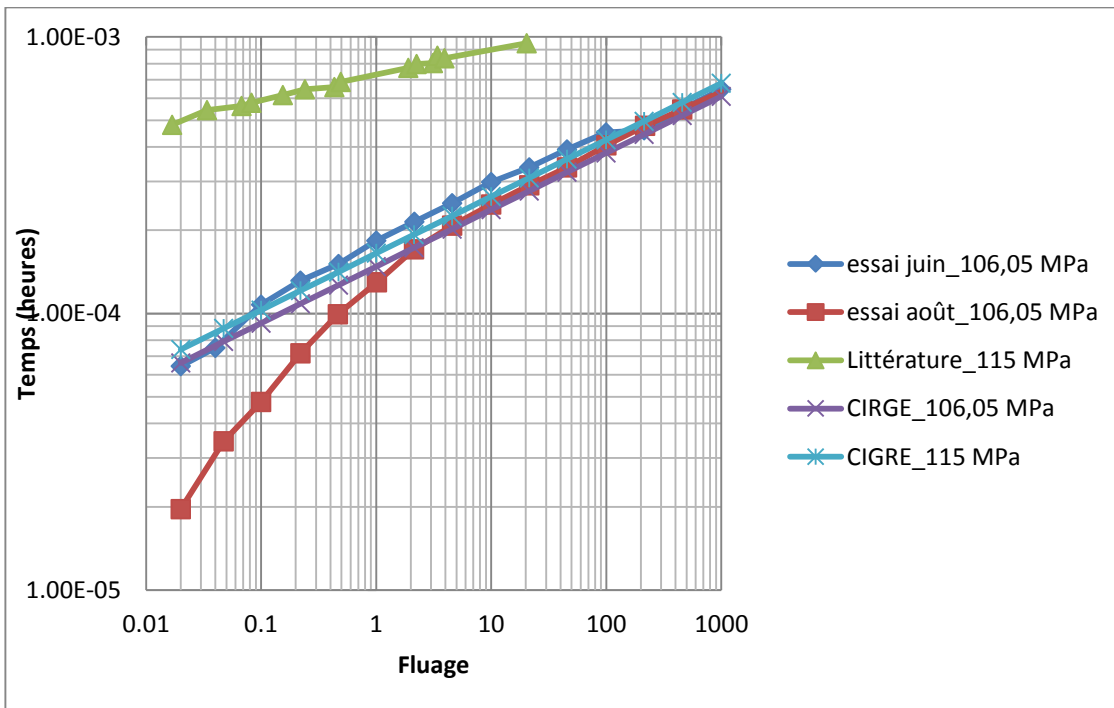


Figure 69 : Comparaison avec CIGRÉ et les résultats de la littérature pour 106,05 MPa

Les résultats d'essais se comparent bien à l'équation du CIGRÉ pour les brins et aux quelques résultats d'essais sur brins disponibles dans la littérature. Pour les figures 66 et 67, l'estimation du CIGRÉ est supérieure aux valeurs mesurées au cours de la première heure de fluage puis se rapproche pour finalement se confondre avec elles à long terme. Ceci est admissible puisque suivant la norme (IEC 61395, 1998) les résultats avant une heure sont pris pour information seulement. Les figures 68 et 69 montrent que l'estimation du CIGRÉ se situe entre les valeurs de fluage mesurées en tout temps.

Dans la figure 66, pour 30,30 MPa, les essais de juin sont légèrement en dessous de la courbe CIGRE et des résultats de la littérature. Cependant, les résultats de CIGRE et de la littérature coïncident très bien avec les résultats des essais d'août. Dans la figure 67 pour 55,5 MPa, les résultats de CIGRE sont légèrement au-dessus des résultats expérimentaux, mais les résultats de Nigol et Barrett pour 51,7 MPa sont en dessous, ce qui est cohérent avec une contrainte un peu plus faible. Dans la figure 68, pour 79,2 MPa, les essais de juin et d'août coïncident parfaitement avec les résultats de CIGRÉ et avec les essais de la littérature pour 71 MPa. Les différences légères de contrainte ont très peu d'influence sur le fluage. Dans la figure 69, les résultats des essais pour 106,05 MPa coïncident parfaitement avec les résultats de CIGRE pour 106,05 MPa. Cependant, les résultats de Nigol et Barrett pour 115 MPa sont très différents des résultats pour 106,05 MPa et de CIGRE pour 115 MPa.

#### **5.4.2 Comparaison avec CIGRÉ essai à 38°C**

Les figures 70 à 73 présentent une comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus et les résultats obtenus à partir de l'équation 9 et des coefficients du CIGRÉ (tableau 14) et une température de 38 °C. Pour 30,30 MPa et 55,5 MPa, figures 70 et 71 respectivement, les courbes de CIGRE à 38°C coïncident bien. Les courbes s'accordent bien pour 79,2 MPa et 106,05 MPa.

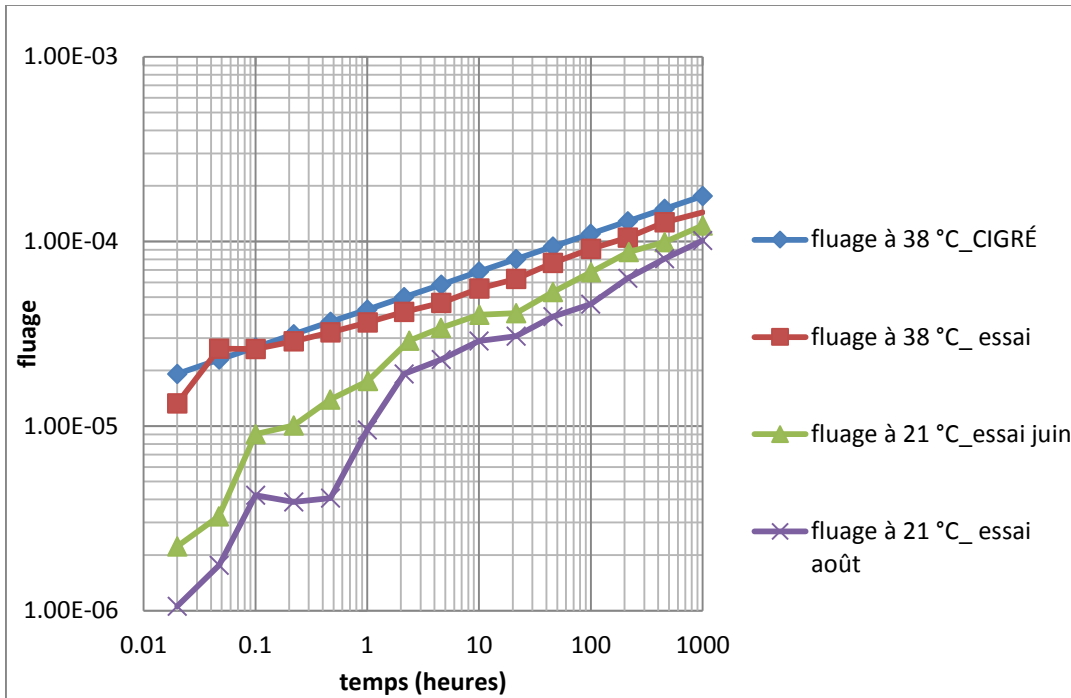


Figure 70 : Comparaison avec CIGRE pour 30,30 MPa

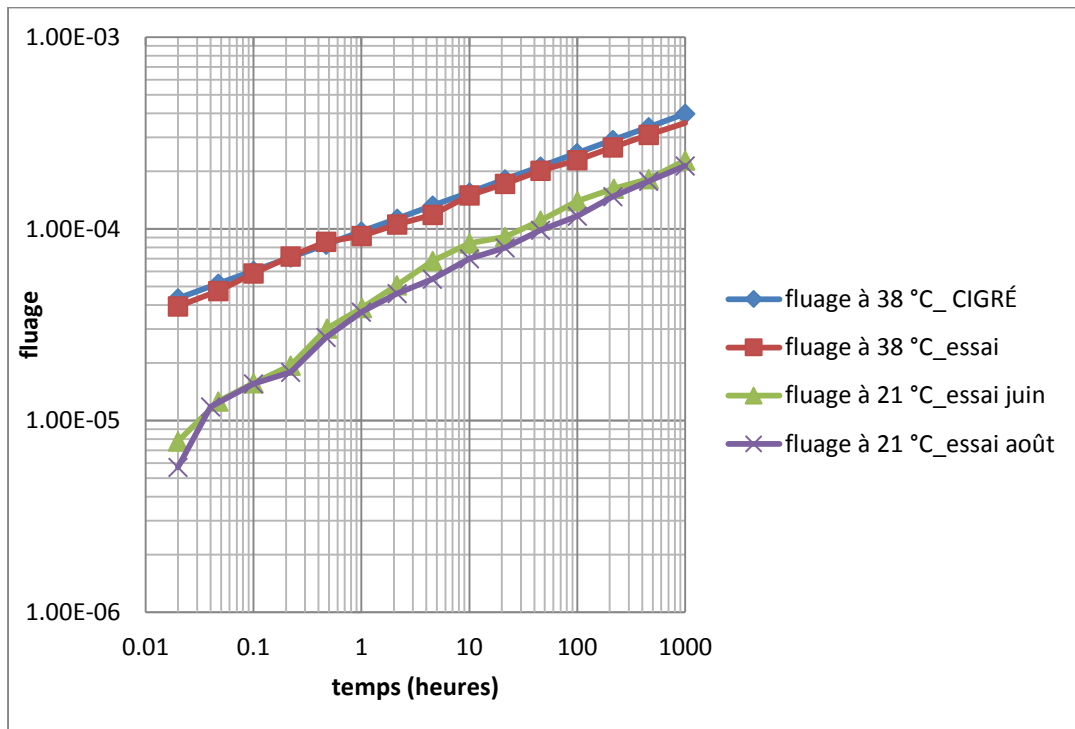
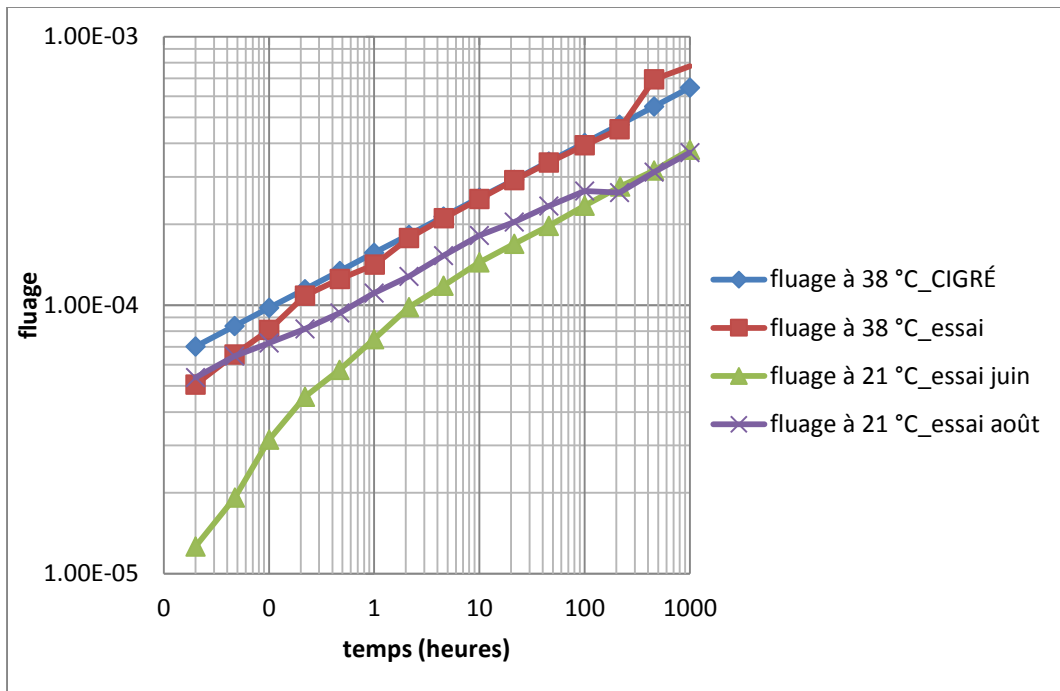
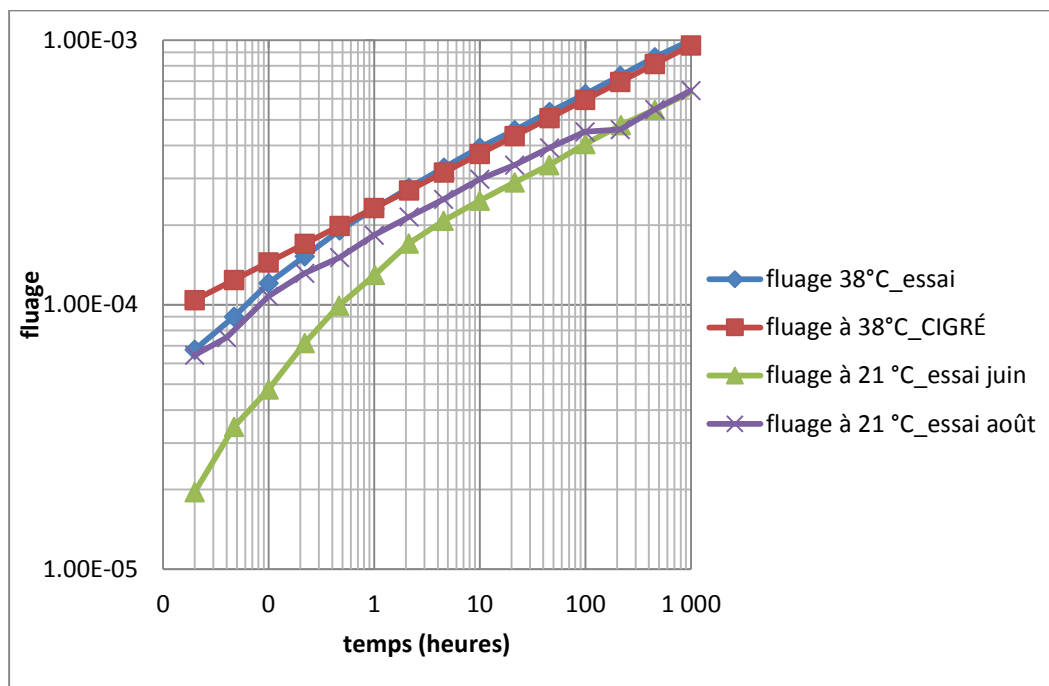


Figure 71 : Comparaison avec CIGRE pour 55,5 MPa



**Figure 72 : Comparaison avec CIGRE pour 79,2 MPa**



**Figure 73 : Comparaison avec CIGRE pour 106,05 MPa**

Les figures 70 à 73 présentent également l'effet de la température sur le fluage puisque les courbes à 20 °C y sont incluses. Afin de quantifier cet effet, le tableau 11 présente les

facteurs de fluage pour la température calculés pour les différentes contraintes en fonction de la relation suivante :

$$F = \frac{\varepsilon(38^{\circ}\text{C})}{\varepsilon(21^{\circ}\text{C})} \quad \text{Équation 26}$$

Avec  $\varepsilon(38^{\circ}\text{C})$  : le fluage à 1000 h à 38 °C

$\varepsilon(21^{\circ}\text{C})$  : le fluage à 1000 h à 21 °C

F : facteur fluage

**Tableau 11 : Valeurs des facteurs de fluage pour la température calculés pour les essais de juin et d'août**

contraintes (MPa)	30,3	55,5	79,2	106,05
essais juin	1,3	1,6	2,0	1,6
essai août	1,5	1,7	2,1	1,5
CIGRÉ	1,53	1,53	1,53	1,53

Ces valeurs s'accordent bien avec la figure 25 de la section 2 qui indique qu'à 38°C, le facteur de température pour le fluage varie entre 1,5 et 2,5.

## 5.5 Approche brin

Dans cette partie, le fluage des conducteurs est déterminé en fonction des résultats d'essais sur les brins d'aluminium. L'approche brin est basée sur des essais plus simples, ce qui facilite l'exécution d'essais sur de nombreux échantillons. De plus, les essais sur les conducteurs sont coûteux et demande des longueurs de conducteurs très grandes.

Les données expérimentales ont été prises à partir de courbes de fluage effectuées sur deux conducteurs ACSR (30/7/3 mm) et ACSR (54/7/3.25 mm) (voir figures 23 et 24). Ces essais ont été effectués à une température égale à 20°C et sous des tensions égales à 20%, 30% et 40% de la tension ultime. Pour le calcul de la tension équivalente, l'équation 16 du chapitre 2 n'est pas tout à fait exacte car elle ne prend pas en compte les déformations plastiques du matériau. Les déformations à long terme seront négligées car elles varient tout au long de l'essai de fluage, mais les déformations plastiques instantanées peuvent être considérées de la façon suivante. D'abord, l'équation 16 pourrait être réécrite de la manière suivante :

$$T = \frac{\sigma_{Al}}{E_{Al}}(E_{Al}A_{Al}) + \frac{\sigma_{Al}}{E_{Al}}(E_{st}A_{st}) = T_{Al} + T_{st} \quad \text{Équation 27}$$

Si on suppose que la déformation élastique de l'aluminium  $\frac{\sigma_{Al}}{E_{Al}}$  est égale à la déformation élastique de l'acier, le premier membre de l'équation 27 correspond à la tension de l'enveloppe de l'aluminium  $T_{Al}$  et le second terme correspond à la tension de l'âme d'acier  $T_{st}$ . Alors, si on cherche la tension d'un câble ACSR complet à partir de l'essai de fluage d'un brin d'aluminium, il manque l'allongement plastique dans le calcul de la déformation. En négligeant l'allongement plastique de l'âme d'acier, qui est faible, l'équation s'écrit de la manière suivante :

$$T = \sigma_{Al}(A_{Al}) + \left(\frac{\sigma_{Al}}{E_{Al}} + dpl_{Al}\right)(E_{st}A_{st}) = T_{Al} + T_{st} \quad \text{Équation 28}$$

Avec :

$\sigma_{Al}$  : la contrainte pour un brin d'aluminium (MPa)

$A_{al}$  et  $A_{st}$  : respectivement les sections d'aluminium et d'acier dans le conducteur

$E_{st}$  : le module d'élasticité de l'acier

$dpl_{Al}$  : la déformation plastique de l'aluminium calculée dans l'annexe 2.

Le tableau 13 présente les valeurs de tensions équivalentes calculées par l'équation 28 pour chaque conducteur ainsi que les tensions utilisées dans les essais sur les conducteurs dans les figures 23 et 24. La variable  $\sigma_{AL}$  a été choisie parce que la contrainte dans les fils d'aluminium est connue. Le tableau 12 présente les caractéristiques des conducteurs.

**Tableau 12 : Caractéristiques conducteurs**

	Eal	Est	Aal	Ast
	GPa	GPa	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>
<b>ACSR 30/7/3</b>	69	200	212,05	49,5
<b>ACSR 54/7/3.25</b>	69	200	447,97	58,07

**Tableau 13 : Contraintes aluminium calculées**

$\sigma_{Al}$ (MPa)	T (kN) ACSR 30/7/3 (mm)			T (kN) ACSR 54/7/3.25 (mm)		
	Tension équivalente calculée (kN)	Tension utilisée dans l'essai (kN)	Fraction résistance ultime (%)	Tension équivalente calculée (kN)	Tension utilisée dans l'essai (kN)	Fraction résistance ultime (%)
30,3	10,8	-	-	18,73	-	-
55,5	20,26	18,08	20	34,83	31,8	20
79,2	29,20	27,12	30	50,02	47,7	30
106,05	40	36,16	40	68,04	63,6	40

Par la suite, l'élongation du câble  $\epsilon_c$  est calculée en fonction de l'élongation dans le brin  $\epsilon_i$  avec l'équation 11. Les valeurs expérimentales ont été comparées aux valeurs calculées pour valider l'approche brin.

Les figures 74 à 79 présentent des comparaisons entre les valeurs trouvées par l'approche brin à partir des résultats expérimentaux du fluage sur les brins et les résultats expérimentaux sur conducteurs complets disponibles dans la littérature (Michael, 1993) présentés dans les figures 23. Ces figures présentent aussi l'estimation du fluage obtenue avec les équations 29 qui proviennent des recommandations du (CIGRE, 1981).

$$\epsilon_i^{creep} = K \cdot e^{\phi\tau} \cdot \sigma^\alpha \cdot t^{\mu/\sigma^\delta} \quad \text{Équation 29}$$

Avec :

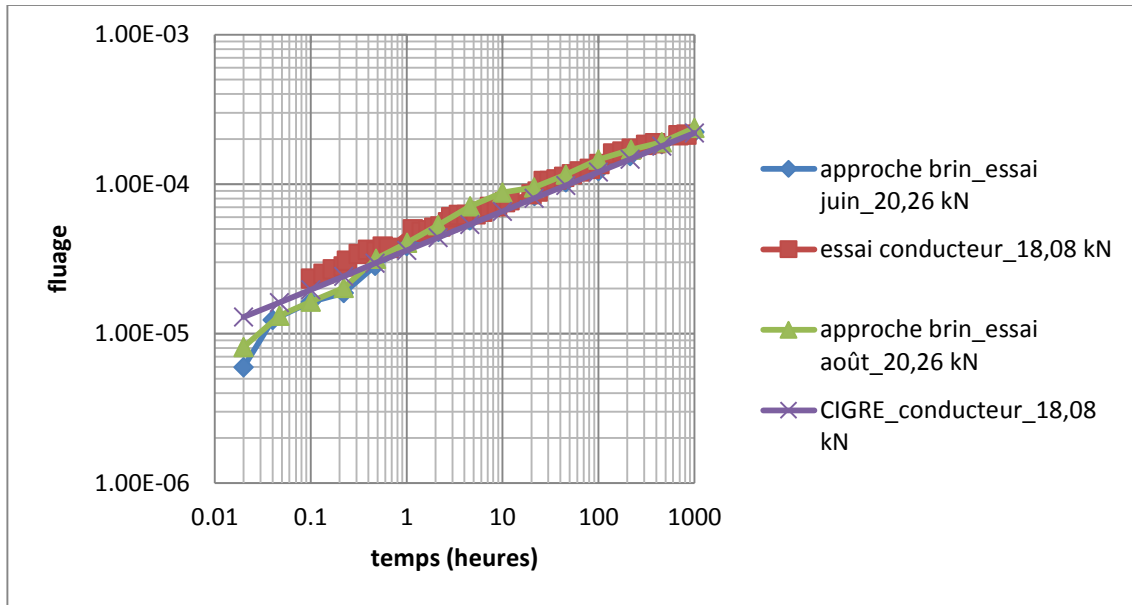
$\alpha$ ,  $\mu$ ,  $\phi$  et  $K$  sont des coefficients évalués d'une façon expérimentale présentés dans le tableau 14.

$\sigma$  : contrainte moyenne dans le conducteur,  $\tau$  : la température (°C) et  $t$  : le temps (heures)

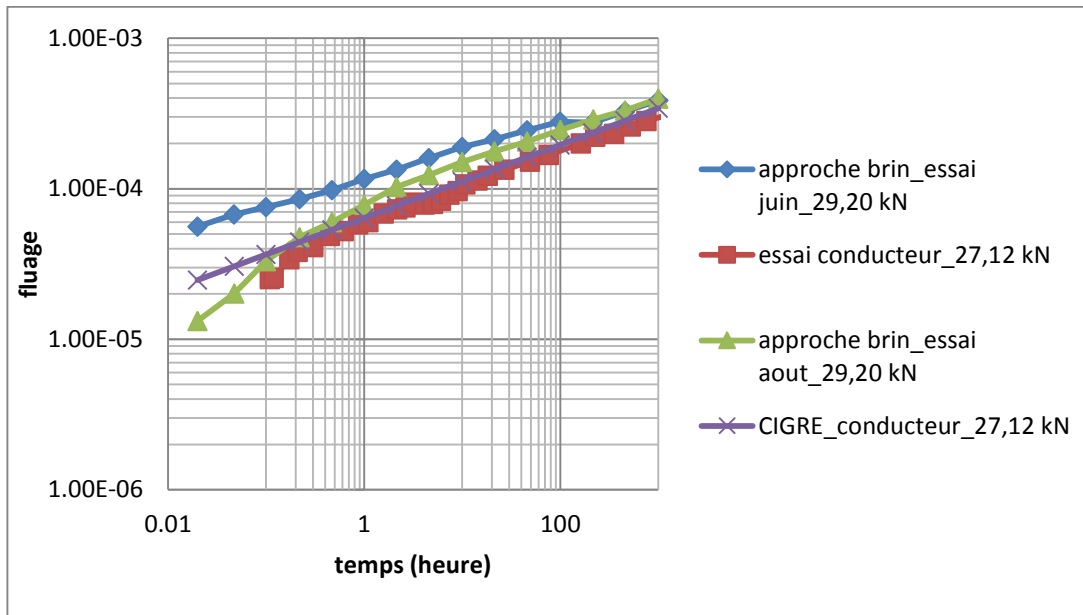
**Tableau 14 : Valeurs coefficients de fluage pour conducteur**

	K	$\phi$	$\alpha$	$\mu$	$\delta$
ACSR 30/7/3	1,9	0,024	1,83	0,23	0.08
ACSR 54/7/3.25	1,6	0,017	1,42	0,38	0,19

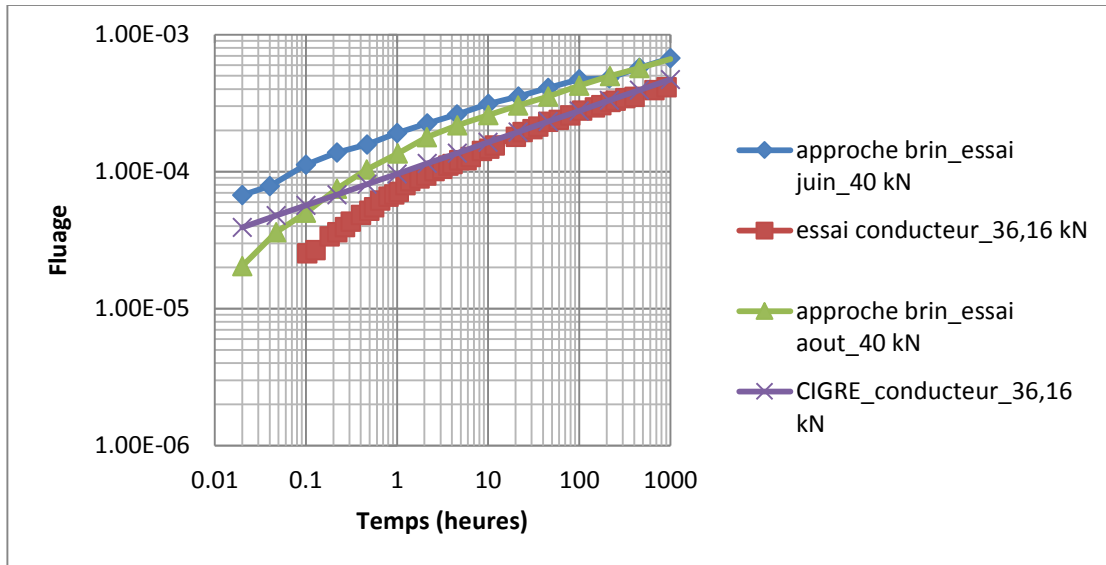




**Figure 74 : Comparaison entre les valeurs trouvées par l'approche brin et les résultats expérimentaux pour un conducteur ACSR 30/7/3 mm\_18,08 kN**

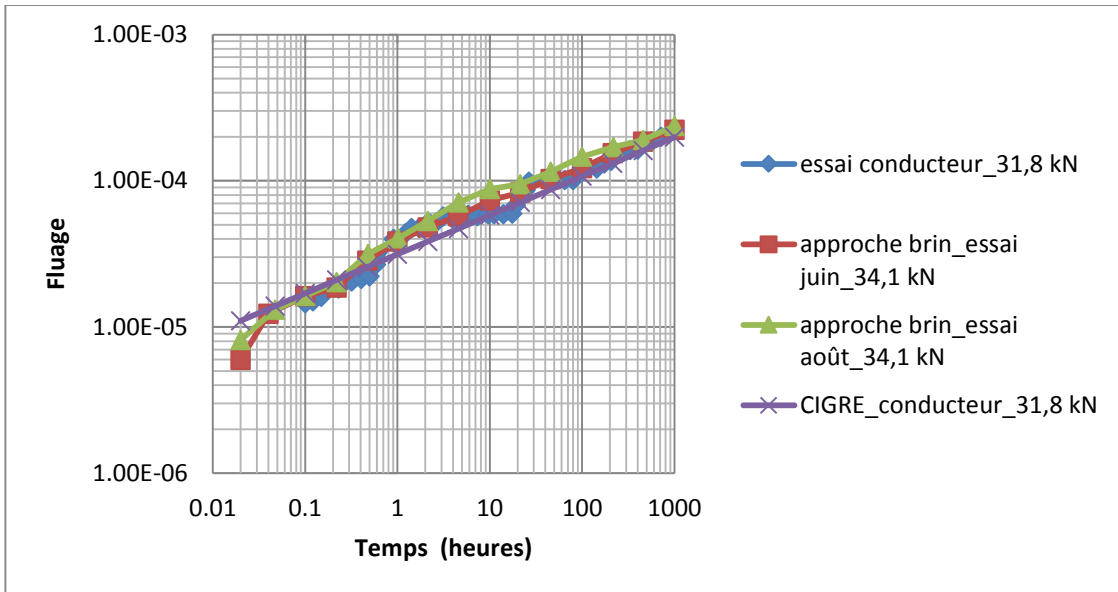


**Figure 75 : Comparaison entre les valeurs trouvées par l'approche brin et les résultats expérimentaux pour un conducteur ACSR 30/7/3 mm\_27,12 kN**

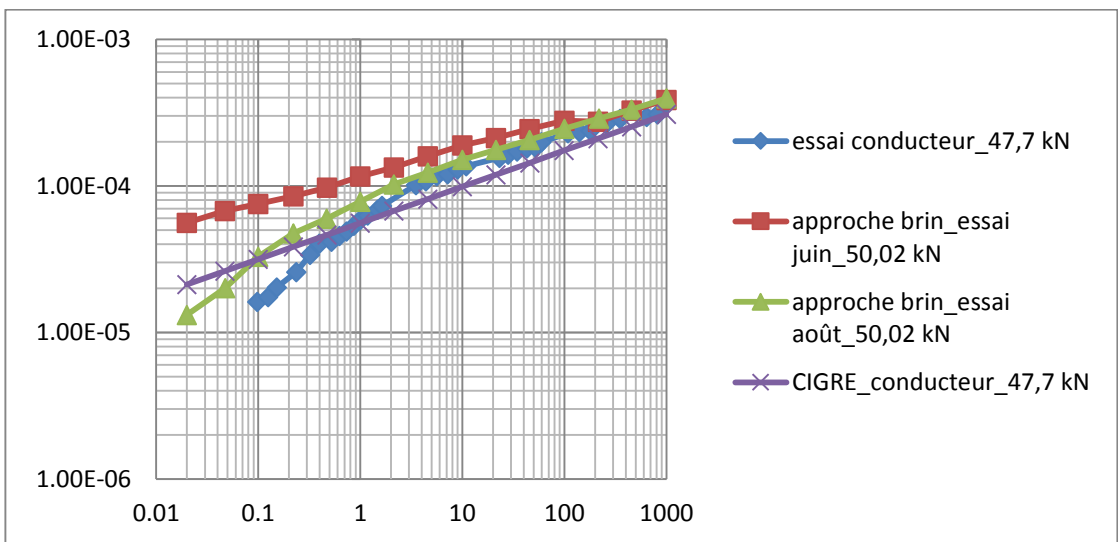


**Figure 76 : Comparaison entre les valeurs trouvées par approches et les résultats expérimentaux pour un conducteur ACSR 30/7/3 mm\_36,16 kN**

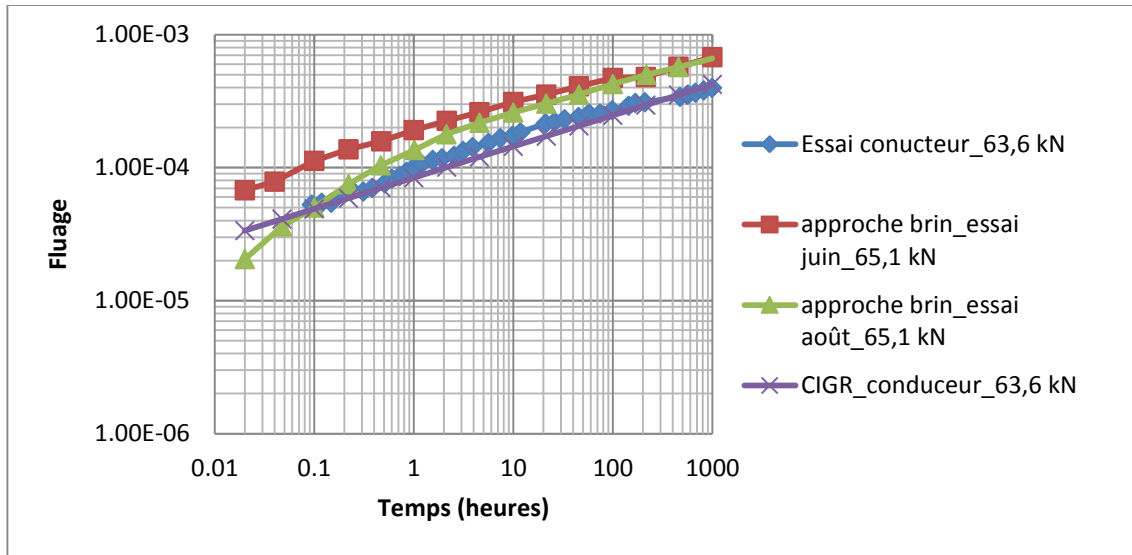
Les figures 74, 75 et 76 présentent des comparaisons entre les résultats obtenus de l'approche brin, des résultats effectués sur un conducteur ACSR 30/7/3mm à 20°C et des résultats de l'équation du CIGRÉ pour ce conducteur ACSR. Dans la figure 74, les résultats de l'approche brin pour 20,26 kN coïncident avec les résultats de la littérature pour 18,08 kN et avec les résultats de CIGRE pour 18,08 kN et présentent peu de différences surtout après 1 heure. Dans la figure 75, les résultats de l'approche brin pour les essais de juin à 29,20 kN sont au-dessus. Les essais sur le conducteur à 27,12 kN s'accordent avec les résultats de CIGRE à 27,12 kN. Dans la figure 76 aussi les résultats sur le conducteur à 36,16 kN s'accordent avec les résultats de CIGRE à 36,16 kN et les résultats de l'approche pour les essais de juin à 40 kN sont au-dessus. La différence entre les résultats d'essais sur brins et sur conducteurs semble augmenter légèrement avec le niveau de contrainte.



**Figure 77 : Comparaison entre les valeurs trouvées par approches et les résultats expérimentaux pour un conducteur ACSR 54/7/3,25 mm\_31,8 kN**



**Figure 78 : Comparaison entre les valeurs trouvées par approches et les résultats expérimentaux pour un conducteur ACSR 54/7/3,25 mm\_47,7 kN**



**Figure 79 : Comparaison entre les valeurs trouvées par approches et les résultats expérimentaux pour un conducteur ACSR 54/7/3,25 mm\_65,1 kN**

Les figures 77, 78 et 79 présentent des comparaisons entre les résultats obtenus de l'approche brin, des résultats effectués sur un conducteur ACSR 54/7/3,25 mm à 20°C et des résultats de l'équation du CIGRE pour ce conducteur. Dans la figure 77, les résultats de l'approche brin pour 34,83 kN s'accordent avec les résultats de la littérature pour 31,8 kN et avec les résultats de CIGRE pour 31,8 kN et présentent peu de différences surtout après 1 heure. Dans la figure 78, les résultats de l'approche brin pour les essais de juin à 50,02 kN sont au-dessus au cours de la première heure de fluage. Par la suite, les 2 courbes de l'approche brin collent sur le résultat du conducteur. Les essais sur le conducteur à 47,7 kN s'accordent avec les résultats de CIGRE à 47,7 kN. Dans la figure 79 aussi les résultats sur le conducteur à 63,6 kN s'accordent avec les résultats de CIGRE à 63,6 kN et les résultats de l'approche pour les essais de juin à 68,04 kN sont au-dessus. Encore une fois, les différences entre les résultats d'essais sur brins et sur conducteurs semblent augmenter avec le niveau de contrainte. En effet, pour des tensions élevées, après une certaine durée de temps, la contrainte dans l'aluminium diminue et augmente dans l'acier. Par conséquent, l'allongement total dans le câble est inférieur à l'allongement dans les brins d'aluminium seuls.

En conclusion, les résultats se comparent assez bien à quelques résultats disponibles dans la littérature pour des conducteurs complets. Ces quelques exemples démontrent également

qu'avec quelques équations analytiques simples, il est possible de prédire le comportement d'un conducteur complet à partir des résultats d'essais sur brins. Il est difficile d'évaluer quelle part des différences observées est due à la mise en place des brins. Cependant, cette mise en place de brins semble être suffisamment faible pour ne pas affecter significativement la comparaison entre les résultats obtenus avec l'approche brin et ceux obtenus sur des conducteurs complets.

L'approche brin pourrait être utile également pour évaluer le fluage des conducteurs à hautes températures d'opération. Ceci pourra être réalisé lors de la prochaine étape du programme de recherche en cours.

# Conclusion

---

Dans le cadre de ce travail, une approche théorique est présentée. Elle est basée sur la prédiction du fluage des conducteurs complets en fonction des caractéristiques mécaniques et géométriques des fils constituant les conducteurs. L'objectif ultime de ce projet de recherche est d'étudier l'effet de la température sur le fluage des conducteurs. En effet, pour la plupart des types de conducteurs utilisés en lignes de transport, la déformation de fluage peut excéder la déformation élastique surtout à hautes températures d'exploitation.

En se basant sur les hypothèses de (Hruska 1951) et (CIGRE, 1981), une approche brin a été mise en place. Cette approche donne des relations qui permettent le passage de l'élongation du brin à celle d'un conducteur donné et vice versa.

À l'aide de la norme (IEC 61395 1998), un banc d'essai du fluage pour des fils d'aluminium a été conçu. Ce banc d'essai a été validé par des essais préliminaires de 100 heures. Un protocole d'opération a aussi été déterminé grâce à ces essais préliminaires. Des essais d'un minimum de 1000 heures ont ensuite été effectués pour différents niveaux de contrainte et sous deux valeurs de température, 21°C et 38°C. Les résultats obtenus ont été comparés à des résultats disponibles dans la littérature scientifique. Cette comparaison a démontré que le banc d'essai, opéré selon le protocole établi, permet de reproduire les résultats des autres laboratoires.

Afin de valider l'approche utilisée, des comparaisons ont été faites avec les essais de (Drury, 1993) qui présentent le fluage des conducteurs complets à température ambiante. Ces comparaisons ont démontré que les résultats obtenus par l'approche brin sont très proches des données expérimentales. Ceci amène à conclure qu'à l'aide d'expressions analytiques simples, il est possible de déduire le fluage d'un conducteur donné. Ainsi, le fluage semble être majoritairement métallurgique et que l'effet de la mise en place des brins est faible.

Dans les travaux futurs, il serait utile d'effectuer des essais sur des brins d'aluminium sous différentes températures afin de mieux quantifier l'effet de la température sur le fluage. Il serait également souhaitable d'obtenir des essais effectués sur des conducteurs à haute température pour appuyer l'approche proposée. De plus, la méthode proposée pourrait être étendue à l'étude de l'effet des fluctuations de température et de tension pour mieux représenter les conditions réelles des conducteurs installés sur les lignes aériennes de transport d'énergie.

# Liste des références

Albizu, I., Mazon, A.J. et Zamora, I. (2009). Flexible Strain-Tension Calculation Method for Gap-Type Overhead Conductors. *Power Delivery, IEEE*, volume 24, numéro 3, pp. 1529-1537.

ASTM B 230. (2012). Standard Specification for Aluminum 1350–H19 Wire for Electrical Purposes. 5p.

ASTM B 230. (2002). Standard Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Core Wire for Aluminum Conductors, Steel Reinforced (ACSR). 4p.

ASTM B 606. (2012). Standard Specification for High-Strength Zinc-Coated (Galvanized) Steel Core Wire for Aluminum and Aluminum-Alloy Conductors, Steel Reinforced. 4p.

ASTM B 803. (2012). Standard Specification for High-Strength Zinc–5 % Aluminum Mischmetal Alloy-Coated Steel Core Wire for Aluminum and Aluminum-Alloy Conductors, Steel Reinforced. 4p.

Binette, L. (2012). *Théorie des câbles aériens — Équilibre interne — Courbes de contraintes déformation*. Université de Sherbrooke : GCI 756. Cours structure de lignes aériennes électriques.

Boyer, H.E. (1988). *Atlas of creep and stress-rupture curves*. 2nd édition. ASM International, Metals Park, Michigan, USA, 663 p.

Bradbury, J. Dey, P. Orawski, G. et Pickup, K.H. (1975). Long-term-creep assessment for overhead-line conductors. *Electrical Engineers, Proceedings*, volume 122, numéro 10, p. 1146-1152.

Cardou, A. (2006). Taut helical strand bending stiffness. *UTFscience*, <http://www.utfscience.de>. UT 01-2006, 9 p.



Cardou, A. et Jolicoeur, C. (1997). Mechanical models of helical strands. *Applied Mechanics Reviews*, volume 50, numéro 1, p. 1-14.

CIGRÉ. A practical method of conductor creep determination. (1972). *Electra*, numéro 24, p. 105-137.

CIGRÉ. Permanent elongation of conductors. Predictor equation and evaluation methods. 1981. *Electra*, numéro 75, p. 63-98.

COSTELLO, G.A. (1990). *Theory of wire rope*. Springer-Verlag, New York, É.-U., 106 p.

Doriot, J.M., Baïlon, J.P (2000-2001), *Des matériaux*. 3<sup>rd</sup> édition, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, Québec, 736p.

EPRI (2006). *Transmission Line Reference Book — Wind-Induced Conductor Motion*. Final Report, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, USA, 618 p.

Feyrer, K. (2007). *Wire Ropes — Tension, Endurance, Reliability*, Springer — Verlag, ISBN 978-3-540-33831-4, Berlin, Allemagne, 322 p.

Harvey, J.R. (1969). Creep of Transmission Line Conductors. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, volume 88, numéro 4, p. 281-286.

Harvey, J.R. et Larson, R.E. (1970). Use of Elevated-Temperature Creep Data in Sag-Tension Calculations. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, volume 89, numéro 3, p. 380-386.

Honeycombe, R. W. K. (1984), *The Plastic deformation of metals*. 2<sup>nd</sup> édition, ASM, Metals Park, London- Beccles, 477 p.

Hruska, F.H. (1951). Calculation of stresses in wire ropes. *Wire and Wire Products*, volume 26, numéro 9, p. 766-767.

IEC 61395 (1998). *Overhead electrical conductors - Creep test procedures for stranded conductors*. International standard. 21p.

IEEE (1964). Limitations on Stringing and Sagging Conductors. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, volume 83, numéro 12, p. 1230-1235.

Jolicoeur, C. et Cardou, A. (1991). A numerical comparison of current mathematical models of twisted wire cables under axisymmetric loads. *Transactions of the ASME Journal of Energy Resources Technology*, volume 113, numéro 4, p. 241-249.

Knapp, R.H. (1979). Derivation of a new stiffness matrix for helically armored cables considering tension and torsion. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, volume 14, numéro 4, p. 515-529.

Lanteigne, J. (1985). Theoretical estimation of the response of helically armored cables to tensions, tension and bending. *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*, volume 52, numéro 2, p. 423-529.

Leblond, A. (1995). *Modèle probabiliste des vibrations éoliennes de portée de conducteur simple*. Thèse de doctorat, Université Laval- Québec, 394 p.

Lemaitre, J., Chaboche, J.-L., Benallal, A. ET Desmorat, R. (2009). *Mécanique des matériaux solides*, 3<sup>e</sup> édition. Dunod, Paris, 577 p.

Drury, M.D. (1993). *The effect of prestressing on the inelastic (creep) behaviour of Australian made bare overhead conductors*. Thèse de doctorat en génie des matériaux, Université Wollongong- Australie, 382 p.

Michael, M., Stéphan, P. et Stefan, J. (2008). Elongation of overhead line conductors under combined mechanical and thermal Stress, *Condition Monitoring and Diagnosis, International Conference* (2008), p. 671-674.

Murry, G. (2004). *Aide — mémoire Métallurgie*. 2<sup>e</sup> édition. Dunod, Paris, 340 p.

Murry, G. (1999). Aciers résistant au fluage. *Techniques de l'ingénieur Aciers inoxydables, aciers réfractaires et aciers résistant au fluage*.

Nigol, O. et Barrett, J.S. (1982). Development of an accurate model of ACSR conductors for calculating Sags at high temperature- PART 3. Rapport. *Canadien Electrical Association .Ontario Hydro, Toronto- Ontario (78-93)*.

Nigol, O. et Barrett, J, S. (1980). Development of an accurate model of ACSR conductors for calculating Sags at high temperature- PART 1. Rapport. *Canadien Electrical Association. Ontario Hydro, Toronto- Ontario (78-93)*.

Nigol, O. et Barrett, J.S. (1981). Characteristics of ACSR Conductors at High Temperatures and Stresses. *Power Apparatus and Systems*, volume 100, numéro 2, p. 485-493.

Papiliou, K.O. (1995). *Bending of helically twisted cables under variable bending stiffness due to internal friction, Tensile force and cable curvature*. Thèse de doctorat, Zurich, Suisse, 159 p.

Roest, C.A. (1969). Creep studies of aluminium conductor alloys. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, volume 88, numéro 11, p. 1690-1695.

Saint-Antonin, F. (2013). Essais de fluage. *Techniques de l'ingénieur. Essais mécaniques sur les métaux et alliages*.14p.

# Annexe : Essais de traction

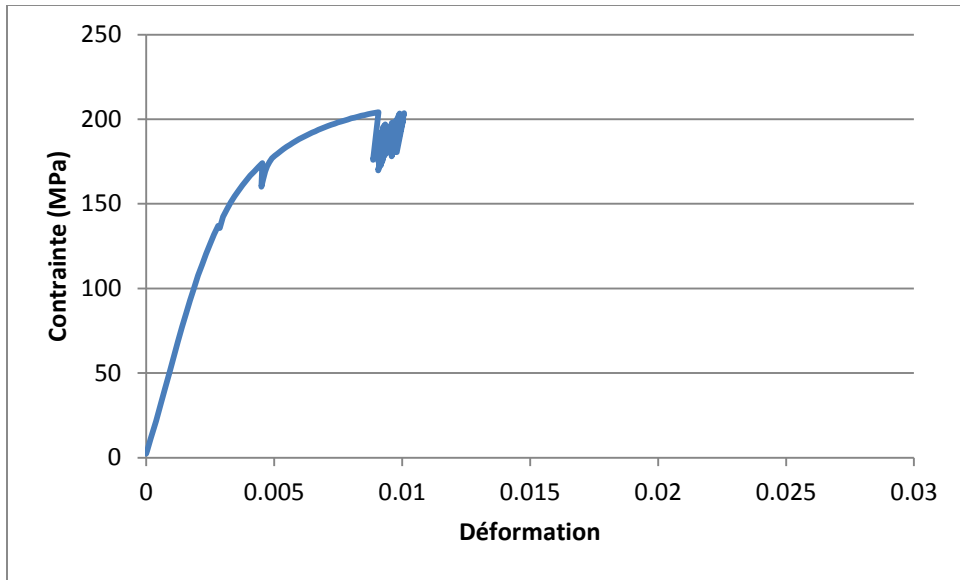
---

Cette annexe présente des résultats des essais de traction effectués sur les brins en aluminium 1350-H19 de diamètre 3 mm (Figures 80 à 83). La déformation des fils a été mesurée sur une longueur de 100 mm au moyen d'un extensomètre. La longueur des échantillons de traction était d'environ 150 mm. La force a été mesurée par une cellule de force d'une capacité de 5 kN. Le diamètre de chaque fil a été mesuré individuellement et les valeurs varient de 3,05 à 3,07 mm. Certains résultats ont dû être rejetés, car il y a eu glissement dans les fixations. La figure 80 montre un exemple d'essai interrompu en raison du glissement. En fonction de ces résultats et en se référant à la méthode d'essai de la norme ASTM-B557, le module élastique, la limite d'élasticité et la résistance à la traction ont été calculés et les valeurs moyennes sont présentées au tableau 4.

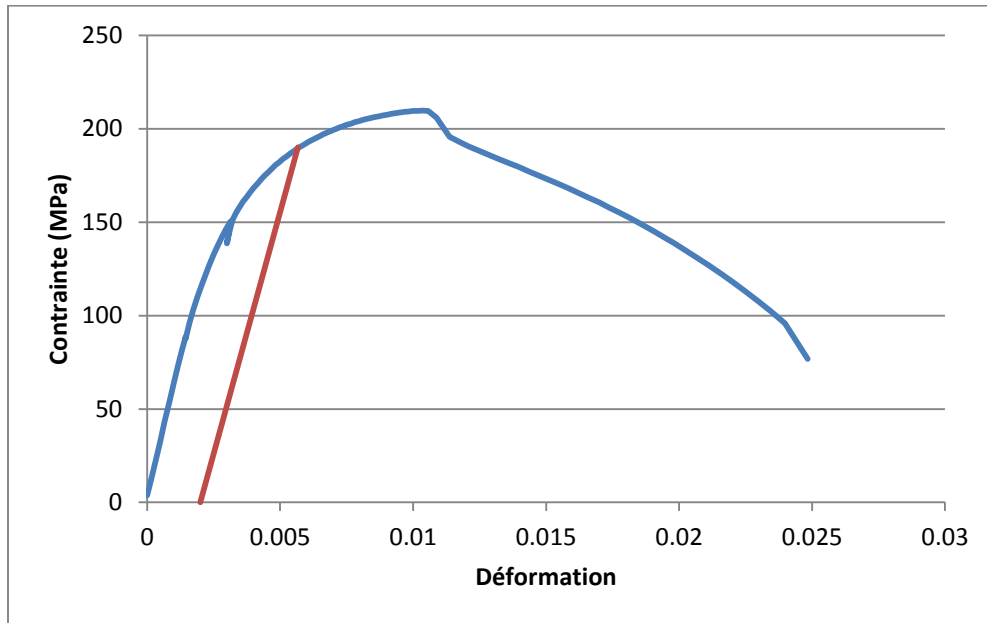
Pour le module élastique, les valeurs trouvées varient entre 50 GPa et 60 GPa pour les différents tests et cette valeur est inférieure au module élastique de l'aluminium 1350-H19 qui est égal à 69 GPa. Ceci pourrait être expliqué par le fait que les fils ne sont pas tout à fait redressés. D'autres essais devront être réalisés avec ce montage pour mieux comprendre ces différences.

La limite d'élasticité est la limite entre les zones élastique et plastique, et est calculée par la méthode limite conventionnelle d'élasticité à 0,2%. Cet alliage d'aluminium ne montre pas de limite d'élasticité bien définie sur les figures 80 à 83. La limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% est déterminée par l'intersection de la courbe de traction et d'une droite parallèle à la pente élastique de la courbe de traction et passant par le point d'abscisse 0,2%. La droite en rouge sur la figure 81 illustre cette méthode. La limite d'élasticité moyenne trouvée est égale à 190 MPa.

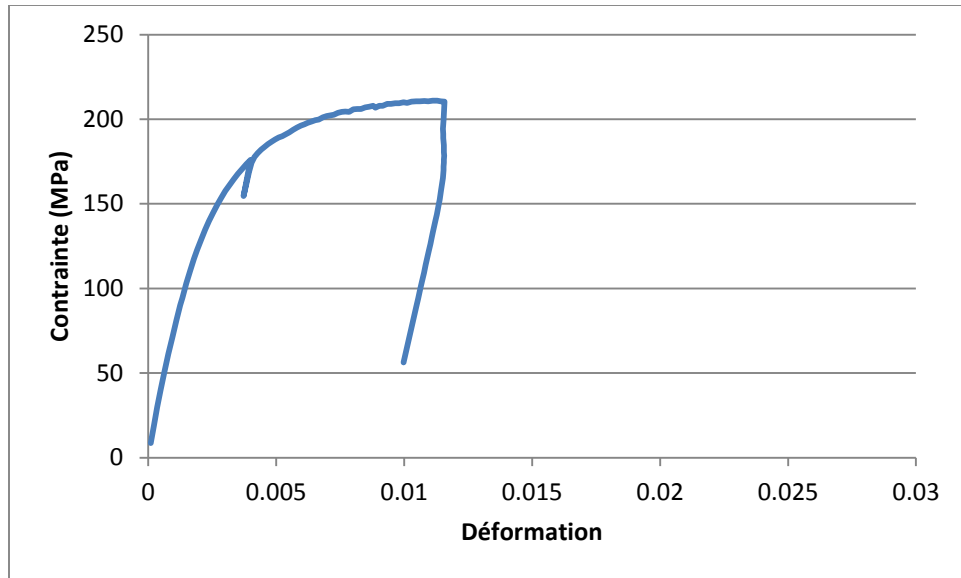
La résistance à la traction, correspond à la contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction. La valeur trouvée est égale à 210 MPa, et ce qui est nettement supérieur à la résistance mécanique nominale de l'aluminium 1350-H19 prise égale à 170 MPa (ASTM-B230).



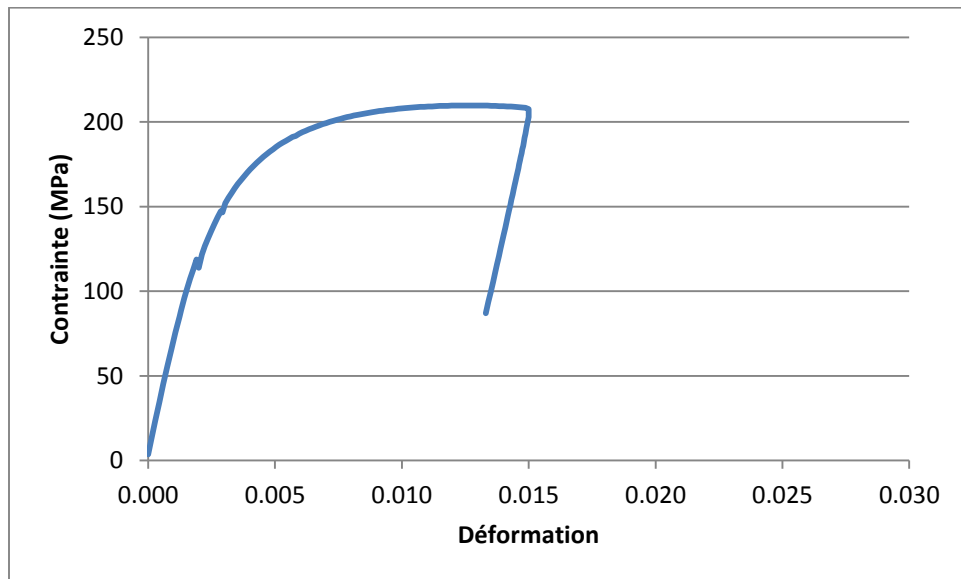
**Figure 80 : Courbe de contrainte — déformation d'un fil d'aluminium 1350-H19, soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture\_ Echantillon 1**



**Figure 81 : Courbe de contrainte — déformation d'un fil d'aluminium 1350-H19, soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture\_ Echantillon 2**



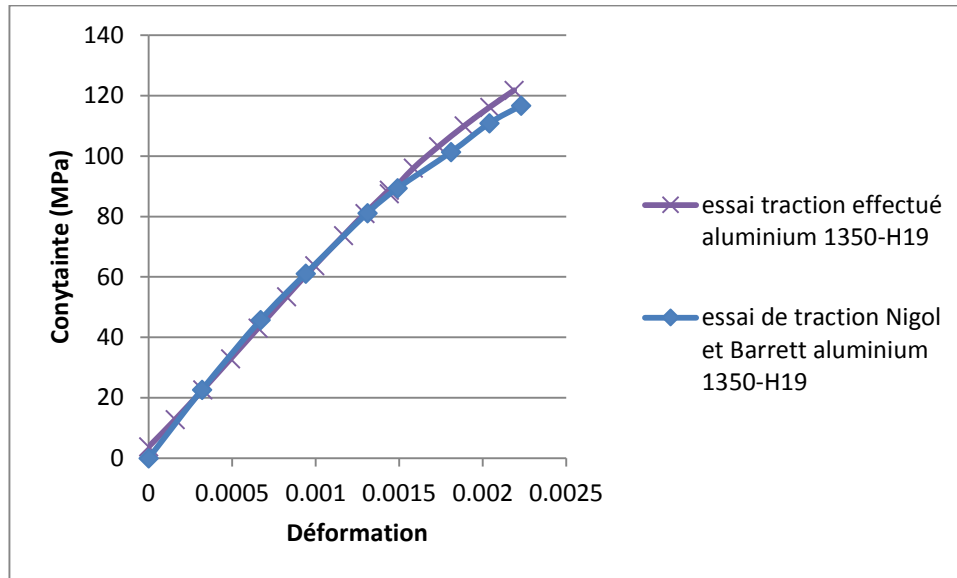
**Figure 82 : Courbe de contrainte — déformation d'un fil d'aluminium 1350-H19, soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture\_ Echantillon 3**



**Figure 83 : Courbe de contrainte — déformation d'un fil d'aluminium 1350-H19, soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture\_ Echantillon 4**

La figure 84 présente une comparaison entre les résultats de la figure 43 de contrainte déformation d'un brin d'aluminium 1350 -H19 adaptée de [Nigol et Barrett, 1982] et la courbe de l'échantillon 2 obtenue suite à l'essai de traction effectué dans le cadre de ce projet (figure 81). Les courbe de l'essai de traction coïncide bien avec la courbe prise de la

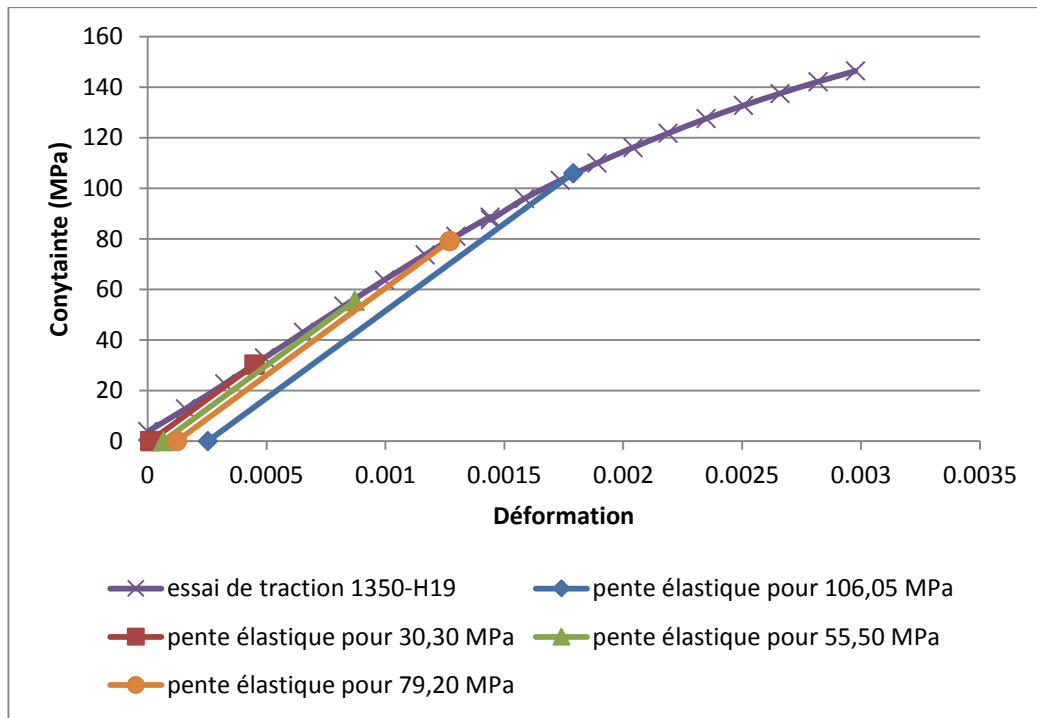
littérature ce qui permet de valider ces essais effectués. Cet essai sera donc utilisé pour le calcul des déformations plastiques à la Section 5.5.



**Figure 84 : Comparaison entre essai effectué \_Echantillon 2 et essai Nigol et Barrett**

## Déformation plastique

Dans cette partie, la méthode de calcul de la déformation plastique est présentée. Pour ceci, une droite parallèle à la pente élastique de la courbe de traction est tracée pour chaque niveau de contrainte (figure 85). La déformation plastique correspond au décalage entre le zéro et la pente élastique pour chaque contrainte.



**Figure 85 : Évaluation de la déformation plastique à divers niveaux de contrainte**

**Tableau 15 : valeurs numériques obtenues pour la déformation plastique aux quatre niveaux de contrainte**

Contrainte (MPa)	30,30	55,5	79,20	106,05
Déformation plastique	1,1 E-05	6,6 E-05	1,22 E-04	2,53 E-04



