



**Développement d'un modèle de comportement uniaxial pour la glace polycristalline
isotrope**

Par Mahdiyeh Seifaddini

**Thèse présentée à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade
de Philosophiæ doctor en ingénierie**

Québec, Canada

© Mahdiyeh Seifaddini 2018

À mes parents

RÉSUMÉ

Le givrage atmosphérique a été la cause de beaucoup de dommages sur les réseaux de transport de l'énergie électrique. Le délestage naturel de la glace de câbles et de conducteurs a causé des pannes majeures sur ces réseaux. À titre d'exemple, on peut citer le « grand verglas » qui a frappé principalement Québec en 1998, causant des dommages considérables à la suite de l'accumulation et délestage de glace sur les lignes de haute tension. Pour éviter ou diminuer le risque d'occurrence de ce phénomène, il est nécessaire de connaître et de comprendre le comportement mécanique de la glace.

En tant qu'exemple fondamental du comportement de déformation de la glace, on a choisi le cas de la glace isotrope polycristalline dans cette étude. Cependant, l'obtention d'une structure isotrope avec le moins de porosité possible pourrait être un problème majeur. Dans ce contexte, trois méthodes pour fabriquer de la glace isotrope en laboratoire ont été développées et utilisées. Ensuite, les propriétés structurelles (physiques) de la glace, comme la porosité et le degré d'anisotropie, ont été étudiées à l'aide d'échantillons fabriqués par ces trois méthodes.

Par la suite, le comportement en déformation uniaxiale des échantillons obtenus à partir ces trois méthodes a été comparé et étudié. Après avoir choisi la méthode la plus appropriée de fabrication de l'échantillon, le comportement visqueux de la glace isotrope été analysé à partir d'essais de compression simples réalisés à différentes températures et vitesses de déformation axiale.

Les études existantes réalisées sur le phénomène de déformation de la glace ne considèrent pas l'existence d'une déformation inélastique (permanente) indépendante du temps, comme on le voit dans d'autres matériaux, comme les métaux. Afin d'étudier la présence de cette déformation et de déterminer les autres parties de déformation de fluage, des essais de fluage sous le chargement de compression uniaxiale constant et avec plusieurs temps de chargement et de déchargement ont été réalisés à des températures de -5, -10 et -15 °C. Par la suite et dans un premier temps, la présence de déformation plastique indépendante du temps a été étudiée et été identifiée à chaque température. Ensuite, les paramètres des autres composantes de la déformation (élastique, viscoélastique et fluage primaire) ont été déterminés en fonction de la température.

La contribution de chacune des composantes de la déformation (élastique, viscoélastique, plastique, fluage primaire et fluage secondaire)

dans la déformation totale a été déterminée en fonction du temps pour différentes valeurs de température et de contrainte appliquée.

Abstract

Atmospheric icing is at the source of damage to overhead transmission lines of power networks. Natural ice load shedding off cables and conductors has caused major power outages during ice storms in Canada, like the major one that mainly hit Quebec in 1998. This widespread damage was caused by ice accumulation on the power network overhead lines. To avoid or reduce the risk of occurrence of this phenomenon, it is necessary to know and understand the mechanical behavior of the ice.

As a fundamental subject on the deformation behavior of ice, the simple case of polycrystalline isotropic ice was chosen for this study. For this purpose, however, obtaining an isotropic structure with the least possible porosity could be a major problem. In this context, three methods for making isotropic ice on a laboratory scale have been developed and used. Then, the structural (physical) properties of the ice, such as the porosity and degree of anisotropy, were studied using samples made by these three methods.

Subsequently, the uniaxial deformation behavior of the samples obtained from these methods was compared and studied. By selecting the most appropriate method of sample preparation, the viscous behavior of isotropic ice was analyzed from simple compression tests performed at different temperatures and axial strain rates. Then, the secondary creep strain parameters were determined.

Existing studies on the ice deformation phenomenon do not consider an inelastic (permanent) strain with a time independent nature as seen in other materials such as metals. In order to investigate the presence of this strain and to determine the other creep strain parts, creep tests under constant uniaxial compression loading and with several loading and unloading times were carried out at temperatures of -5, -10 and -15 ° C. Subsequently, and in a first step, the presence of non-time-dependent plastic strain, which was identified at each temperature, was studied. Then, the parameters of the other strain components such as elastic, viscoelastic and primary creep were determined as a function of temperature.

The contribution of each of the elastic, viscoelastic, plastic, primary and secondary creep strains as a function of time in the total strain were determined for different values of temperature and applied stress.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 PROBLEMATIQUE	2
1.2 OBJECTIF GENERAL	3
1.3 OBJECTIFS SPECIFIQUES	4
1.4 ORIGINALITE	6
1.5 METHODOLOGIE.....	7
1.5.1 <i>Fabrication de la glace isotrope avec un degré minimum</i> <i>d'anisotropie et de porosité.....</i>	<i>7</i>
1.5.2 <i>Étude de la structure cristalline de la glace à l'aide du</i> <i>microtomographe à rayons X.....</i>	<i>7</i>
1.5.3 <i>Choix de la méthode de fabrication de la glace</i>	<i>8</i>
1.6 REALISATION DES ESSAIS MECANQUES	8
1.6.1 <i>Les essais de compression uniaxiale avec la vitesse de déformation</i> <i>constante</i>	<i>8</i>
1.6.1.1 <i>Les essais de compression uniaxiale avec la contrainte constante</i> <i>(fluage)</i>	<i>9</i>
1.7 DEVELOPPEMENT ET VALIDATION DU MODELE DE COMPORTEMENT DE CE MODELE...	9
1.7.1 <i>Détermination du fluage secondaire</i>	<i>9</i>
1.7.2 <i>Détermination de la déformation plastique instantanée.....</i>	<i>10</i>
1.7.3 <i>Identification du fluage primaire.....</i>	<i>10</i>

1.7.4	<i>Identification de la déformation de recouvrance</i>	11
1.8	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	11
1.9	ÉVALUATION DE LA CONTRIBUTION DES DEFORMATIONS	12
1.9.1	<i>Contribution des composantes de la déformation dans la déformation totale</i>	12
1.9.2	<i>Effet de la température sur la contribution des composantes de la déformation</i>	12
1.10	STRUCTURE DE LA THESE	13
CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE		15
2.1	LA STRUCTURE CRISTALLINE DE LA GLACE	16
2.2	LE GIVRAGE ATMOSPHERIQUE.....	19
2.2.1	<i>Précipitations givrantes</i>	19
2.2.2	<i>Nuages givrants</i>	21
2.3	DELESTAGE.....	23
2.3.1	<i>Délestage par fusion</i>	23
2.3.2	<i>Délestage par sublimation</i>	24
2.3.3	<i>Délestage par bris mécanique</i>	24
2.3.4	<i>Étude bibliographique sur les propriétés mécaniques de la glace</i> ..	25
2.4	LES MODELES DE CONTRAINTE/ DEFORMATION	27
2.5	CONCLUSION	50
CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE EXPERIMENTALE		52

3.1	ÉTUDE EXPERIMENTALE	53
3.1.1	<i>Fabrication de la glace</i>	53
3.1.2	<i>Méthode 1</i>	55
3.1.3	<i>Méthode 2</i>	56
3.1.1	<i>Méthode 3</i>	56
3.2	PREPARATION DES ECHANTILLONS	59
3.3	TOMOGRAPHIE A RAYONS-X	60
3.4	LES ESSAIS MECANIQUES.....	64
3.4.1	<i>Les essais de compression uniaxiale avec une vitesse de déformation constante</i>	65
3.4.2	<i>Les essais de compression uniaxiale avec une contrainte constante (fluage)</i>	66
 CHAPITRE 4 : PROPRIETES STRUCTURELLES ET COMPORTEMENT DE		
COMPRESSION SIMPLE DE LA GLACE ISOTROPE POLYCRISTALLINE		67
4.1	INTRODUCTION	68
4.2	RESULTATS ET DISCUSSION	69
4.2.1	<i>L'évaluation des paramètres physiques de la glace produite par différentes méthodes</i>	69
4.2.2	<i>L'évaluation du comportement mécanique de la glace fabriquée par différentes méthodes</i>	73

4.2.3 Effets de la température et de la vitesse de déformation sur le comportement mécanique	75
4.2.4 Détermination des paramètres de fluage secondaire	80
4.3 CONCLUSION	86

CHAPITRE 5 : DEVELOPPEMENT D'UN MODELE DE COMPORTEMENT DE DEFORMATION DE LA GLACE ISOTROPE.....88

5.1 INTRODUCTION	89
5.2 ÉTUDE EXPERIMENTALE	90
5.2.1 Les essais de fluage	90
5.3 LE MODELE DE COMPORTEMENT DEVELOPPE	94
5.3.1 Détermination de la déformation permanente	95
5.3.2 Détermination de la déformation plastique	96
5.3.3 Identification du fluage primaire.....	98
5.4 IDENTIFICATION DE LA DEFORMATION DE RECOUVRANCE.....	103
5.5 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	105
5.5.1 Effet de la température sur la déformation plastique.....	105
5.5.2 Variation des paramètres de fluage primaire en fonction de la température.....	106
5.5.3 Variation des paramètres de déformation viscoélastique en fonction de la température	108
5.6 CONTRIBUTION DES DEFORMATIONS.....	108

5.6.1 Contribution des différentes composantes de déformation dans la déformation totale	108
5.6.2 Effet de la température sur la contribution des déformations.....	111
5.7 VALIDATION DU MODELE DEVELOPPE	114
5.7.1 Déformation plastique instantané	114
5.7.2 Validation de fluage secondaire	118
5.8 CONCLUSION	119
CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	122
6.1 CONCLUSIONS	123
6.2 PERSPECTIVES	127
Références	129
Annexes	135

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2–1 : Propriétés physiques de la glace atmosphérique [6].	23
Tableau 2–2 : Les paramètres de modèle considéré par Aryanpour et Farzaneh [36].	50
Tableau 4–1 : Les résultats de la porosité pour les tests réalisés selon les trois méthodes.	71
Tableau 4–2 : Degré d'anisotropie des échantillons de glace produits par les différentes méthodes.	72
Tableau 4–3 : Valeurs des contraintes plateaux en fonction de la température et de la vitesse de déformation.	82
Tableau 4–4 : Les valeurs de n et B obtenus à partir de la Figure 4.7	83
Tableau 5–1 : Valeurs de la contrainte constante appliquée pour les essais de fluage.	91
Tableau 5–2 : Les valeurs de déformation permanente réelles.	96
Tableau 5–3 : Valeurs des déformations de fluage primaire et plastique.	97
Tableau 5–4 : Déformation plastique en fonction de la température.	98
Tableau 5–5 : Jeu de données créé pour déterminer les paramètres du fluage primaire à -10°C	102
Tableau 5–6 : Les paramètres M , N et K du fluage primaire pour chaque température.	102

Tableau 5–7 : Valeurs des déformations de recouvrance réelle.	103
Tableau 5–8 : Valeurs des déformations viscoélastiques.	104
Tableau 5–9 : Paramètre α_T pour chaque température.....	105
Tableau 5–10 : Constantes de la déformation viscoélastique en fonction de la température.....	105
Tableau 5–11 : Détermination de la déformation permanente dans les deux essais de validation.	115
Tableau 5–12 : Les valeurs des déformations de fluage primaire, secondaire, et plastique dans l’essais validation à température de -10°C.	117
Tableau 5–13 : les vitesses de déformation déterminée par l’essais de fluage et la loi de Glen.....	119

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Structure hexagonale de la glace I_h ; les atomes représentés sont uniquement les atomes d'oxygène de H_2O [5].	17
Figure 2.2 : Structure cristalline de la glace granulaire [7].	18
Figure 2.3 : Structures cristallines de la glace colonnaire a) S_1 , b) S_2 , c) S_3 [7].	19
Figure 2.4 : Formation des différents types de la glace atmosphérique en fonction de vitesse du vent et de la température [6].	22
Figure 2.5 : Influence de la température sur le module de Young (E), le module de cisaillement (G) et le coefficient de Poisson (μ) pour la glace granulaire; T_m est la température du point de fusion [7].	26
Figure 2.6 : Déformation élastique, élasticité retardée, viscoplastique et totale selon le modèle de Sinha avec une vitesse de contrainte constante d'une valeur de $7,8 * 10^{-2} MPas^{-1}$ [2].	30
Figure 2.7: Orientation du plan de base par rapport à l'axe C [21].	33
Figure 2.8 : a) Effet de l'exposant de contrainte (n), b) Effet de la densité initiale des dislocations (ρ_0), c) Effet du taux de multiplication de dislocation (α) et d) Effet de l'exposant de déformation inélastique (m) sur la courbe contrainte-déformation [21].	35
Figure 2.9 : Les étapes de fluage pour un sol gelé [33].	41
Figure 2.10 : Le fluage d'un sol gelé avec plusieurs niveaux de contraintes [33].	42

Figure 2.11: Structure du modèle conceptuel de fluage pour le sol gelé [33].	44
Figure 2.12 : Modèle élasto-viscoplastique proposé par Yong et al [35]	46
Figure 3.1 : Le montage utilisé pour préparer de l'eau dégazée.	54
Figure 3.2 : Les différentes étapes de préparation de glace isotrope par la méthode 1.	55
Figure 3.3 : Cylindre transparent en plastique utilisé pour mouler le mélange de glace et d'eau avec la méthode 2.	57
Figure 3.4 : Remplissage d'un moule cylindrique avec des particules de glace selon la méthode 2.	58
Figure 3.5 : a) Remplissage du moule cylindrique contenant de la glace avec de l'eau b) Solidification directionnelle du mélange de glace et d'eau à -10 °C.	58
Figure 3.6: Découpage du grand bloc de glace et préparation des échantillons cylindriques.	60
Figure 3.7 : Skyscan 1172 utilisé pour l'évaluation des propriétés structurelles d'un matériau.	63
Figure 3.8 : Schéma de la technique de projection par Skyscan : a) projections parallèles d'un objet à différentes hauteurs; b) rotation de l'objet pour avoir des projections dans différents angles [1].	64
Figure 3.9 : a) Échantillon de glace isotrope b) La machine MTS-810.	66
Figure 4.1 : Résultats typiques obtenus avec Skyscan1172.	70

Figure 4.2 : Variation de la porosité (%) pour les échantillons des trois procédés de fabrication.....	71
Figure 4.3 : Valeurs mesurées et valeurs moyennes du degré d'anisotropie.	73
Figure 4.4 : Résultat de l'essai de compression simple, à -10 ° C et vitesse de déformation 1E-5 (1/ s) sur des échantillons à partir de différentes méthodes.	74
Figure 4.5 : Les courbes de contrainte-déformation obtenues à différentes températures pour une vitesse de déformation axiale fixe.	78
Figure 4.6 : Les courbes de contrainte-déformation obtenues à différentes vitesses de déformation pour une température fixe.	79
Figure 4.7 : Variation de $Ln\varepsilon$ versus $Ln\sigma$	84
Figure 4.8 : Variation de B (a) et de n (b) en fonction de la température pour la glace isotrope.	85
Figure 5.1: Les résultats des essais de fluage à -5°C.	92
Figure 5.2: Les résultats des essais de fluage à -10°C.	92
Figure 5.3: Les résultats des essais de fluage à -15°C.	93
Figure 5.4: Droites de régression linéaire passant sur des résultats de déformation de fluage primaire : a) -5°C, b) -10°C, c) -15°C.....	100
Figure 5.5 : Valeurs de déformation plastique en fonction de la température.	106
Figure 5.6 : Variation des paramètres M , N et K identifiant le fluage primaire en fonction de la température.	107

Figure 5.7: Contribution des composantes de la déformation en fonction du temps à des température a) -5°C b) -10°C, c) -15°C.	111
Figure 5.8 : Contribution de plusieurs composantes de déformation en fonction de la température a) Fluage primaire b) Fluage secondaire c) plastique.	113
Figure 5.9 : Les valeurs des contraintes pour chaque huit secondes de chargement pour déterminer les déformations de fluage primaire et secondaire.	116
Figure 5.10 : Validation de la déformation plastique à -10°C.	117

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée dans les laboratoires du Pavillon de recherche sur le givrage de l'Université du Québec à Chicoutimi.

Je souhaite remercier tout d'abord professeur Masoud Farzaneh, mon directeur de thèse, qui m'a dirigée dans ce travail de recherche. Ses connaissances, ses conseils avisés, et ses grandes qualités humaines m'ont permis de mener à bien ce projet.

Je tiens également à remercier le professeur Gholamreza Aryanpour, co-directeur de ma thèse, pour son soutien et ses conseils judicieux tout au long de ce travail.

Je remercie également le professeur Fouad Erchiqui, mon co-directeur, pour son soutien au cours de cette période.

Mes remerciements vont aussi à personnel du laboratoire CIGELE/INGIVRE, MM. Pierre Camirand, Denis Masson, Claude D'Amours et Xavier Bouchard pour leur aide et leur disponibilité.

Je remercie également tous les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

J'adresse un grand merci au Dr. Zahira Ghalmi, à Mme Marie-Lucia Yapi, et au Dr. Hicham Farid, pour leur amitié qui m'est chère et pour les bons moments partagés ensemble.

J'adresse mes remerciements à mes parents, mes sœurs, mes frères qui sont précieux pour moi. Je les remercie pour leur soutien constant et leur amour indéfectible.

Je tiens particulièrement à remercier mon conjoint, Ali, pour me soutenir indéfectiblement, malgré les hauts et les bas de ces années de travail.

Et enfin, merci à mes enfants, Farzan et Farina, pour me manifester autant d'enthousiasme, car ils ont été un grand atout pour moi.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Problématique

Le phénomène du givrage sur les conducteurs et les lignes de transport de l'énergie électrique est un problème majeur pour la distribution de cette énergie dans les régions au climat froid. Dans ces régions, la glace est présente sous diverses formes pendant au moins la moitié de l'année. La fragilité de la glace pourrait être sa propriété la plus importante et la plus cruciale qui pourrait conduire à des accidents dangereux dans les régions urbaines, sur les routes, et avec des équipements tels que les lignes électriques, les navires, etc. Un autre problème concerne des aspects du comportement de déformation de la glace qui peuvent devenir importants à des températures relativement élevées, à proximité du point de fusion. Ces exemples sont d'actualité dans l'industrie et les universités qui doivent effectuer des recherches sur la glace et ses diverses propriétés.

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette recherche est de développer un modèle de comportement uniaxial pour la glace isotrope en compression. Parmi les différents travaux que l'on peut effectuer sur la glace et ses propriétés, l'étude de son comportement mécanique en déformation est un sujet important. Néanmoins, les études existantes réalisées pour identifier le phénomène de déformation de la glace ne considèrent pas une déformation inélastique permanente avec une nature indépendante du temps

comme on le voit dans d'autres matériaux comme les métaux. La présence de cette déformation a été étudiée dans un premier temps.

Donc en faisant une distinction entre les déformations inélastiques dépendant du temps (visqueuse) et indépendantes du temps (plastique), un modèle de déformation non-unifié est proposé pour le chargement uniaxial. Dans ce modèle, la déformation inélastique, quelle qu'elle soit, procède de deux mécanismes, l'un dépendant du temps et l'autre indépendant du temps. L'importance relative de chaque type de déformation détermine si le processus dépend du temps ou non.

Dans un deuxième temps, on a étudié les autres composantes de déformation comme la déformation élastique, viscoélastique et viscoplastique de la glace en fonction de la température.

La contribution de chacune des composantes de la déformation (élastique, viscoélastique, plastique, fluage primaire et secondaire) en fonction du temps dans la déformation totale a été déterminée.

1.2 Objectif général.

En vue de faire avancer les connaissances scientifiques sur le comportement mécanique de la glace dans le domaine du givrage atmosphérique, l'objectif général de cette thèse a été de développer un modèle de comportement uniaxial pour la glace isotrope, en compression.

Dans le développement de ce modèle, nous avons cherché à identifier plusieurs composantes de la déformation liée au fluage de la glace en présence d'une déformation plastique non dépendante du temps.

1.3 Objectifs spécifiques

Pour parvenir à cet objectif général, il faut réaliser les objectifs spécifiques suivants :

- Comparaison des méthodes de fabrication de la glace pour arriver à une meilleure glace isotrope : pour obtenir une bonne glace isotrope, des méthodes de fabrication ont été effectuées en utilisant divers instruments. L'inspection de la glace a été faite au moyen d'un instrument approprié afin de valider son degré de l'isotropie.
- Étude de la structure de la glace et des paramètres physiques, comme la porosité et le degré d'anisotropie : une fois la glace fabriquée en laboratoire, plusieurs paramètres physiques ont été déterminés. Les propriétés physiques telles que la porosité et le degré d'anisotropie ont été analysés par Skyscan 1172.
- Détermination des paramètres de fluage secondaire : des échantillons de la glace isotrope obtenue a été soumis à plusieurs tests de compression à l'aide d'une machine MTS-810 placée dans une chambre froide à température contrôlable.

- Détermination des effets de plusieurs paramètres comme la vitesse de déformation et la température sur le comportement mécanique de la glace : La glace est souvent soumise à plusieurs contraintes. Dans ce contexte, la variation de la vitesse de déformation ainsi que la température ont été choisies pour valider leur impact sur le comportement mécanique de la glace. Signalons que les tests relatifs à cet objectif ont été effectués avec la machine MTS-810.

Lors des tests de fluage sous contraintes constantes et à diverses température (-5°C , -10°C et -15°C), utilisant la même machine MTS-810, on a tenu comptes des paramètres cités ci-dessous :

- Étude de la présence et identification de déformation plastique non dépendante du temps sous chargement uniaxial en fonction de la température.
- Précision et identification du comportement visqueux du matériau; il s'agit de viscoélasticité et de fluage secondaire.
- Précision et identification du comportement du type fluage primaire;
- Détermination de la contribution de chaque composante de déformation dans la déformation totale.
- Évaluation des effets de la température sur la contribution de chaque composante de déformation dans la déformation permanente.

1.4 Originalité

Plusieurs travaux relatifs au comportement mécanique de la glace ont investigué la déformation de la glace. Cependant, une revue de littérature exhaustive dans le domaine du comportement de la glace montre que la déformation plastique instantanée n'a pas été prise en considération. Dans ce contexte, la présente étude vise à étudier la déformation plastique instantanée (permanente) de la glace, qui est indépendante du temps. D'autres aspects liés au comportement mécanique de la glace ont été abordés et sont présentés ci-dessous :

- ❖ L'impact de la température sur la déformation plastique est un point primordial dont il faut tenir compte. Pour cela, ce facteur a été étudié expérimentalement afin de valider son impact sur la déformation de la glace.
- ❖ L'évaluation des effets de la température sur chacune des composantes de déformation dans la déformation totale est aussi un aspect qui a été abordé dans la présente recherche.
- ❖ L'évaluation de l'effet du temps de chargement sur chacune des composantes de déformation a également été analysée dans cette étude.

L'utilisation d'un Microtomographe à rayon X (SKYSCAN 1172) nous a permis de déterminer avec une haute précision plusieurs paramètres de la glace, dont la porosité et le degré d'anisotropie.

1.5 Méthodologie

1.5.1 Fabrication de la glace isotrope avec un degré minimum d'anisotropie et de porosité

L'objectif principal de la thèse est de développer un modèle de comportement en déformation pour la glace isotrope avec la porosité et le degré d'anisotropie minimum. Ainsi, étant donné que la structure de la glace est fortement dépendante du procédé de fabrication de l'échantillon et des paramètres de contrôle, plusieurs méthodes de fabrication de la glace doivent mis en place pour arriver à obtenir une glace avec ces deux caractéristiques i.e. porosité et le degré d'anisotropie minimum.

1.5.2 Étude de la structure cristalline de la glace à l'aide du microtomographe à rayons X

Un microtomographe à rayons X (SkyScan) de très grande précision a été utilisé pour caractériser la microstructure de la glace [1]. Ce système permet l'obtention d'un ensemble d'images de l'objet avec plusieurs vues

angulaires (l'objet à analyser tourne de 0° à 360°). Ensuite, une représentation 3D de l'objet réel est reproduite à partir des images obtenues pour l'analyse de la microstructure interne du matériau.

À l'aide de cet appareil, on a déterminé les paramètres de porosité et le degré d'anisotropie des échantillons de glace.

1.5.3 Choix de la méthode de fabrication de la glace

En analysant les résultats de la porosité et le degré d'anisotropie mesurés sur plusieurs échantillons fabriqués selon chaque méthode de fabrication de la glace, les valeurs moyennes et l'écart type de ces paramètres ont été calculées. En analysant ces valeurs, on a déterminé la méthode de fabrication qui offre la plus petite valeur moyenne de la porosité et le degré d'anisotropie pour la réalisation des essais et le choix du modèle de comportement de la glace.

1.6 Réalisation des essais mécaniques

1.6.1 Les essais de compression uniaxiale avec la vitesse de déformation constante

Des essais mécaniques du type compression uniaxiale ont été réalisés à l'aide de la machine MTS-810. Ces essais ont été réalisés dans le cas de

plusieurs taux de déformation constants et avec des températures allant de -15 à -5°C.

1.6.1.1 Les essais de compression uniaxiale avec la contrainte constante (fluage)

Afin d'étudier l'existence de déformation plastique instantanée dans la glace et de déterminer les autres composantes de déformation liées à des contraintes, des essais de fluage sous chargement de compression uniaxiale constant, avec plusieurs temps de chargement et de déchargement, ont été réalisés à des températures de -5, -10 et -15 °C.

1.7 Développement et validation du modèle de comportement de ce modèle

1.7.1 Détermination du fluage secondaire

Après le choix de la méthode de fabrication de la glace avec un minimum de porosité et d'anisotropie, on a procédé à des essais de compression simple pour déterminer le fluage secondaire (ou fluage stationnaire) qui se produit sur une période relativement longue et qui est caractérisé par une vitesse de déformation axiale minimale et constante. Ainsi, pour obtenir un fluage secondaire à vitesse de déformation constante

dans un essai uniaxial, il faut que la contrainte axiale soit constante. La loi de puissance de Glen a été utilisée pour identifier ce type de déformation.

1.7.2 Détermination de la déformation plastique instantanée

En utilisant les résultats des essais de fluage sous chargement constant, la déformation plastique non dépendante du temps a été étudiée pour chaque température.

1.7.3 Identification du fluage primaire

La déformation permanente est considérée comme la somme des déformations dues au fluage secondaire, au fluage primaire et de la déformation plastique. La déformation liée au fluage primaire obtenue en soustrayant la somme de la déformation plastique et de celle du fluage secondaire de la déformation permanente mesurée, pour chaque température. Finalement, après avoir choisi un modèle approprié parmi ceux utilisés dans la littérature pour la détermination de la déformation due au fluage primaire, les paramètres de ce modèle ont été identifiés en fonction de la température.

1.7.4 Identification de la déformation de recouvrance

Pour chaque essai de fluage réalisé, la somme de déformations élastiques et viscoélastiques est la déformation de recouvrance. À chaque température et chaque temps de chargement, ces valeurs ont été mesurées au laboratoire. Pour calculer la déformation élastique, la loi de Hooke (σ/E) a été utilisée.

Pour identifier la déformation viscoélastique ou élastique retardée, le modèle proposé par Sinha [2] a été utilisé.

1.8 Interprétation des résultats

Connaissant la déformation plastique instantanée, l'effet de la température sur ce paramètre a été déterminé. Également, la variation des paramètres de fluage primaire en fonction de la température a été analysée et interprétée, de même que l'effet de la température sur des paramètres de déformation viscoélastique.

1.9 Évaluation de la contribution des déformations

1.9.1 Contribution des composantes de la déformation dans la déformation totale

Afin de déterminer la contribution de chaque composante de la déformation en fonction du temps, les paramètres impliqués pour les composantes (déformation viscoélastique, fluage primaire, secondaire) ont été déterminés. Pour déterminer la contribution de chaque composante, la variation de la déformation en fonction du temps pour différentes températures a été calculée. Par la suite ces valeurs ont été divisées par la valeur totale de la déformation déterminée à partir des essais de fluage.

1.9.2 Effet de la température sur la contribution des composantes de la déformation

Un élément novateur de la thèse a été d'évaluer l'effet de la température sur la contribution des composantes de la déformation permanente dans le processus de fluage (primaire, secondaire et plastique instantané).

1.10 Structure de la thèse

Le chapitre 2 présente une revue de la littérature, portant d'abord sur la déformation de la glace, et ensuite sur les modèles de comportement de la glace et des matériaux similaires.

Au chapitre 3, on trouve la méthodologie expérimentale de la thèse comprenant les trois méthodes de fabrication de la glace ainsi que la méthodologie de réalisation des essais mécaniques.

Dans le chapitre 4, on présente d'abord les propriétés structurelles (physiques) de la glace, comme la porosité et le degré d'anisotropie, pour les échantillons fabriqués par trois méthodes. Ensuite, on choisit la méthode la plus appropriée de fabrication de l'échantillon en étudiant le comportement en déformation uniaxiale des échantillons obtenus à partir de ces trois méthodes. Finalement, à partir d'échantillons produits par la méthode choisie, on analyse le comportement visqueux de la glace isotrope avec des essais de compression simple réalisés à différentes températures et vitesses de déformation axiale.

Dans le chapitre 5, on étudie la déformation plastique instantanée de la glace sous compression de même que les autres composantes de la déformation, comme la déformation viscoélastique et viscoplastique. À cette

fin, on a effectué des essais de fluage sous chargement de compression uniaxiale constant et avec plusieurs temps de chargement et de déchargement à des températures de -5, -10 et -15 °C. Plus précisément et dans un premier temps, la déformation plastique non dépendante du temps est étudiée. Ensuite, les paramètres des autres composantes de la déformation, c'est-à-dire la déformation viscoélastique, ainsi que le fluage primaire, sont déterminés en fonction de la température.

Finalement, la contribution de chacune des composantes de la déformation i.e., élastique, viscoélastique, plastique, fluage primaire et secondaire en fonction du temps dans la déformation totale, est déterminée.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 La structure cristalline de la glace

L'eau, dont la formule chimique est H_2O , existe sous trois formes (vapeur, liquide et solide) joue un rôle essentiel dans l'équilibre de notre planète. La structure de la molécule d'eau est l'une des plus simples de la chimie, mais les caractéristiques physiques de l'eau liquide et des différentes glaces sont complexes et singulières. Selon les conditions de température et de pression auxquelles l'eau est soumise, il existe un grand nombre de formes de glace dont on peut distinguer dix formes cristallines différentes et au moins deux formes amorphes [3]. Cependant, la plupart de ces structures ne sont stables que sous très forte pression (> 100 ou 200 MPa) ou à très basse température. Dans les conditions de pression atmosphérique, seules deux formes cristallines, cubiques (I_c) et hexagonale (I_h) peuvent exister. La glace cubique est une forme métastable sous des conditions atmosphériques. Cette forme n'a été observée qu'expérimentalement et peut être obtenue par condensation de vapeur d'eau entre 135 K et 195 K environ [4].

Pour la glace I_h , le plan de base est le plan de plus forte densité d'atomes d'oxygène; son axe de symétrie, perpendiculaire à ce plan, est appelé axe C [5] (Figure 2.1).

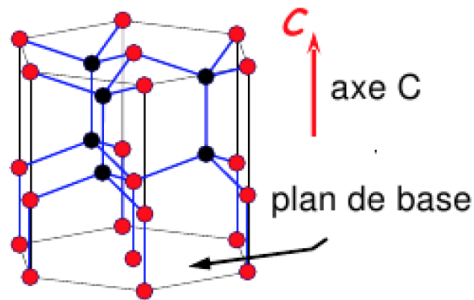


Figure 2.1 : Structure hexagonale de la glace I_h ; les atomes représentés sont uniquement les atomes d'oxygène de H_2O [5].

Selon la texture de la glace I_h , deux types de glace ont été signalés, granulaire et colonnaire [6] chacun divisé en quelques subdivisions. Ce terme (texture), représente les orientations d'axe C (axe qui définit l'orientation de la maille hexagonale de l'arrangement monocristallin de la glace) à l'intérieur des cristaux de la glace. Les axes C dans la glace granulaire sont orientés de façon aléatoire (Figure 2.2), ce qui donne lieu à un comportement mécanique isotrope, indépendamment de l'anisotropie du monocristal de la glace.

La glace granulaire se retrouve dans les couvertures de glace des rivières, des lacs ou des océans, et généralement dans les parties supérieures des glaciers. Les grains peuvent être arrondis ou anguleux (Figure 2.2).

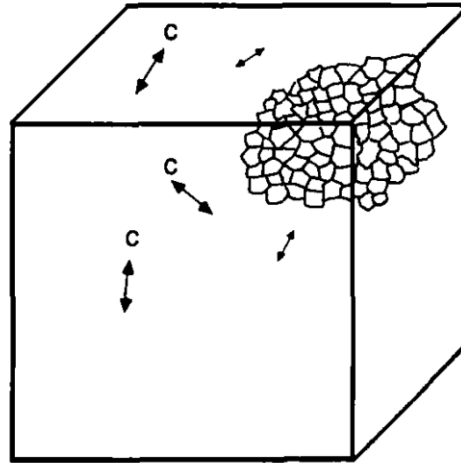


Figure 2.2 : Structure cristalline de la glace granulaire [7].

Pour la glace colonnaire, les grains croissent dans une forme colonnaire, donnant ainsi le nom à ce type de glace. Trois types majeurs sont distingués : S_1 , S_2 et S_3 . Chaque type de glace colonnaire se distingue par l'orientation des colonnes par rapport à l'axe C (Figure 2.3). Pour la glace de type S_1 , l'orientation cristallographique de l'axe C est parallèle à la direction colonnaire. L'orientation cristallographique de l'axe C dans la glace de type S_2 est perpendiculaire à la direction des colonnes. Enfin, pour la glace de type S_3 , l'axe C est orienté avec un certain angle dans le plan perpendiculaire à l'axe des colonnes. Donc les glaces S_1 et S_2 peuvent être considérées comme un matériau isotrope transverse, tandis que la glace S_3 appartient à la famille des matériaux orthotropes [7].

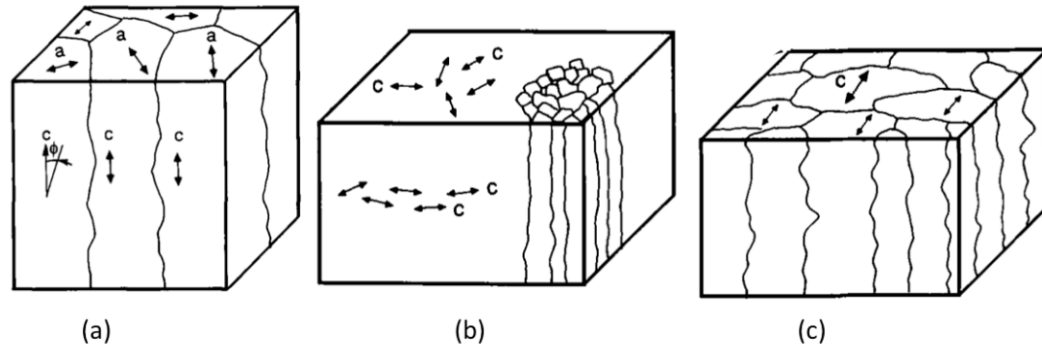


Figure 2.3 : Structures cristallines de la glace colonnaire a) S_1 , b) S_2 , c) S_3 [7].

2.2 Le givrage atmosphérique

Les types les plus fréquents de la glace atmosphérique qui se dépose sur les lignes de transport d'énergie électrique sont des précipitations givrantes ou des nuages givrants, chaque type ayant une texture différente. Selon des températures de dépôt de haut en bas, Miche et Ramseier (1971) ont classifié cette texture en quatre grandes catégories [6].

2.2.1 Précipitations givrantes

Les précipitations givrantes, selon l'influence des variations de température près du sol et à quelques centaines de mètres du sol, peuvent causer du verglas, de la neige mouillée ou de la neige sèche [8].

Verglas

Le verglas est un dépôt de glace transparente, lisse et sans bulles d'air. Il se forme à partir de précipitations verglaçantes, de pluie ou de bruine, ou encore des nuages avec une grande teneur en eau liquide et des gouttelettes de grande taille [8]. Il se forme lorsque les grosses gouttelettes de l'eau ont suffisamment de temps pour s'étaler sur une surface froide avant de geler. Normalement, la température de l'air (T_a) et la température de surface du dépôt (T_s) sont supérieures à $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivement. Il est dans la famille de la glace colonnaire, de type S_2 dans des conditions très humide, et de type S_1 dans la transition du régime humide au régime sec. Le verglas a une masse volumique très proche de la glace pure, soit environ 917 kg/m^3 [8].

Neige sèche

La neige sèche s'accumule à des températures inférieures à zéro, mais uniquement lorsque la vitesse du vent est très faible. La masse volumique de la neige sèche est, en général, très faible et ne dépasse pas 100 kg/m^3 [8].

Neige mouillée

La neige mouillée est généralement définie comme celle qui tombe à des températures égales ou supérieures à -5°C , avec une masse volumique de $300\text{-}800\text{ kg/m}^3$. Ce type de neige est assez collant et s'accumule rapidement [8].

2.2.2 Nuages givrants

Normalement, un nuage givrant ne se forme que dans des nuages constitués de gouttelettes surfondues, qui sont des gouttelettes qui restent liquides à une température inférieure à 0 °C. Les nuages givrants, selon leur teneur en eau, la température et la vitesse de vent, ainsi que la distribution de la taille des gouttelettes dans le nuage, produisent du givre dur ou du givre mou. L'intensité et la durée de givrage dans les nuages dépend du flux de l'eau liquide dans le nuage, qui dépend encore une fois de nombreux paramètres tels que la température, la vitesse du vent, la stabilité et la profondeur de nuage, la hauteur au-dessus de la base des nuages et de la distance de la côte [8].

Givre dur

Le givre dur pousse dans une structure en couche de glace claire et mélangée avec des bulles d'air. Le dépôt de ce type de glace est opaque et transparent avec une structure colonnaire et une masse volumique comprise entre 700 et 900 kg/m³. Lorsque la température du dépôt diminue, l'orientation de l'axe C dans la direction colonnaire préférentielle devient orientée aléatoirement (givre mou) [6, 8].

Givre mou

Le givre mou a une structure granulaire qui dépend de la vitesse de congélation des gouttes individuelles, chaque goutte gelant complètement avant qu'une autre ne touche la surface. Le givre mou se développe dans une structure blanche et opaque avec de nombreuses bulles d'air. Sa masse volumique est basse, aux environs de 600 kg/m^3 [8]. La Figure 2.4 montre les limites approximatives de la transition du givre mou, du givre dur et du verglas.

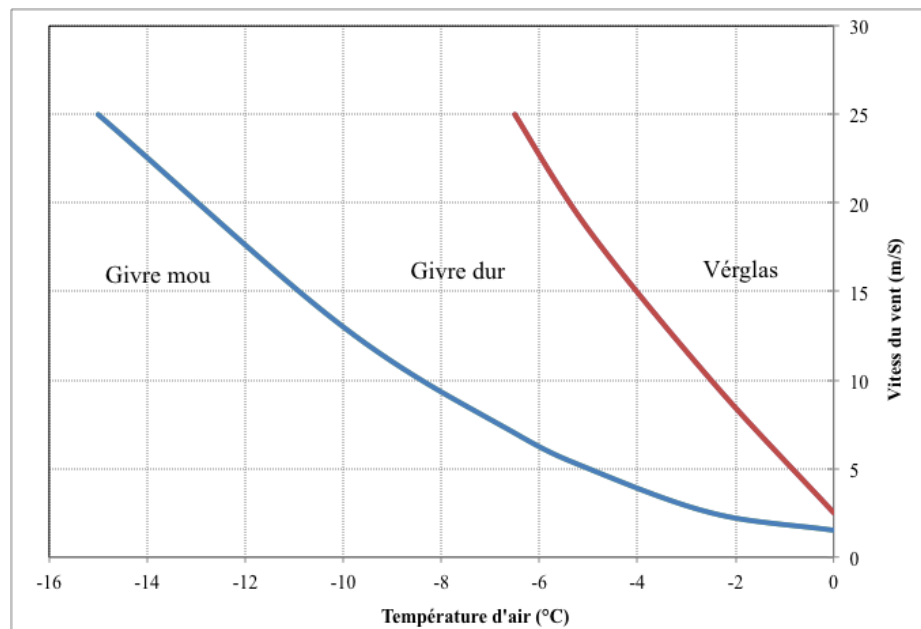


Figure 2.4 : Formation des différents types de la glace atmosphérique en fonction de vitesse du vent et de la température [6].

Dans le Tableau 2–1 on voit les différences entre les paramètres physiques des différents types de glace.

Tableau 2–1 : Propriétés physiques de la glace atmosphérique [6].

Type de glace	Masse volumique (Kg/m ³)	Adhésion	Couleur (apparence)	Cohésion
Verglas	900-920	Forte	Transparente	Forte
Neige mouillée	300-800	Moyenne	Blanche	Moyenne à forte
Neige sèche	100	Faible	Blanche	Faible
Givre dur	700-900	Forte	Opaque à transparente	Très forte
Givre mou	300-600	Moyenne	Blanche	Faible à moyenne

2.3 Délestage

Le délestage est la chute soudaine de dépôts de glace sur des câbles électriques et qui peut se produire suite à des mécanismes physiques comme la fusion, la sublimation ou des bris mécanique de la glace [3].

2.3.1 Délestage par fusion

La fonte de la glace sur les lignes électriques se produit lorsque la température de l'air est égale ou supérieure à 0 °C. Le délestage par fusion

comprend deux phases. La première phase est la fonte de dépôts de glace avec un faible taux relatif de réduction de la masse de glace et la deuxième phase est la chute des morceaux de glace sous l'effet de la gravité et du vent. Ce type de délestage est influencé par plusieurs paramètres comme la vitesse du vent, le rayonnement solaire, etc. [3, 9].

2.3.2 Délestage par sublimation

La définition de la sublimation en physique est le passage direct d'une matière de la phase solide à la phase gazeuse [10].

Les plus importants facteurs atmosphériques qui affectent ce type de délestage sont l'humidité relative, la température et la vitesse du vent [11].

2.3.3 Délestage par bris mécanique

Le délestage par bris mécanique se produit à des températures inférieures à 0 °C. Ce type de délestage peut être dû à la faible adhésion entre la glace et le câble. Ce problème dépend du type de chargement que subit le dépôt de glace comme une charge statique (torsion, compression, traction), dynamique (galop, fatigue), ou autres [11].

Dans le cadre de cette thèse, seule le délestage par bris mécanique sera considéré. Pour cela, il faut connaître le comportement mécanique de la

glace qui est un facteur déterminant dans l'étude de son comportement fragile et de sa déformation, à la source du délestage.

2.3.4 Étude bibliographique sur les propriétés mécaniques de la glace

Plusieurs chercheurs ont essayé de déterminer les paramètres mécaniques de la glace. Dantl, en 1969 [12] a étudié le module d'élasticité de la glace. Pounder et Langleben, en 1963 [13], et aussi Markham, en 1962 [14], ont déterminé les paramètres élastiques de la glace et les relations entre ces paramètres. Nakaya, en 1959 [15], a déterminé la propriété viscoélastique de la glace. Le travail le plus cité dans la littérature est celui de Sinha, en 1989 [7], qui a étudié les paramètres élastiques des différents types de glace (granulaire, S_1 , S_2 , S_3). Ces analyses fournissent une base sur laquelle les valeurs mesurées du module d'élasticité de différents types de glace peuvent être comparées. Son travail fournit également trois relations pour le module d'élasticité, le module de cisaillement et le coefficient de Poisson (Figure 2.5).

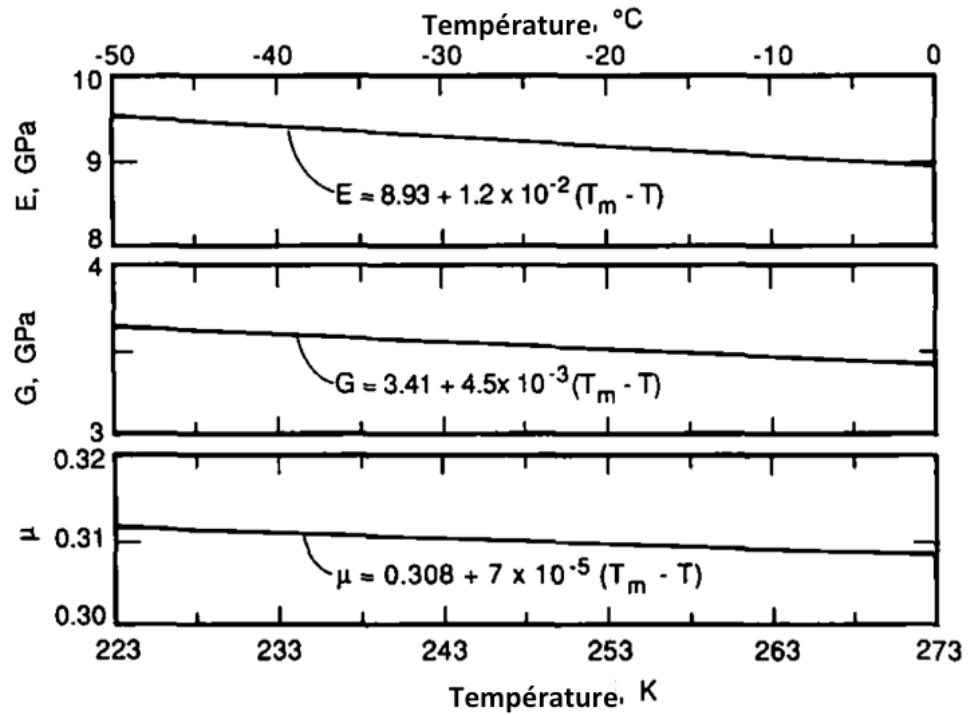


Figure 2.5 : Influence de la température sur le module de Young (E), le module de cisaillement (G) et le coefficient de Poisson (μ) pour la glace granulaire; T_m est la température du point de fusion [7].

Petrovic, en 2003 [5], a étudié les propriétés mécaniques de la glace en compression et en traction. Il a trouvé que la résistance à la traction de la glace varie de 0,7 à 3,1 MPa et que la résistance à la compression varie de 5 à 25 MPa dans la plage de température de -10 °C à -20 °C. La résistance à la compression de la glace augmente avec la diminution de la température et l'augmentation de la vitesse de déformation, mais la résistance à la traction de la glace est relativement insensible à ces variables. La résistance à la

traction de la glace diminue avec l'augmentation de la taille des grains de glace.

On peut ajouter à ces travaux ceux de Kermani [3], [16] et de Mohamed [17]. Kermani a étudié la problématique générale du délestage de la glace. Il a notamment travaillé sur le comportement de la glace atmosphérique en flexion, en compression et en fatigue. Mohamed et Farzaneh [17] ont déterminé les paramètres mécaniques sans présenter de loi de comportement pour ce type de glace. En fait, ils ont étudié les propriétés mécaniques de la glace atmosphérique sous traction uniaxiale, sous différentes conditions de température, de vitesse de vent et de taux de déformation.

2.4 Les modèles de contrainte/ déformation

Concernant les modèles de comportement de la glace, il existe peu de travaux dans la littérature à ce sujet. Les travaux les plus cités dans ce domaine sont ceux de Sinha ([2], [18], [19]). Selon lui, la déformation en fluage de la glace consiste en trois parties, une déformation élastique instantanée (ε_e), une déformation retardée de type viscoélastique (ε_{ve}) et une déformation viscoplastique ou permanente (ε_{vp}). (Équation 2.1)

$$\varepsilon_{totale} = \varepsilon_e + \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp} \quad 2-1$$

Précisons que la déformation retardée est d'origine élastique, mais avec une réaction retardée. La valeur de cette déformation est environ 40% de la déformation instantanée [2].

De même, Sinha a développé la courbe contrainte-déformation liée au fluage et a incorporé les effets de la taille des grains dans les trois composantes de déformation mentionnées ci-dessus [2], [19]. Les trois composantes de déformation mentionnée dans l'équation 2.1 sont développés dans les équations 2.2 à 2.4 ci-dessous.

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E} \quad 2-2$$

$$\varepsilon_{ve} = c_1 \left(\frac{d_1}{d}\right) \left(\frac{\sigma}{E}\right)^s \{1 - \exp[-(a_T t)^b]\} \quad 2-3$$

$$\varepsilon_{vp} = \dot{\varepsilon}_{v1} \left(\frac{\sigma}{\sigma^1}\right)^n t \quad 2-4$$

Où σ est la contrainte appliquée, E est le module de Young, $\dot{\varepsilon}_{v1}$ est le taux de déformation visqueuse pour la contrainte unitaire, d_1 et σ^1 sont les valeurs unitaires de diamètre et de contrainte respectivement. b et c_1 sont des

constantes, n est l'exposant de contrainte pour l'écoulement visqueux et s est l'exposant de contrainte de l'élasticité retardée. La constante a_T est le facteur qui varie avec la température selon l'équation 2.5 :

$$a_T = \exp \left[-\left(\frac{Q}{RT} + d \right) \right] \quad 2-5$$

Pour prédire la courbe contrainte-déformation, Sinha a modifié les équations 2.2 à 2.4 en considérant des intervalles de temps égaux (Δt) et en considérant l'augmentation de la contrainte $\Delta \sigma_i$ dans chaque intervalle de temps. Donc, si on applique N contraintes $\Delta \sigma_i$, les déformations élastiques, élastiques retardées et viscoplastiques seront calculées selon les équations 2.6, 2.7 et 2.8.

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta \sigma_1}{E} + \frac{\Delta \sigma_2}{E} + \dots + \frac{\Delta \sigma_{N+1}}{E} = \frac{1}{E} \sum_{i=1}^{N+1} \Delta \sigma_i \quad 2-6$$

$$\varepsilon_{ve} = \frac{c_1}{E} \left(\frac{d_1}{d} \right) \sum_{i=1}^{N+1} \Delta \sigma_i \{ 1 - \exp[-(a_T[N + 1 - i]\Delta t)^b] \} \quad 2-7$$

$$\varepsilon_{vp} = \dot{\varepsilon}_{v1} \Delta t \left[\left(\frac{\Delta \sigma_1}{\sigma_1} \right)^n + \left(\frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2}{\sigma_1} \right)^n + \dots + \left(\frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \dots + \Delta \sigma_N}{\sigma_1} \right)^n \right] = \dot{\varepsilon}_{v1} \Delta t \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\sigma_1} \sum_{j=1}^i \Delta \sigma_j \right)^n \quad 2-8$$

À titre d'exemple dans un essai de compression avec une vitesse de contrainte constante d'une valeur de $7,8 \times 10^{-2} \text{ MPa.s}^{-1}$, les résultats des trois composantes de déformation dans les équations 2.6 à 2.8 et la déformation totale sont présentés à la Figure 2.6 [2].

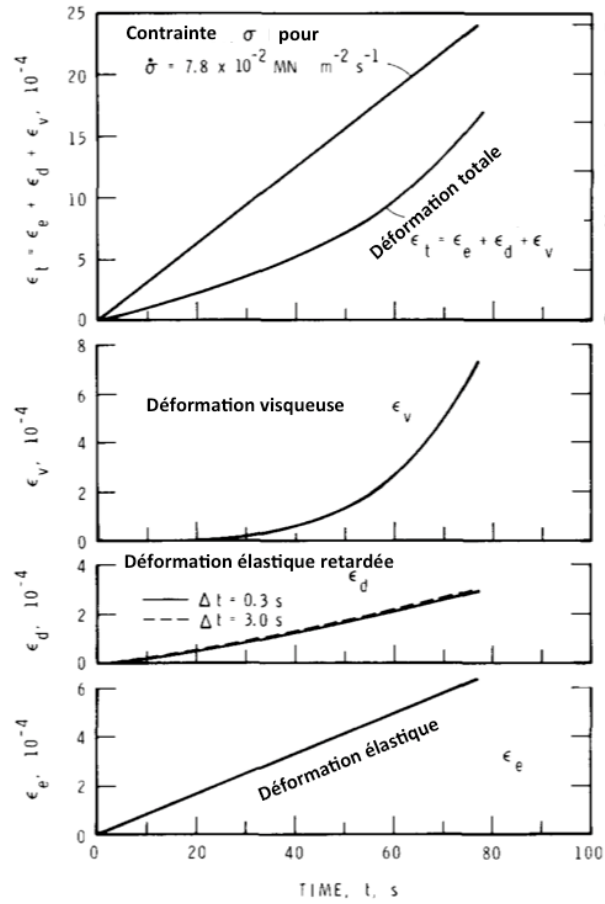


Figure 2.6 : Déformation élastique, élasticité retardée, viscoplastique et totale selon le modèle de Sinha avec une vitesse de contrainte constante d'une valeur de $7,8 \times 10^{-2} \text{ MPas}^{-1}$ [2].

Ashby et Duval (1985) [20], ont proposé une modification de l'expression de la déformation retardée (ε_{ve} ou ε_d) initialement proposée donnée originellement par Sinha (équation 2.3) par l'équation 2.9.

$$\varepsilon_{ve} = A\left(\frac{\sigma}{E}\right) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{C \dot{\varepsilon}_{min} t}{\sigma/E} \right)^{1/n} \right] \right\} \quad 2-9$$

Où $\dot{\varepsilon}_{min}$ est la vitesse minimale de fluage.

Derradji-Aouat et al. [11] ont réussi à développer une autre relation de contrainte-déformation pour la glace isotrope transverse S_2 . Ils ont modifié le modèle de base de Sinha [2] par l'ajout d'une déformation qui tient compte de la fissuration (ε_c). Ils ont donc ajouté un terme de composante de déformation qui est la déformation de fissuration aux trois composantes de déformation (élastique (ε_e), viscoélastique (ε_{ve}) et viscoplastique (ε_{vp})) du modèle de Sinha:

$$\varepsilon_{totale} = \varepsilon_e + \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp} + \varepsilon_c \quad 2-10$$

Où ε_c est la déformation associée à l'effet de la fissuration définie par l'équation 2.11.

$$\varepsilon_c = \varphi \frac{\partial U}{\partial \sigma} \quad 2-11$$

Où φ est un facteur de proportionnalité, et U est l'énergie de surface spécifique (l'énergie associée à la création des nouvelles surfaces).

L'autre contribution concernant la modélisation du comportement mécanique est celle de Dong et al. [21]. Ces auteurs ont développé un modèle de comportement au fluage de la glace, où le mécanisme principal de la déformation est le mouvement des dislocations sur le plan de base de la glace monocristalline. Ils ont identifié le modèle proposé à partir de résultats expérimentaux. Ils ont considéré la glace monocristalline comme ayant une prédisposition pour l'orientation de l'axe C par le mouvement de dislocation, tel qu'illustré à la Figure 2.7. La contrainte de cisaillement τ sur le plan de base, en raison de la contrainte appliquée σ , peut être écrite en fonction de l'angle χ , qui est l'angle entre la contrainte appliquée et l'orientation de l'axe C.

$$\tau = S\sigma = \sigma \cdot \sin\chi \cdot \cos\chi \quad 2-12$$

Où S est le facteur d'orientation de Schmid's, égal à $S = \sin\chi \cdot \cos\chi$

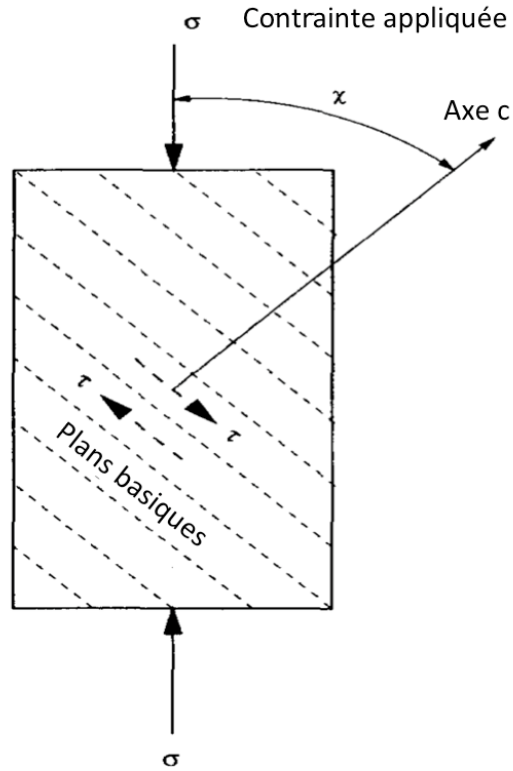


Figure 2.7: Orientation du plan de base par rapport à l'axe C [21].

Ils ont essayé de produire la courbe de contrainte-déformation pour la glace monocristalline dans l'essai de fluage. Finalement, ils ont trouvé l'équation 2.13 qui détermine une relation entre le taux de contrainte ($\dot{\sigma}$) et le taux de déformation ($\dot{\epsilon}$).

$$\dot{\sigma} = E \left[\dot{\epsilon} - H \left\{ \rho_0 + \alpha \left(\frac{\dot{\epsilon}^c}{S} \right)^m \right\} S^{n+1} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \right] \quad 2-13$$

Avec, ρ_0 est la densité initiale de dislocation, α est le taux de multiplication de dislocation qui peut être fortement dépendant de la température, m est l'exposant de déformation inélastique, et n est l'exposant de contrainte, E est le module d'élasticité de la glace et $\dot{\epsilon}$ est la vitesse de déformation qui est la somme de deux vitesses de déformation élastique $\dot{\epsilon}^e$ et inélastique $\dot{\epsilon}^c$, selon l'équation 2.14.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^c \quad 2-14$$

De plus, H est déterminé par l'équation 2.15.

$$H = b v_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad 2-15$$

Où v_0 est une constante avec les dimensions de la vitesse, Q est l'énergie d'activation, R est la constante universelle des gaz, et T est la température absolue en degrés Kelvin. On voit que pour développer la courbe de contrainte-déformation selon ces équations, nous avons besoin de déterminer les quatre paramètres ρ_0 , α , m et n . La Figure 2.8 montre les effets de ces paramètres sur la courbe de contrainte-déformation.

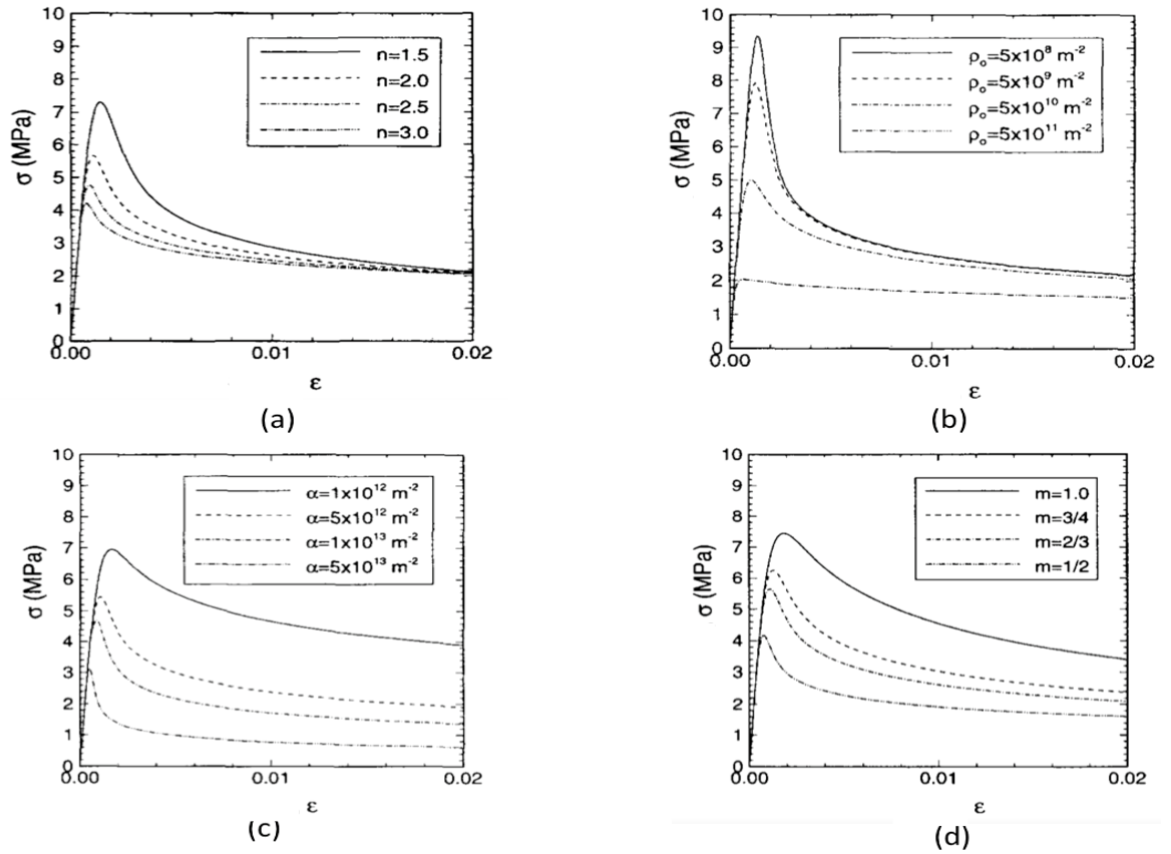


Figure 2.8 : a) Effet de l'exposant de contrainte (n), b) Effet de la densité initiale des dislocations (ρ_0), c) Effet du taux de multiplication de dislocation (α) et d) Effet de l'exposant de déformation inélastique (m) sur la courbe contrainte-déformation [21].

La Figure 2.8-a, montre l'effet de l'exposant de contrainte n sur la courbe de contrainte-déformation. On voit qu'en augmentant la valeur de n , la contrainte de limite élastique et la résistance en compression de la glace (contrainte maximale) diminue. La Figure 2.8-b, montre l'effet de la densité initiale des dislocations sur la courbe de contrainte-déformation. Comme on peut le constater, des valeurs plus élevées de ce paramètre vont faire diminuer la limite élastique et la résistance à la compression de ces

matériaux. Pour ce qui est de l'effet du taux de multiplication de dislocation (α), tel que représenté à la Figure 2.8-c, lorsque celui-ci est plus petit, la limite d'élasticité et la déformation liée à cette valeur sont plus grandes. La valeur du paramètre m gouverne la forme de la variation de la densité de dislocation et de la déformation inélastique. La Figure 2.8-d montre clairement pour des valeurs faibles de l'exposant m , le plateau après la contrainte maximum est atteint avec les plus petites déformations [21].

Duddu et Waisman [22] ont proposé un modèle qui est basé sur le modèle constitutif viscoélastique proposé par Sinha [18], Karr et Choi [23] et sur le modèle d'endommagement anisotrope de fluage présenté par Murakami [24]. Le modèle intègre la dépendance de la température en proposant une relation de type Arrhenius pour la vitesse de déformation visqueuse ([25], [26]) et le taux d'accumulation de dommages [27]. En outre, un seuil de déformation pour initier les dommages dans la glace a été proposé sur la base des données expérimentales de Mellor et Cole [28].

Selon leurs études, le comportement de la glace polycristalline non-endommagée est supposé être isotrope et viscoélastique en raison de l'orientation aléatoire de sa structure cristalline. En supposant que les petites déformations, la décomposition additive du tenseur de déformation totale en ses constituants est donnée par :

$$\varepsilon_{kl} = \varepsilon_{kl}^e + \varepsilon_{kl}^d + \varepsilon_{kl}^v \quad 2-16$$

Où ε_{kl}^e est la déformation élastique, ε_{kl}^d est la déformation élastique retardée et ε_{kl}^v est la déformation viscoplastique. La relation contrainte-déformation élastique est donnée par la loi de Hooke généralisée,

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}^e \varepsilon_{kl}^e \quad 2-17$$

Où σ_{ij} est le tenseur des contraintes et C_{ijkl}^e est le quatrième ordre du tenseur d'élasticité donnée par l'équation 2.18.

$$C_{ijkl}^e = k \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu \left(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \delta_{kl} \right) \quad 2-18$$

Dans l'équation 2.18, les paramètres k et μ sont la rigidité et le module de cisaillement de la glace, respectivement, et δ_{ij} est le symbole de Kronecker.

$$\begin{cases} k = \frac{E}{3(1-2\nu)} \\ \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \end{cases} \quad 2-19$$

Où E est le module de Young de la glace et ν est le coefficient de Poisson de la glace. En utilisant les équations 2.17 et 2.18, une forme générale de la loi de Hooke pour les matériaux isotropes peut être exprimée par

$$\sigma_{ij} = k\varepsilon_{kk}^e \delta_{ij} + 2\mu \left(\varepsilon_{ij}^e - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij} \right) \quad 2-20$$

Le module de Young de la glace, généralement déterminé par des mesures de vitesse acoustiques sur des échantillons de glace, dépend fortement de sa densité et un peu de la température [29]. En laboratoire, une augmentation de 5% (de 8,93 à 9,39 GPa) du module de Young de la glace ainsi qu'une augmentation d'environ 1% du coefficient de Poisson dans la gamme de la température -38°C à 0°C a été observé [29].

Le taux de déformation élastique retardée ($\dot{\varepsilon}_{kl}^d = \frac{\partial \varepsilon_{kl}^d}{\partial t}$) est donné par :

$$\dot{\varepsilon}_{kl}^d = A \left(\frac{3}{2} K \sigma_{kl}^{dev} - \varepsilon_{kl}^d \right) \quad 2-21$$

Où A et K sont des constantes de matériaux et σ_{kl}^{dev} est la partie déviatorique de la contrainte de Cauchy.

$$\sigma_{kl}^{dev} = \sigma_{kl} - \frac{1}{3} \sigma_{ii} \delta_{kl} \quad 2-22$$

Les paramètres élastiques retardés A et K pour la glace polycristalline sont déterminés en utilisant des données expérimentales à partir de tests de fluage uniaxial sur des échantillons de glace [18]. Ces paramètres dépendent de la taille du grain de la glace et de la température. Cependant, on ne trouve pas une règle générale dans la littérature pour établir leur dépendance. En outre, la déformation élastique retardée n'est significative que dans les phases de fluage primaire et secondaire et négligeable par rapport à la déformation visqueuse dans la phase tertiaire. Par conséquent, cette partie composante est généralement négligée lors de la modélisation de la rupture de fluage de la glace soumise à des contraintes faibles [30].

Le taux de déformation visqueuse permanente ($\dot{\epsilon}_{kl}^v$) est généralisé par la loi de puissance [23] comme :

$$\dot{\epsilon}_{kl}^v = \frac{3}{2} K_N \left(\frac{3}{2} \sigma_{mn}^{dev} \sigma_{mn}^{dev} \right)^{(N-1)/2} \sigma_{kl}^{dev} \quad 2-23$$

Où K_N et N sont des paramètres de viscosité. Dans cette équation, la dépendance du coefficient de viscosité (K_N) à de température (T) est donnée par une équation du type Arrhenius [22] :

$$K_N(T) = K_N(T_m) \exp\left(\frac{-Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_m}\right)\right) \quad 2-24$$

Où Q est l'énergie d'activation de fluage, R est la constante universelle des gaz (qui est égale à la constante de Boltzmann) et $K_N(T_m)$ est le coefficient de viscosité à une température de référence T_m .

Le taux de déformation pour la déformation permanente pour une contrainte uniaxiale constante est donné par

$$\dot{\varepsilon} = K_0 \sigma^N \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad 2-25$$

Où K_0 est une constante et σ est la contrainte uniaxiale constante. Dans la littérature sur la glaciologie, cette équation est connue comme la loi de fluage de Glen pour la glace [25]. L'exposant N est considéré comme étant égal à 3 dans la majorité des recherches effectuées dans ce domaine. ([31], [32]).

Finalement, Duddu et Waisman [22] ont développé une loi d'évolution de l'endommagement qui estime la croissance de l'endommagement et de la rupture de la glace. Cette loi considère (i) le comportement multi-axial, (ii) plusieurs types de rupture i.e., en traction, compression et cisaillement, (iii) la dépendance de la température et (iv) l'anisotropie induite par les dommages.

Wang *et al.* [33] ont développé un modèle de comportement pour le fluage du sol gelé sous une charge constante. Initialement, les sols gelés se déforment instantanément. Ceci est suivi par une déformation retardée avec la vitesse de déformation décroissante, correspondant à l'étape I (Figure 2.9). Lorsque la vitesse de déformation devient constante, l'écoulement viscoplastique se produit dans la phase II. Par la suite, la vitesse de déformation augmente rapidement et la rupture liée au fluage est atteinte, ce qui est considéré comme l'étape III (Figure 2.9).

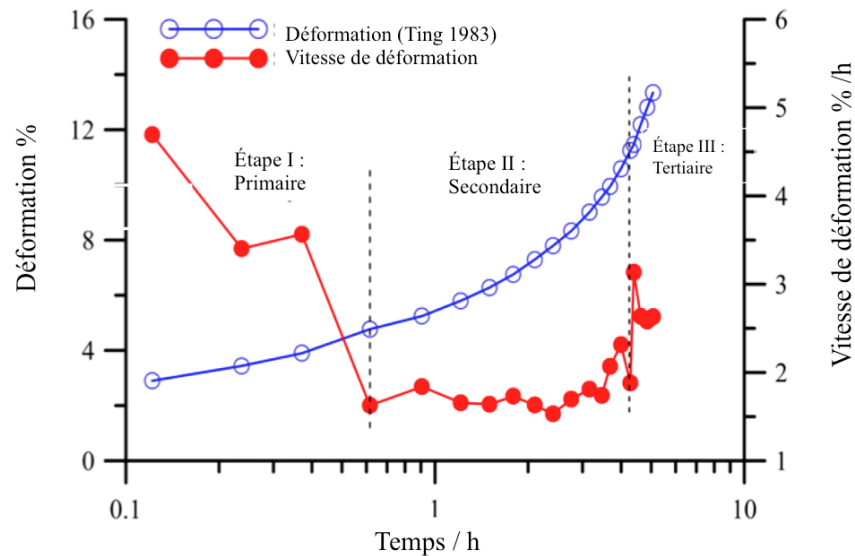


Figure 2.9 : Les étapes de fluage pour un sol gelé [33].

La Figure 2.10 présente des courbes typiques de fluage de sol gelé sous divers niveaux de contraintes ($T = -10^{\circ}\text{C}$, $\sigma_3 = 1,5\text{ MPa}$). Pour des

contraintes plus faibles, l'étape de fluage tertiaire ne peut pas se développer, alors que les sols gelés présentent tous les stades de fluage, au cours desquels une rupture à court terme se produit sous des contraintes relativement fortes [33].

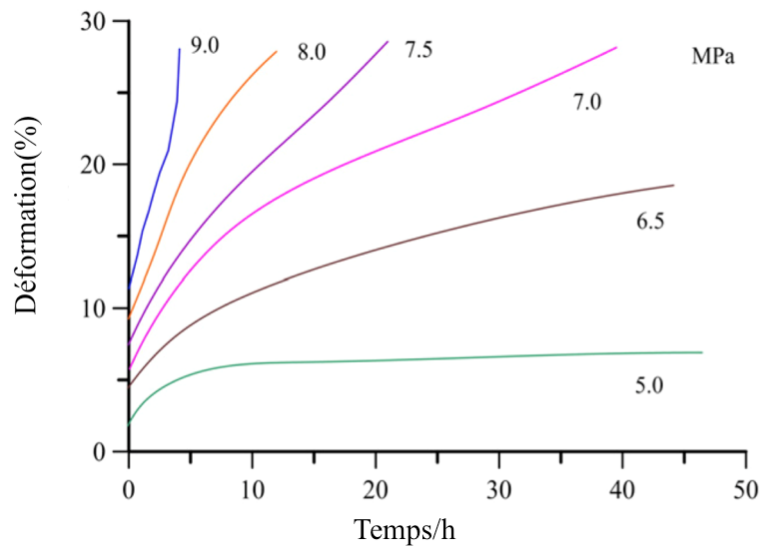


Figure 2.10 : Le fluage d'un sol gelé avec plusieurs niveaux de contraintes [33].

Ces chercheurs ont développé un modèle élémentaire rhéologique de fluage qui considère les conditions suivantes :

1) La déformation instantanée peut comprendre des composantes élastiques et plastiques. La partie plastique est uniquement prise en compte lorsque la contrainte appliquée est plus grande que la résistance du sol. Toutefois, pour les cas de contraintes plus faibles que la résistance des sols,

la partie plastique est généralement négligée. Dans ce cas, il s'agit de sélectionner un ressort pour représenter la partie élastique de la déformation instantanée, à l'étape I, (Figure 2.11).

2) Dans le cas de contraintes relativement faibles, la déformation des sols gelés tend à être stable (Figure 2.10, $\sigma = 5$ MPa). Sur la base de cette hypothèse, le modèle de Kelvin prédit une déformation constante dans une limite de temps infini.

3) On peut voir aux Figure 2.9 et Figure 2.10 qu'il y a un stade relativement stable au cours de fluage des sols gelés (étape II), dans lequel la vitesse de déformation est constante pour un niveau de contrainte donné, en fonction d'écoulement plastique (yield function) $\varphi(F)$. Si $\varphi(F) \leq 0$, la vitesse de déformation tend vers zéro, alors qu'elle augmente positivement avec le niveau de contrainte. Ainsi, un amortisseur est nécessaire pour l'écoulement viscoplastique avec la vitesse de déformation proche de zéro alors que la partie de Bingham (Figure 2.11) est prise pour des conditions de contrainte qui dépassent un niveau d'écoulement plastique.

4) Le stade tertiaire pour les sols gelés (étape III) se produit sous des contraintes relativement élevées. Ceci n'est pas considéré dans le modèle.

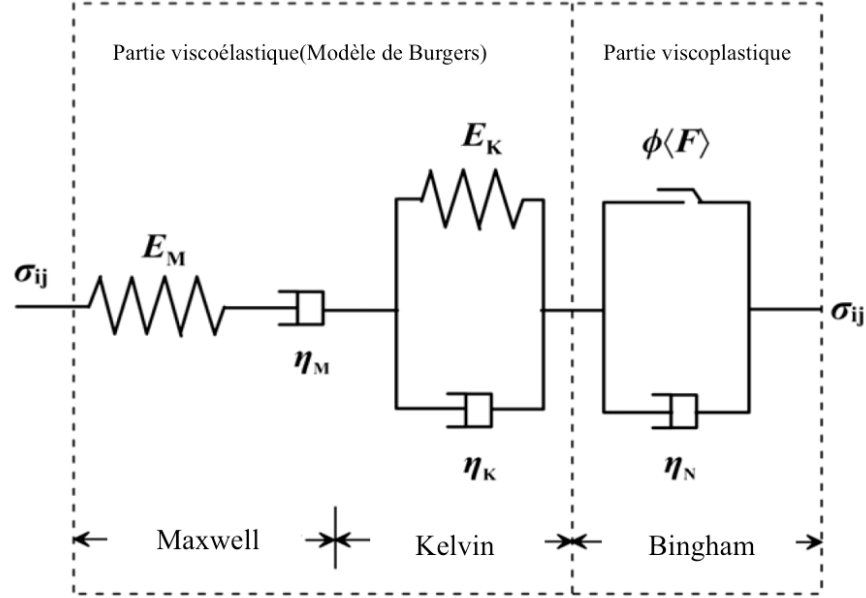


Figure 2.11: Structure du modèle conceptuel de fluage pour le sol gelé [33].

En combinant tous les éléments identifiés, Wang *et al.* ont obtenu la structure conceptuelle du modèle de fluage simple pour les sols gelés, représentée à la Figure 2.11. Dans le cas où $\varphi(F) \leq 0$, le modèle est en fait le modèle de Burgers [34] tandis que la déformation viscoplastique représentée par le corps de Bingham n'est pris en compte que lorsque $\varphi(F) > 0$. Le modèle de fluage pour les sols gelés est :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{2E_M} + \frac{\sigma_{ij}}{2\eta_M} t + \frac{\sigma_{ij}}{2E_K} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K} t\right) \right] (\varphi(F) \leq 0) \quad 2-26$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{2E_M} + \frac{\sigma_{ij}}{2\eta_M}t + \frac{\sigma_{ij}}{2E_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k}{\eta_k}t\right) \right] + \frac{1}{2\eta_N} \langle \varphi(F) \rangle \frac{\partial Q}{\partial \{\sigma\}} t \quad (\varphi(F) > 0)$$

2-27

Où E_M et E_k sont le module d'élasticité pour les modèles de Maxwell et Kelvin, respectivement; η_M , η_k et η_N sont les coefficients de viscosité pour les modèles de Maxwell, Kelvin et Bingham, respectivement; Q est la fonction potentielle viscoplastique; $\varphi(F)$ est la fonction de mise à l'échelle représentant la magnitude de l'état de fluage qui peut être écrit comme :

$$\varphi(F) = \left\langle \frac{F}{F_0} \right\rangle$$

2-28

Où F_0 est la valeur de référence, égale à 1,0 MPa pour les sols gelés et où la formule de base de F est définie comme :

$$F = \sqrt{3J_2} - c - \sigma_m \tan \phi + \frac{\tan \phi}{2p_m} \sigma_m^2$$

2-29

Où c est la cohésion des sols gelés; ϕ est l'angle de frottement interne; p_m est la contrainte normale sur la surface de maximum de contrainte de cisaillement (q_m). σ_m et J_2 sont la contrainte principale et le second invariant de contrainte, respectivement. Pour simplifier, ils ont supposé que la fonction

de potentiel Q viscoplastique $Q(\sigma_{ij})$ a la même forme que la fonction de l'écoulement plastique $F(\sigma_{ij})$.

Yang *et al.* [35] ont développé un modèle visco-élasto-plastique qui peut complètement caractériser le comportement de l'asphalte pour les trois parties de la déformation par fluage. Afin de construire ce modèle, qui peut décrire l'ensemble du processus de fluage, une série viscoplastique est ajoutée au modèle de Burgers, représenté à la Figure 2.12. Sur cette figure, σ_1 , σ_2 , σ_3 et σ_4 représentent quatre composantes de contrainte appliquées et ε_1 , ε_2 , ε_3 et ε_4 représentent les quatre éléments de déformation correspondants, à savoir l'élément élastique, visqueux, viscoélastique et viscoplastique, respectivement.

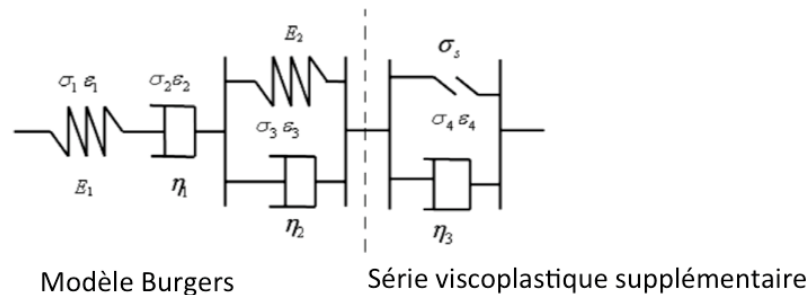


Figure 2.12 : Modèle élasto-viscoplastique proposé par Yong et al [35].

La série viscoplastique supplémentaire se compose d'un amortisseur et d'un élément de friction et caractérise principalement une déformation viscoplastique en fluage. L'équation constitutive peut être écrite comme :

$$\dot{\varepsilon}_4 = \frac{1}{\eta_3} \langle \sigma_4 - \sigma_s \rangle \quad 2-30$$

La déformation totale peut être traitée comme simple addition des composantes élastiques, visqueux, viscoélastiques et viscoplastiques. Dans un état de contrainte uniaxiale, σ est la contrainte total et ε est la déformation totale.

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 \end{cases} \quad 2-31$$

Les quatre composantes de la contrainte peuvent être exprimées de la façon suivante :

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \\ \sigma_2 = \eta_1 \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma_3 = E_2 \varepsilon_3 + \eta_2 \dot{\varepsilon}_3 \\ \sigma_4 - \sigma_s = \eta_3 \dot{\varepsilon}_4 \end{cases} \quad 2-32$$

Où E_1 et E_2 sont des modules de Young, η_1 , η_2 et η_3 sont les viscosités et σ_s est la limite d'élasticité.

Concernant la force visqueuse entre les particules, Cao et al. [35] ont trouvé que le coefficient de viscosité dans la partie viscoplastique est dépendant du temps de chargement selon l'expression suivante.

$$\eta_3(t) = \frac{A}{At^2 + Bt + C} \eta_0 \quad 2-33$$

Où A et B et C sont des constantes.

Finalement, le modèle proposé est la suivant.

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right) \right] \text{ pour } \sigma \leq \sigma_s \\ \varepsilon(t) &= \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right) \right] + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_0} \left(\frac{1}{3} t^3 - \frac{1B}{2A} t^2 + \frac{C}{A} t \right) \text{ pour } \sigma > \sigma_s \end{aligned} \quad 2-34$$

Le fluage secondaire de la glace est généralement utilisé pour décrire la composante viscoplastique. Toutefois, Aryanpour et Farzaneh [36] ont considéré une autre déformation viscoplastique de type fluage primaire en plus du fluage secondaire. Ils ont défini la déformation viscoplastique (ε_{vp}) comme la somme des déformations de fluage primaire (ε_{pc}) et secondaire (ε_{sc}) :

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_d + \varepsilon_{pc} + \varepsilon_{sc} \quad 2-35$$

La loi de puissance a été utilisée pour évaluer la partie de fluage secondaire selon l'équation 2.36.

$$\dot{\varepsilon}_{sc} = B\sigma^n \quad 2-36$$

Où $\dot{\varepsilon}_{sc}$ est le taux de déformation pour le fluage secondaire en fonction de la contrainte axiale appliquée (σ). Ils ont utilisé l'équation 2.37 [36] pour déterminer la déformation permanente due au fluage primaire pour présenter la relation entre la contrainte axiale (σ), la déformation axiale liée au fluage primaire (ε_{pc}), et la vitesse de déformation axiale ($\dot{\varepsilon}_{pc}$) dans la partie de fluage primaire.

$$\begin{cases} \sigma = K\varepsilon_{pc}^{1/M}\dot{\varepsilon}_{pc}^{1/N} \\ \dot{\varepsilon}_{pc} = \sigma^N/K^N\varepsilon_{pc}^{N/M} \\ \varepsilon_{pc} = \left[\frac{M+N}{M} \left(\frac{\sigma}{K} \right)^N t \right]^{M/(M+N)} \end{cases} \quad 2-37$$

Où M , N et K sont les trois paramètres qui dépendent de la température et du matériau, N est l'exposant de viscosité de l'ordre de 2 pour les matériaux très visqueux et de 100 pour des matériaux peu visqueux, M est l'exposant d'écrouissage qui varie entre 2 à 50, et K est le paramètre de résistance, dont celui des métaux varient entre 100 et 1000 MPa. Il faut mentionner que cette loi a été beaucoup utilisée dans le domaine de métaux et la variation de

ces valeurs données dans la littérature est aussi pour les métaux. Les paramètres de M , N et K qui ont été déterminés par Aryanpour et Farzaneh sont présentés au Tableau 2–2.

Tableau 2–2 : Les paramètres de modèle considéré par Aryanpour et Farzaneh [36].

M	N	K
2	10	1550

2.5 Conclusion

D'après la revue de la littérature, différents modèles ont été présentés et utilisés pour décrire la déformation des matériaux. Les résultats de cette recherche bibliographique montrent que, dans un cadre de modélisation plus générale, l'existence d'une déformation inélastique permanente de nature (déformation plastique) indépendante du temps peut être considérée pour la glace polycristalline. C'est le cas pour d'autres matériaux cristallins tels que les métaux [36]. Toutefois, en raison du fait que la déformation de la glace est étudiée dans une plage de température supérieure à $0,85T_m$, où T_m est le point de fusion absolu, la déformation plastique est négligeable par rapport à la déformation viscoplastique. C'est une hypothèse critique qui n'a jamais été

étudiée dans le domaine de la glace. Cependant, nous allons abordés ce contexte dans cette présente recherche.

Pour cela, on a considéré un modèle pour la déformation et dans lequel la déformation plastique instantanée ajoutée au fluage primaire et secondaire contribuent à la déformation inélastique.

Après avoir présenté la structure de la glace ainsi que les lois proposées pour reproduire son comportement mécanique, nous allons exposer la partie méthodologie concernant la fabrication de la glace dans le laboratoire ainsi que les paramètres physiques de cette dernière. De même, la partie expérimentale et les résultats vont être interprétés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE EXPERIMENTALE

3.1 Étude expérimentale

Une expérience mécanique sur la glace peut se composer en différentes phases : un travail préparatoire qui consiste à fabriquer la glace, l'usinage de l'échantillon, la mise en charge, l'acquisition de données et enfin le traitement des données numériques.

3.1.1 Fabrication de la glace

Pour fabriquer les échantillons de glace isotropes, deux portions de particules de glace et d'eau doivent être mélangées. Avec une dispersion aléatoire des particules de glace comme noyau dans l'eau, on peut supposer que de la glace avec une structure isotrope sera obtenue. Cependant, comme le remplissage des pores entre les particules et l'eau ne peut être complet et dépend du processus de remplissage et de la teneur en air de l'eau, la fraction de pores dans les échantillons peut varier. Par conséquent, le procédé sous vide est une partie importante du processus de fabrication. Cette explication montre que la structure de la glace est fortement dépendante du procédé de fabrication de l'échantillon et des paramètres de contrôle. Les particules de glaces utilisées dans cette étude ont des diamètres inférieurs à 3 mm. Le traitement suivant a été appliqué à l'eau avant qu'elle ne soit utilisée dans différents procédés de fabrication de glace.

Un volume d'eau distillée et déionisée est versé dans un récipient cylindrique (hauteur= 1524 mm et diamètre = 203 mm), puis une pompe à vide de 25-30 mm Hg est reliée au cylindre pendant presque une semaine. La Figure 3.1 représente le montage utilisé à cette fin.



Figure 3.1 : Le montage utilisé pour préparer de l'eau dégazée.

Les différentes méthodes utilisées pour fabriquer des échantillons de glace isotropes sont expliquées dans les sous-sections suivantes.

3.1.2 Méthode 1

Un moule en bois de forme cubique est préparé, avec la paroi intérieure recouverte d'isolant Styrofoam. Ce matériau permet à l'expansion provoquée par la solidification de l'eau de se produire en réduisant le risque de fissuration de la glace. Après avoir recouvert la couche de styromousse avec une couche de nylon, le moule est rempli avec 10 kg d'eau préalablement distillée, déionisée et désaérée. Puis, environ 10 kg de glace tamisée avec des particules plus petites que 3 mm sont ajoutés à l'eau maintenue à 0 °C.

Le moule contenant le mélange de glace et d'eau est déposé dans une chambre froide à -10 °C pour compléter le processus de solidification. L'explication ci-dessus est illustrée à la Figure 3.2.



Figure 3.2 : Les différentes étapes de préparation de glace isotrope par la méthode 1.

3.1.3 Méthode 2

Dans la deuxième méthode, un cylindre en plastique transparent (hauteur = 252mm et un diamètre = 62,5 mm), représenté à la Figure 3.3, est rempli avec 300 ml de particules de glace préparées à partir d'eau distillée, déionisée et congelée à -10°C , pendant une semaine. Les particules ont un diamètre inférieur à 3 mm. Le cylindre est fixé sur une base d'aluminium afin que le processus de solidification s'effectue à partir du fond lorsque l'eau est ajoutée à la glace. Dans un autre récipient, la même quantité d'eau distillée et déionisée est reliée à une pompe à vide pendant au moins une heure. Lorsque l'eau atteint la température de 0°C , elle est transférée dans un autre récipient déjà relié au cylindre de glace. Ensuite, l'eau est versée dans le cylindre de glace avec application d'un vacuum sur le cylindre. En même temps, on frappe sur les parois externes du cylindre. La pompe à vide continue de fonctionner pendant au moins une heure, à la suite de quoi le mélange se solidifie et maintenu à -10°C pendant 24 heures. Ces étapes sont schématiquement représentées aux Figure 3.4 et Figure 3.5.

3.1.1 Méthode 3

Dans cette méthode, le cylindre représenté à la Figure 3.3 contient 300 ml d'eau distillée, déionisée et dégazée et est relié à une pompe à vide. Lorsque la température de l'eau atteint 0°C , des particules de glace d'un diamètre

inférieur à 3 mm sont ajoutées à l'eau. Cet ajout de glace se fait trois fois, et à chaque fois 100 gr de glace sont ajoutés et poussés manuellement dans l'eau. Le processus de frappe de cylindre sur ses parois externes est effectué pendant 10 minutes. Enfin, le cylindre comprenant la glace et l'eau est relié à la pompe à vide pendant au moins une heure supplémentaire et ensuite maintenu à -10°C pendant 24 heures pour la solidification.



Figure 3.3 : Cylindre transparent en plastique utilisé pour mouler le mélange de glace et d'eau avec la méthode 2.

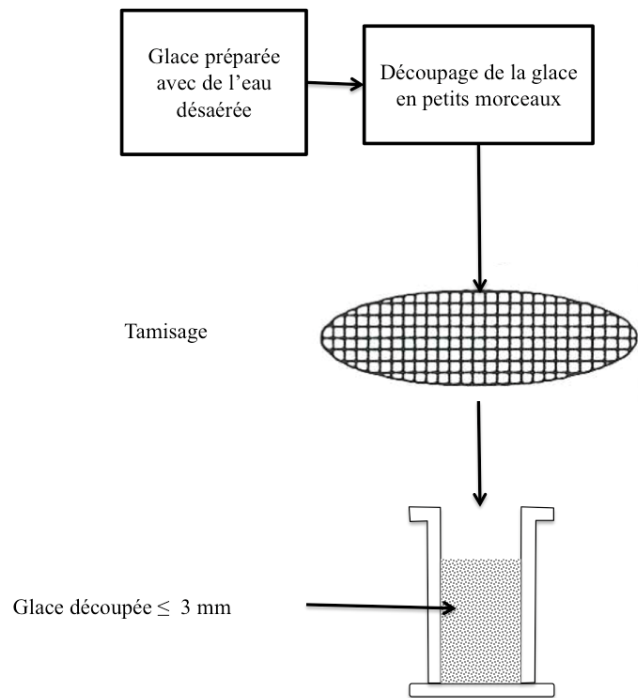


Figure 3.4 : Remplissage d'un moule cylindrique avec des particules de glace selon la méthode 2.

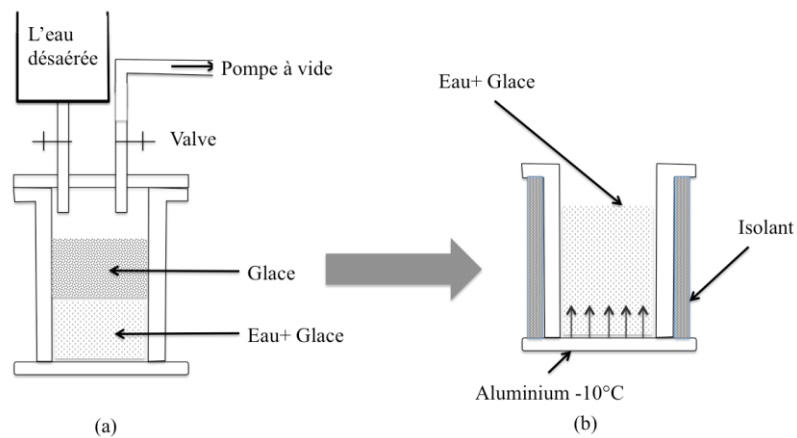


Figure 3.5 : a) Remplissage du moule cylindrique contenant de la glace avec de l'eau b) Solidification directionnelle du mélange de glace et d'eau à -10 °C.

3.2 Préparation des échantillons

Les dimensions de l'échantillon choisi sont adaptées afin d'éviter toute influence de la taille des grains sur le comportement de la glace lors de sa compression [37]. Les échantillons de glace sont préparés à température -10°C, tout en suivant les directives prescrites par les normes ASTM ; D 4543-01 [38], D 2664-95 [37], impliquant des éprouvettes de 75 mm de longueur et de 30 mm de diamètre.

À l'aide d'une scie à ruban, des blocs prismatiques de 150 mm de longueur et de 55 mm de côté sont découpés à partir du grand bloc de la glace préparé selon la méthode 1. Pour avoir des échantillons cylindriques, une tour à fer est utilisée pour machiner des cylindres de glace avec les dimensions présentées à la Figure 3.6.

En ce qui concerne les méthodes 2 et 3, les échantillons étant déjà cylindriques, il reste seulement à les machiner pour arriver à un diamètre de 30 mm pour les essais de compression simple avec vitesse de déformation constante, et de 50 mm pour les essais avec la contrainte constante (fluage).

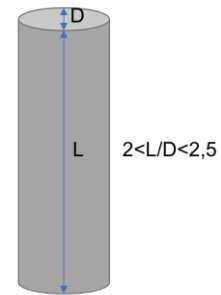


Figure 3.6: Découpage du grand bloc de glace et préparation des échantillons cylindriques.

3.3 Tomographie à rayons-X

Pour vérifier les propriétés physiques des échantillons, les méthodes conventionnelles comme la microscopie optique permettent la visualisation 2D de la surface d'un objet. Néanmoins, dans la plupart des cas, la structure 3D de l'objet ne peut pas être déterminée sur la base de ces informations 2D. Seule la tomographie à rayons-X permet de visualiser et de faire la mesure complète de la structure 3D de l'objet sans préparation [1].

La tomographie par absorption de rayons X est une technique non destructive qui permet la reconstitution d'images « en coupe » d'un objet à trois dimensions [1]. En fait, la tomographie par rayons X est basée sur le principe que chaque matière est caractérisée par un coefficient d'atténuation linéaire de rayons X, qui dépend du nombre atomique, de la densité et de l'énergie du rayonnement incident. La technique peut impliquer l'irradiation de l'échantillon à différents angles d'incidence. A chaque angle, l'atténuation des rayons X qui traversent l'objet est détecté et un profil d'intensité est obtenu [1]. La Figure 3.8 (a) est une projection parallèle d'un objet pris à des hauteurs différentes à partir d'un angle donné, tandis que la Figure 3.8(b) est la projection d'images dans plusieurs directions.

Un appareil SkyScan modèle 1172 (Figure 3.7) est utilisé pour déterminer les caractéristiques physiques de la glace. Il dispose d'une source à rayons X d'une puissance de 10 W avec une énergie de faisceau de 100 kV et un courant de 100 μ A. Le détecteur consiste en une caméra CCD 12-bits de 10 mégapixels avec changement automatique de filtre (Al, Al-Cu, sans filtre). Le microtomographe à rayon X a une résolution spatiale de 5 μ m. L'objet est disposé sur un porte-échantillon couplé à un moteur permettant la rotation de l'objet.

L'acquisition et la reconstruction des données sont réalisées avec les logiciels "Skyscan1172MicroCT" et "NRecon". Le logiciel "Skyscan1172MicroCT" permet de préparer les projections 2D, à partir de radiographies de l'objet et de coupes 2D obtenues par le logiciel NRecon. Ensuite, le logiciel CTAn permet d'effectuer une analyse 2D ou 3D.

La fraction de la porosité et le degré d'anisotropie des échantillons fabriqués sont mesurés. En fait, ce sont ces deux propriétés importantes qui peuvent influencer sur le résultat des tests mécaniques. L'isotropie est une mesure de la symétrie 3D ou de la présence ou de l'absence d'un alignement préférentiel des structures le long d'un axe directionnel particulier. En dehors du pourcentage de volume, le degré d'anisotropie (DA) est l'un des déterminants les plus importants de la résistance mécanique. La longueur d'interception moyenne (LIM) et l'analyse propre sont utilisées pour calculer le DA, et celles-ci impliquent des mathématiques d'ingénierie assez avancées. Si un volume solide est isotrope, alors une ligne traversant le volume à n'importe quelle orientation 3D fera un nombre similaire d'interceptions à travers la phase solide. Notez que dans ce calcul la LIM, la longueur d'interception peut correspondre à l'épaisseur de l'objet dans une orientation donnée, mais elle n'en constitue pas une mesure directe. Le degré d'anisotropie pourrait être dérivé de l'analyse propre au tensoriel comme un seul paramètre mesurant l'anisotropie: c'est le degré d'anisotropie (DA), et il

est traditionnellement exprimé comme la valeur propre maximale divisée par la valeur propre minimale. Les valeurs de DA calculées de cette manière varient de 1 (entièrement isotrope) à l'infini (entièrement anisotrope). Un indice mathématique d'anisotropie plus pratique est calculé selon l'Eq. 3.1 Ici DA est 0 pour l'isotropie totale et 1 pour l'anisotropie totale [1].

$$DA = 1 - \frac{\text{valeur propre minimale}}{\text{valeur propre maximal}} \quad 3-1$$

De plus, la présence de pores ou de bulles d'air dans le matériau est considérée comme un facteur extérieur à la structure qui peut avoir une influence importante sur les propriétés mécaniques du matériau. Ainsi, il est souhaitable d'avoir aussi peu de pores ou de bulles d'air que possible dans la structure du matériau.



Figure 3.7 : Skyscan 1172 utilisé pour l'évaluation des propriétés structurelles d'un matériau.

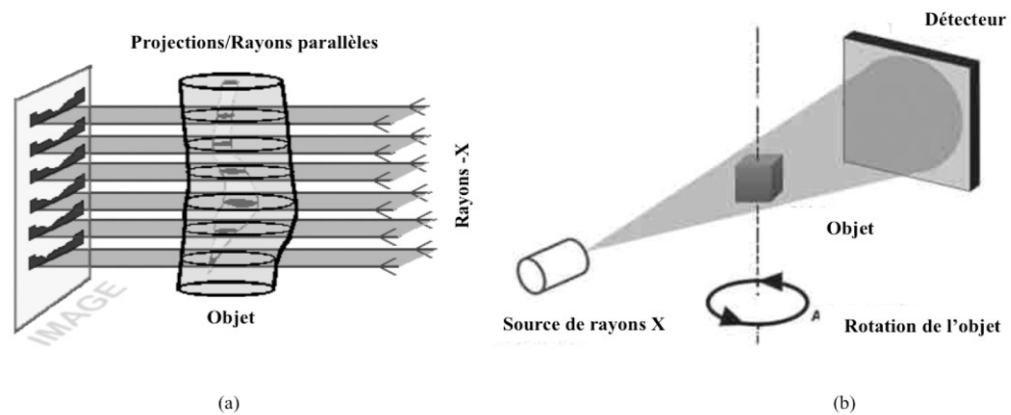


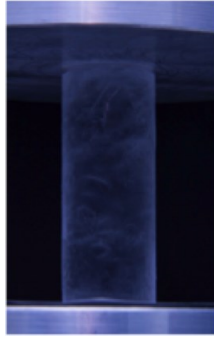
Figure 3.8 : Schéma de la technique de projection par Skyscan : a) projections parallèles d'un objet à différentes hauteurs; b) rotation de l'objet pour avoir des projections dans différents angles [1].

3.4 Les essais mécaniques

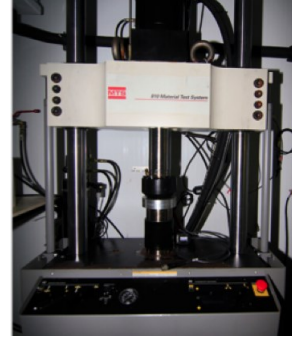
Nous avons effectué une étude expérimentale poussée afin de fournir les données indispensables à l'élaboration d'un modèle de comportement mécanique macroscopique adéquat. Donc, des essais de compression uniaxiale avec une vitesse de déformation constante et des essais de fluage ont été réalisés sur la glace isotrope.

3.4.1 Les essais de compression uniaxiale avec une vitesse de déformation constante

Un échantillon cylindrique isotrope avec une longueur d'environ 75 mm et un diamètre d'environ 30 mm a été préparé et utilisé pour un essai uniaxial (Figure 3.9-a). L'essai uniaxial est un test de compression simple réalisé à l'aide d'une machine MTS-810 installée dans une chambre froide à température régulée (Figure 3.9-b). Le test a été effectué à trois températures de -5, -10 et -15 °C. Trois vitesses de déformation axiale de 10^{-6} , $5 \cdot 10^{-6}$ et 10^{-5} (1/s) ont été sélectionnées en ajustant le taux de variation de la longueur de l'échantillon par rapport à sa longueur initiale. Toutefois, on s'est surtout intéressé à la vitesse de déformation pour qu'elle ne prenne pas des valeurs très différentes de celle sélectionnée pendant le test. Le résultat du test de compression simple est la courbe de la contrainte axiale réelle par rapport à la déformation axiale réelle (avec le signe positif pour les valeurs de la contrainte en compression et la déformation). Il convient de souligner que, comme les échantillons sont plus susceptibles à une rupture à des vitesses de déformation axiale de $5 \cdot 10^{-6}$ et 10^{-5} (1/s) que celle de 10^{-6} (1/s), les tests uniaxiaux sur les deux taux plus élevés n'ont pas été poursuivis au-delà d'une déformation axiale d'environ 5%. Toutefois, pour la vitesse de déformation axiale de 10^{-6} (1/s), il a été possible de poursuivre l'essai jusqu'à une déformation axiale d'environ 0,08. Une bonne reproductibilité de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale a également été observée.



(a)



(b)

Figure 3.9 : a) Échantillon de glace isotrope b) La machine MTS-810.

3.4.2 Les essais de compression uniaxiale avec une contrainte constante (fluage)

Les essais de fluage sous chargement en compression uniaxiale constante ont été réalisés à l'aide de la machine MTS-810 installée dans une chambre froide à température régulée. Les essais ont été réalisés à des températures de -5, -10 et -15 ° C. Les essais ont été effectués sous plusieurs niveaux de contrainte constante et avec plusieurs temps de chargement et déchargement afin de déterminer le modèle de comportement pour la déformation de la glace.

CHAPITRE 4 : PROPRIÉTÉS
STRUCTURELLES ET COMPORTEMENT
DE COMPRESSION SIMPLE DE LA
GLACE ISOTROPE POLYCRISTALLINE

4.1 Introduction

La glace sur les lignes de transport subit des charges mécaniques de différentes natures. On peut citer les efforts de compression, traction, flexion, torsion, etc. Ces chargements sont souvent influencés par plusieurs paramètres environnementaux et structuraux. Nous avons choisi d'étudier le comportement mécanique de la glace en compression afin de développer un modèle de comportement pour la glace. Ces comportements de glace sont dépendant de divers paramètres structuraux et environnementaux. Comme sujet fondamental sur le comportement de déformation de la glace, le cas simple de la glace isotrope polycristalline a été choisi dans cette étude. Cependant, l'obtention d'une structure isotrope avec le moins de porosité possible pourrait être un problème majeur. Dans ce contexte, trois méthodes pour fabriquer de la glace isotrope à l'échelle du laboratoire ont été développées et utilisées, tel que présenté au chapitre 3. Ensuite, les propriétés structurelles (physiques) de la glace, comme la porosité et le degré d'anisotropie, ont été étudiées à l'aide d'échantillons fabriqués par ces trois méthodes. Par la suite, en choisissant la méthode la plus appropriée de fabrication de l'échantillon, le comportement visqueux de la glace isotrope a été analysé à partir des essais de compression simples réalisés à différentes températures et vitesses de déformation axiale.

4.2 Résultats et discussion

4.2.1 L'évaluation des paramètres physiques de la glace produite par différentes méthodes

Avant chaque essai mécanique, trois à quatre échantillons du même bloc de glace ont été testés avec SkyScan 1172 pour déterminer la porosité et le degré d'anisotropie. La Figure 4.1 représente un échantillon cylindrique de la glace déposé sur la plateforme à l'intérieur du Skyscan, permettant d'observer l'image projetée de l'échantillon durant le balayage (scanning time). Après avoir sélectionné une zone de l'échantillon on peut l'analyser avec le logiciel CTAn, ce qui a permis d'obtenir des résultats sur la porosité et le degré d'anisotropie des échantillons de glace.

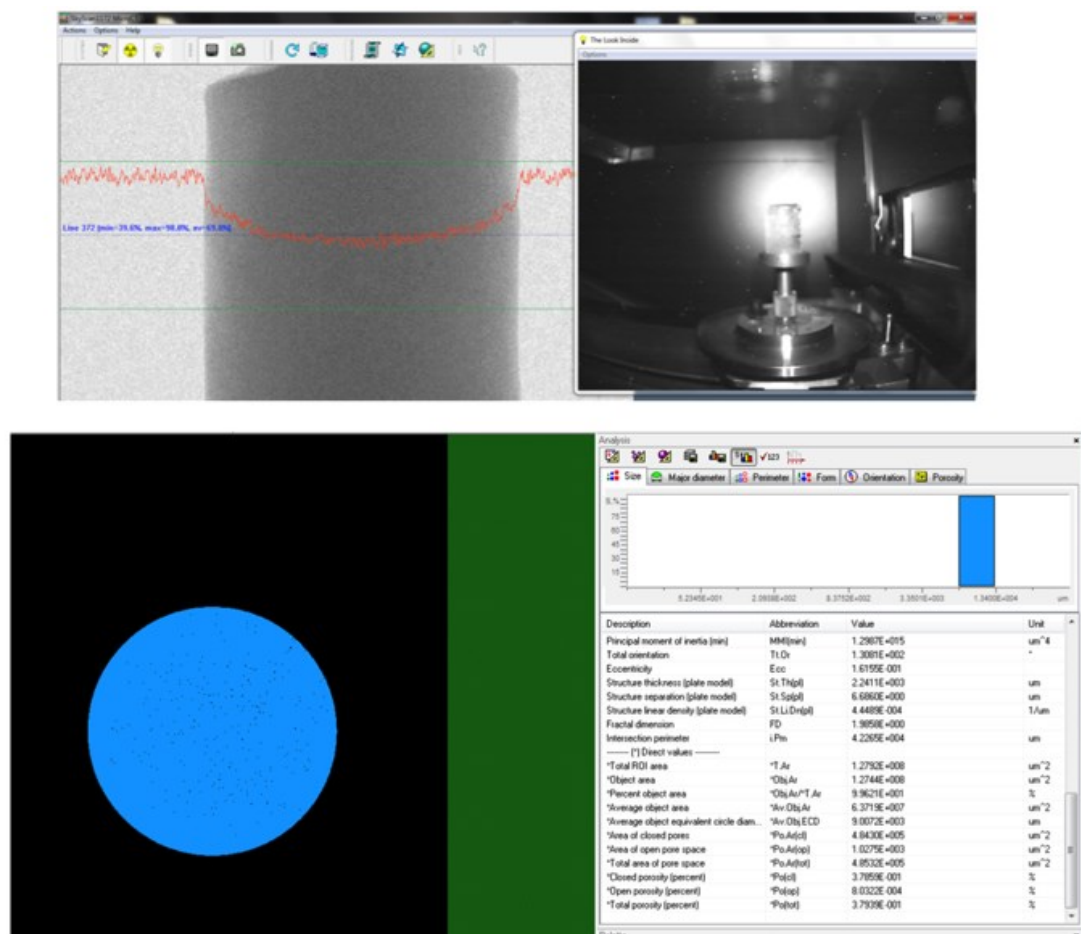


Figure 4.1 : Résultats typiques obtenus avec Skyscan1172.

La mesure de la porosité (pourcentage en volume) réalisée sur les quatre échantillons est rapportée dans le Tableau 4–1. Les valeurs moyennes et l'écart type sont également présentés dans ce tableau. Les valeurs du Tableau 4–1 apparaissent également à la Figure 4.2.

Tableau 4–1 : Les résultats de la porosité pour les tests réalisés selon les trois méthodes.

Test Méthode	1	2	3	4	Moyenne μ	Écart type σ
Méthode 1(%)	1,21	1,60	1,22	1,18	1,30	0,197
Méthode 2 (%)	0,08	0,14	0,02	0,06	0,08	0,05
Méthode 3 (%)	1,39	0,86	0,84	1,34	1,11	0,298

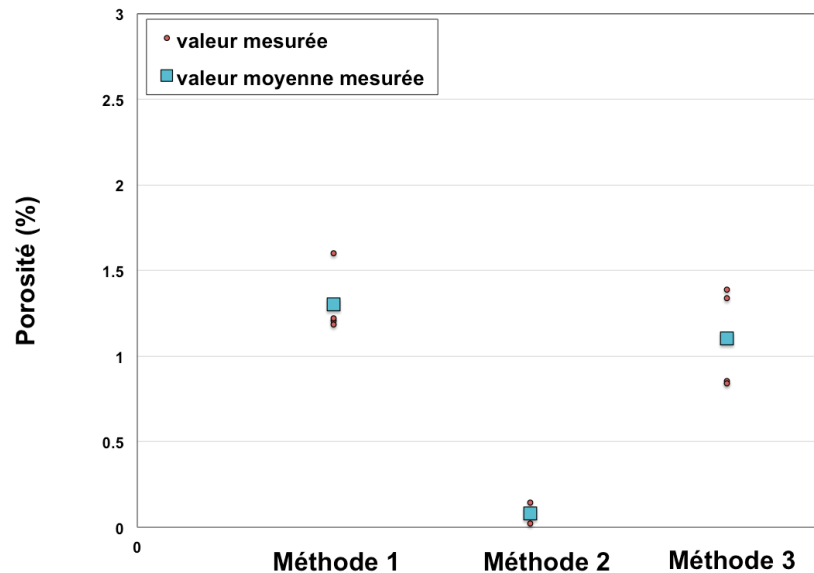


Figure 4.2 : Variation de la porosité (%) pour les échantillons des trois procédés de fabrication.

Comme on peut le constater à la Figure 4.2 et au Tableau 4–1, les valeurs de porosité sont relativement petites pour les échantillons des trois méthodes. Cependant, comme il est préférable d'avoir une porosité aussi

faible que possible, c'est la méthode 2 qui est préférable. Le degré d'anisotropie est donné au Tableau 4–2 et à la Figure 4.3.

Tableau 4–2 : Degré d'anisotropie des échantillons de glace produits par les différentes méthodes.

Test Méthode	1	2	3	4	Moyenne μ	Écart type σ
Méthode 1	0,137	0,133	0,142	0,141	0,138	0,004
Méthode 2	0,0754	0,0746	0,0729	0,099	0,0805	0,012
Méthode 3	0,151	0,141	0,144	0,169	0,151	0,012

Comme pour le cas de la porosité, un faible degré d'anisotropie a été généralement obtenu pour les échantillons. Cependant, comme cela a été le cas avec la Figure 4.3, le procédé 2 se traduit par la valeur moyenne la plus basse de ce paramètre.

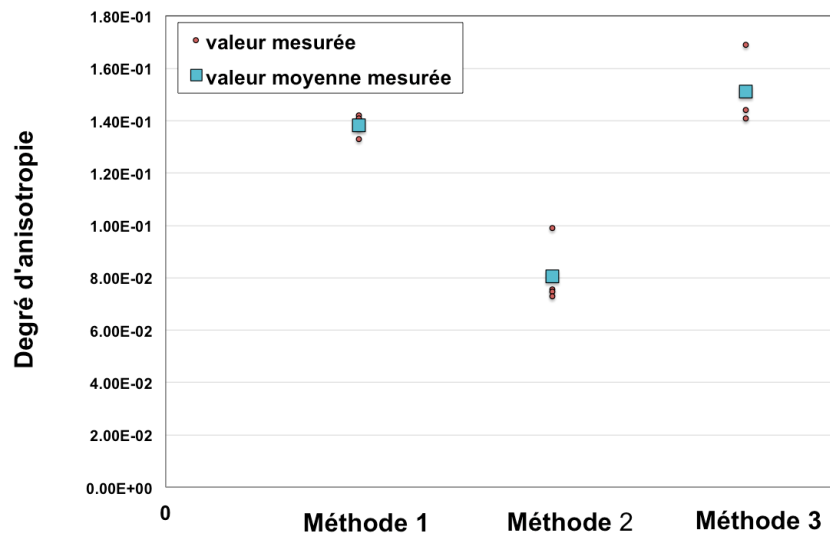


Figure 4.3 : Valeurs mesurées et valeurs moyennes du degré d'anisotropie.

4.2.2 L'évaluation du comportement mécanique de la glace fabriquée par différentes méthodes

Comme il a été mentionné précédemment, l'essai de compression simple a été choisi pour évaluer le comportement mécanique de la glace. Deux variables importantes dans le comportement mécanique des matériaux proches du point de fusion sont la température et le taux de chargement. Ainsi, dans les essais de compression simple, le taux de déformation axiale a été choisi en tant que variable, en plus de la température. Toutefois, il serait peut-être bon de savoir si la méthode de fabrication peut avoir un impact sur le comportement mécanique en compression simple via son influence sur la

porosité et le degré d'anisotropie. Pour répondre à cette interrogation, les résultats de tests de compression simple sur différents échantillons, à -10°C et vitesse de déformation axiale de 10^{-5} (1/s), sont présentés à la Figure 4.4. Plus précisément, les courbes contrainte-déformation pour deux échantillons pour chaque procédé de fabrication sont reportées sur la figure.

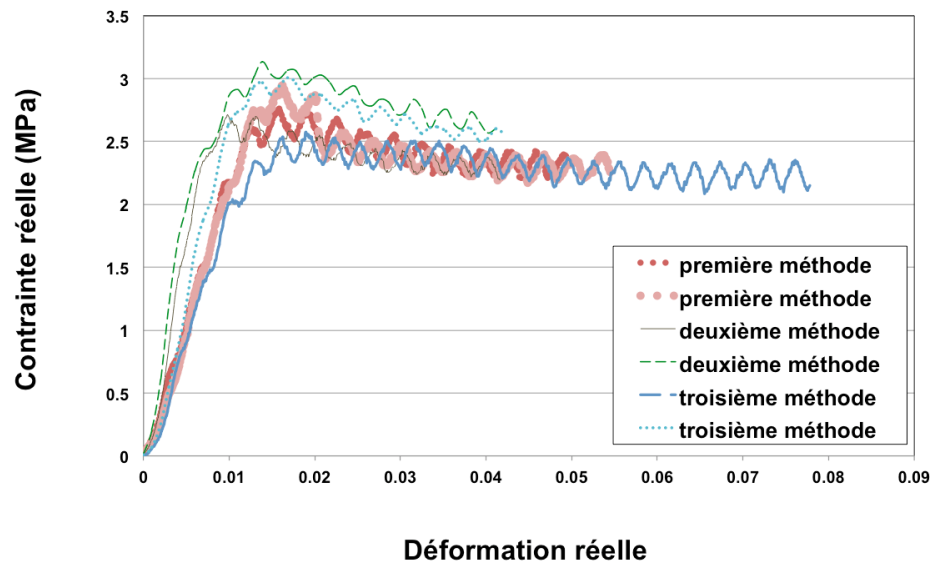


Figure 4.4 : Résultat de l'essai de compression simple, à -10°C et vitesse de déformation $1\text{E}-5$ (1/ s) sur des échantillons à partir de différentes méthodes.

Tel que représenté à la Figure 4.4, les courbes de contrainte axiale réelles par rapport à la déformation axiale réelles sont essentiellement similaires, avec seulement une légère différence. En d'autres termes, lors d'une déformation axiale entre 1,5% et 2%, une contrainte axiale maximale comprise entre 2,5 et 3 MPa est obtenue. Après le pic de contrainte, la

contrainte axiale tend vers une contrainte de plateau d'environ 2,2 MPa. La légère différence avec la courbe de contrainte-déformation est normale, et pourrait être en raison de la faible différence dans la fraction volumique de porosité et le degré d'anisotropie. Considérant l'ensemble des Figure 4.2, 4-3 et 4-4, l'utilisation de la méthode 2 pour la fabrication des échantillons est préférable, car elle nous permet d'obtenir des échantillons avec une valeur de porosité et degré d'anisotropie moindre, tel que souhaité pour cette étude. Ainsi, dans la poursuite des travaux, les échantillons ont été fabriqués exclusivement avec la méthode 2.

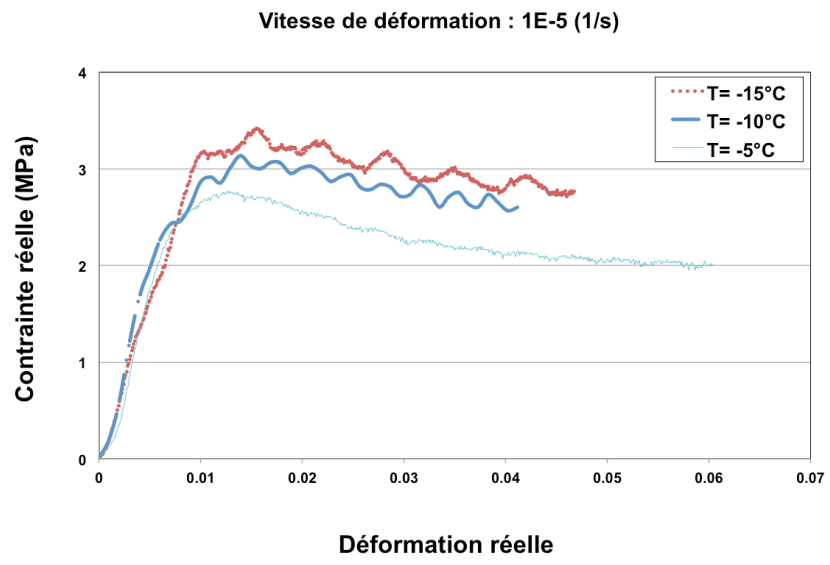
4.2.3 Effets de la température et de la vitesse de déformation sur le comportement mécanique

Après avoir sélectionné la méthode 2 pour la fabrication des échantillons, les essais de compression uniaxiale ont été réalisés sur ces échantillons, à des températures de -5, -10, et -15 ° C et des vitesses de déformation axiales 10^{-5} , 5×10^{-6} et 10^{-6} (1/s). La Figure 4.5 montre les courbes obtenues à des températures différentes pour une vitesse de déformation axiale fixe alors que celles de la Figure 4.6 sont avec différentes vitesses de déformation pour une température fixe. À partir de ces figures, on peut faire les constatations suivantes :

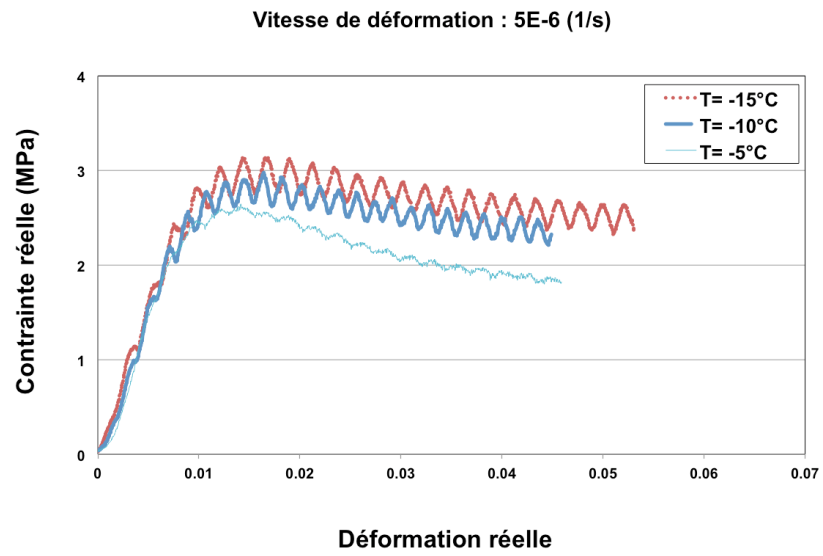
- 1- À vitesse de déformation constante, la résistance à la compression de la glace diminue avec l'augmentation de la température. Ceci est dû*

probablement à l'augmentation du comportement visqueux et aux effets de récupération tels que la montée des dislocations et l'annihilation des dislocations à des températures plus élevées [5].

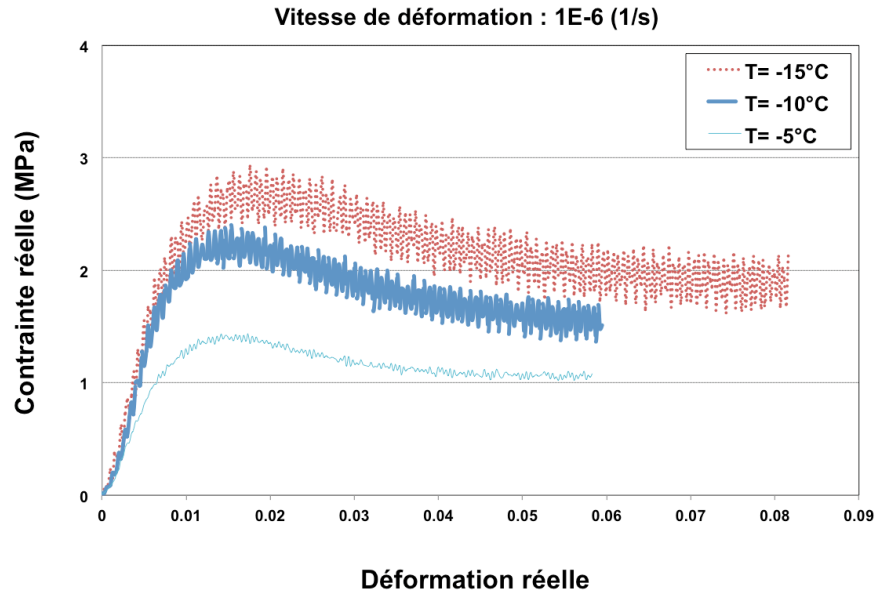
- 2- À température constante, la résistance à la compression de la glace augmente avec l'augmentation de la vitesse de déformation. Ceci est probablement dû au phénomène d'écrouissage qui a plus d'effets à des taux de déformation plus élevés.*
- 3- L'effet du comportement visqueux est plus prononcé à la température de -5 ° C et au taux de déformation 10^{-6} (1/s). Notre intention au sujet du comportement visqueux ici est en fait de se référer à la condition de déformation sous la forte influence de la vitesse de chargement.*
- 4- Lorsque la température est basse et que la vitesse de déformation est élevée, l'effet du comportement visqueux est moins prononcé dans ces deux cas. En d'autres termes, les courbes à des vitesses de déformation plus élevée (Figure 4.5) et les courbes à des températures inférieures (Figure 4.6) se rapprochent les unes des autres. Cela signifie que lorsque la température diminue ou la vitesse de déformation augmente, le matériau a tendance à avoir un comportement instantané au lieu d'un comportement visqueux.*



(a)

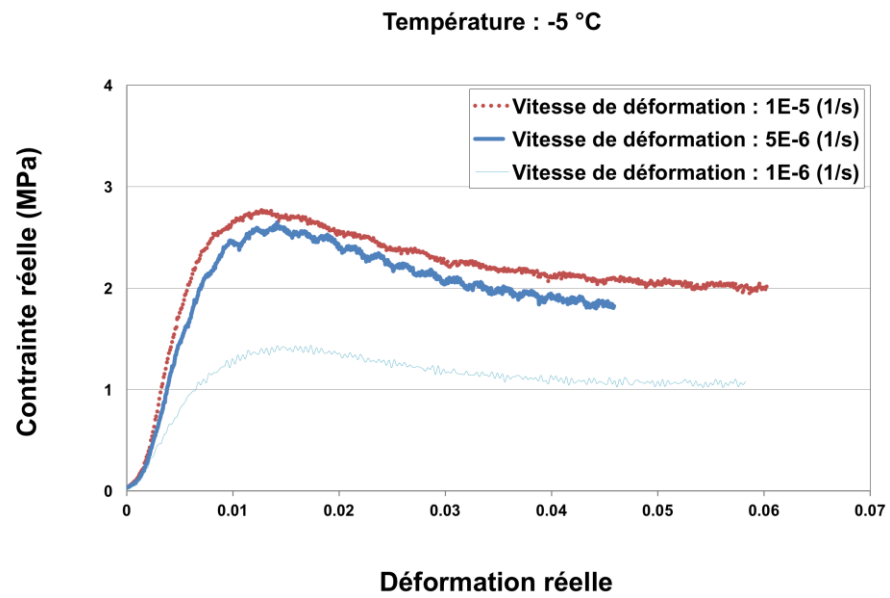


(b)

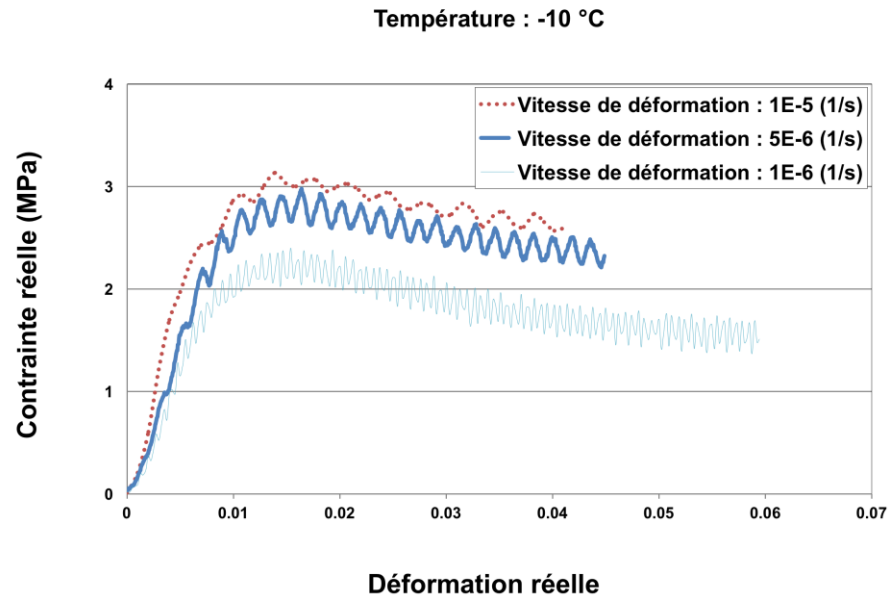


(c)

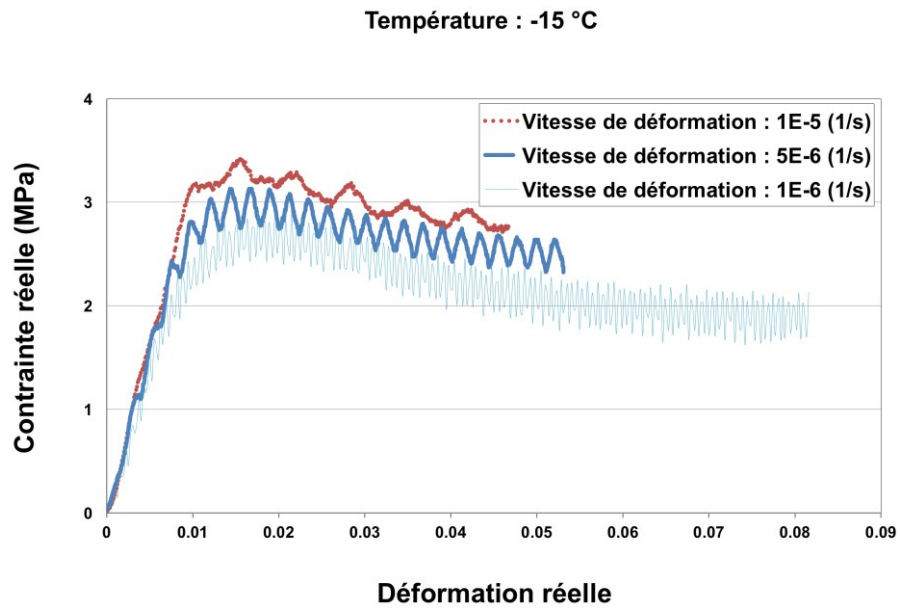
Figure 4.5 : Les courbes de contrainte-déformation obtenues à différentes températures pour une vitesse de déformation axiale fixe.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.6 : Les courbes de contrainte-déformation obtenues à différentes vitesses de déformation pour une température fixe.

4.2.4 Détermination des paramètres de fluage secondaire

Le fluage dans les matériaux est un phénomène de déformation généralement observé dans l'application d'une contrainte constante. Ce comportement est généralement étudié dans le cadre d'un essai uniaxial avec une contrainte axiale constante. Trois phases de déformation, c'est-à-dire les stades de fluage primaire, secondaire et tertiaire, sont observés. Le fluage secondaire (ou fluage stationnaire) se déroule sur une longue période de temps et est caractérisé par une vitesse de déformation axiale minimale et constante. La loi de puissance de Glen est suggérée pour le fluage secondaire [25]:

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^n \quad 4-1$$

Où σ est la contrainte axiale appliquée, $\dot{\epsilon}$ est la vitesse de déformation axiale, et B et n sont des paramètres dépendant de la température pour chaque matériau.

En dépit du fait que le fluage secondaire soit habituellement observé à contrainte axiale constante dans les essais uniaxiaux, il est possible d'identifier ce comportement par un essai uniaxial à vitesse de déformation

axiale constante. En fait, si, dans un tel essai, la contrainte axiale atteignait une valeur de plateau, on peut dire qu'un état de fluage secondaire a été créé parce que, à vitesse de déformation axiale constante, une contrainte axiale constante a été atteinte, permettant l'application de l'équation (4.1) dans cet état. En faisant référence à la Figure 4.5 et Figure 4.6, on voit clairement que, après le passage d'un pic de contrainte dû à la multiplication des dislocations, la réorientation de cristaux et/ou l'occurrence de microfissures ([28], [39]), l'état de contrainte est probablement stabilisé à un plateau. Dans l'état de contrainte de plateau, l'équation (4.1) pourrait s'exprimer comme :

$$\ln(\dot{\epsilon}) = \ln B + n \ln(\sigma) \quad 4-2$$

Les valeurs de contrainte de plateau ainsi que la vitesse de déformation axiale sont données pour chaque température dans le Tableau 4–3. Ces données sont utilisées pour obtenir les points de la Figure 4.7. En appliquant l'équation (4.2) aux points de la Figure 4.7 (courbes linéaires), il est possible d'obtenir les valeurs de n et B pour chaque température. Ces valeurs sont ainsi données dans le Tableau 4–4.

Comme on peut le voir dans le Tableau 4–4, lorsque la température augmente, le paramètre n diminue et en conséquence B augmente. La gamme des variations de n et de B correspond en général à ce que l'on

retrouve dans la littérature ([5], [18], [26], [40]–[43]). Les données indiquées dans le Tableau 4–4, sont également représentées à la Figure 4.8. En se référant à cette figure, deux zones d'étude peuvent être considérées, l'une est l'intervalle $-15^{\circ}\text{C} < T < -10^{\circ}\text{C}$ désignée comme zone I, et l'autre est l'intervalle $-10^{\circ}\text{C} < T < -5^{\circ}\text{C}$ désignée comme zone II. Nous pouvons donc décrire les deux zones comme suit :

Zone I: caractérisée par une augmentation raisonnable de B et une forte diminution de n par rapport à la température.

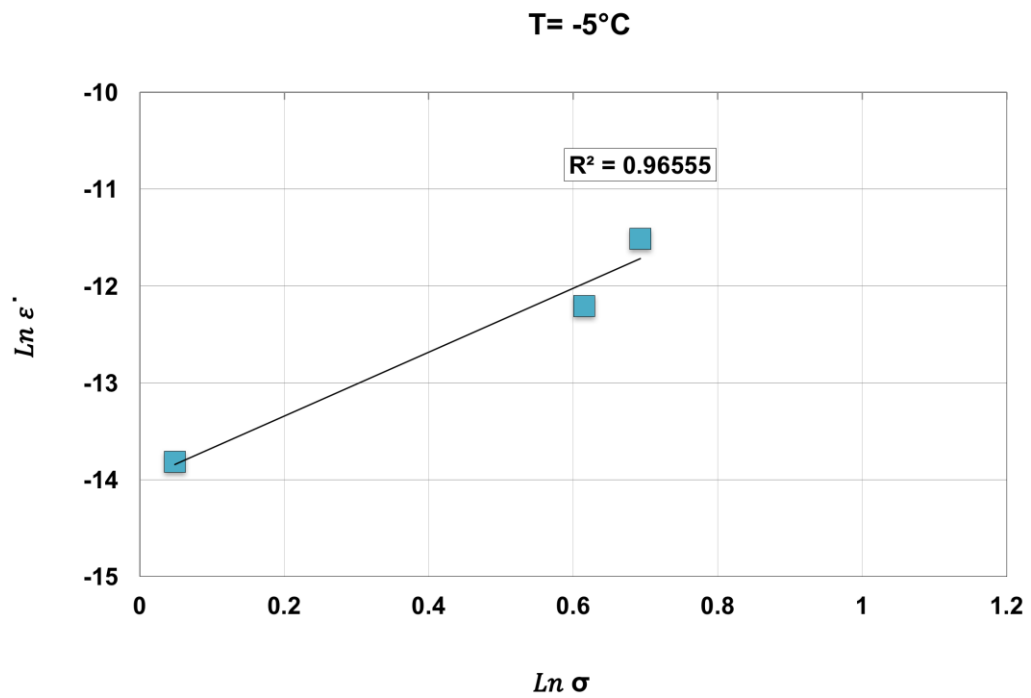
Zone II: caractérisée par une forte augmentation de B et une diminution raisonnable de n par rapport à la température.

Tableau 4–3 : Valeurs des contraintes plateaux en fonction de la température et de la vitesse de déformation.

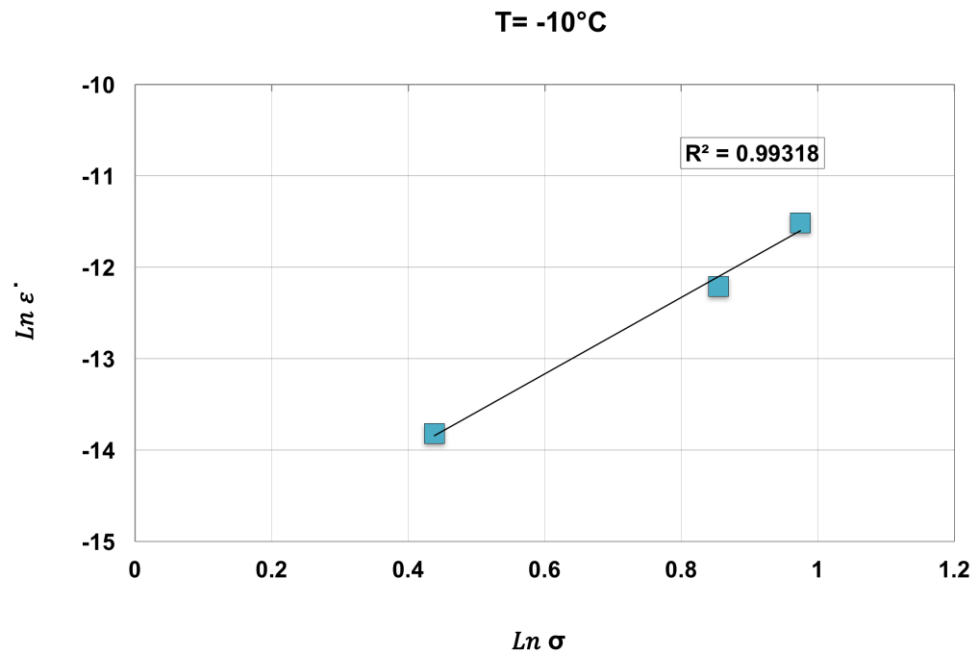
Vitesse de déformation (1/s)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Contrainte de plateau (MPa)
1E-5	-15	2,85
	-10	2,65
	-5	2
5E-6	-15	2,5
	-10	2,35
	-5	1,85
1E-6	-15	1,9
	-10	1,55
	-5	1,05

Tableau 4–4 : Les valeurs de n et B obtenus à partir de la Figure 4.7

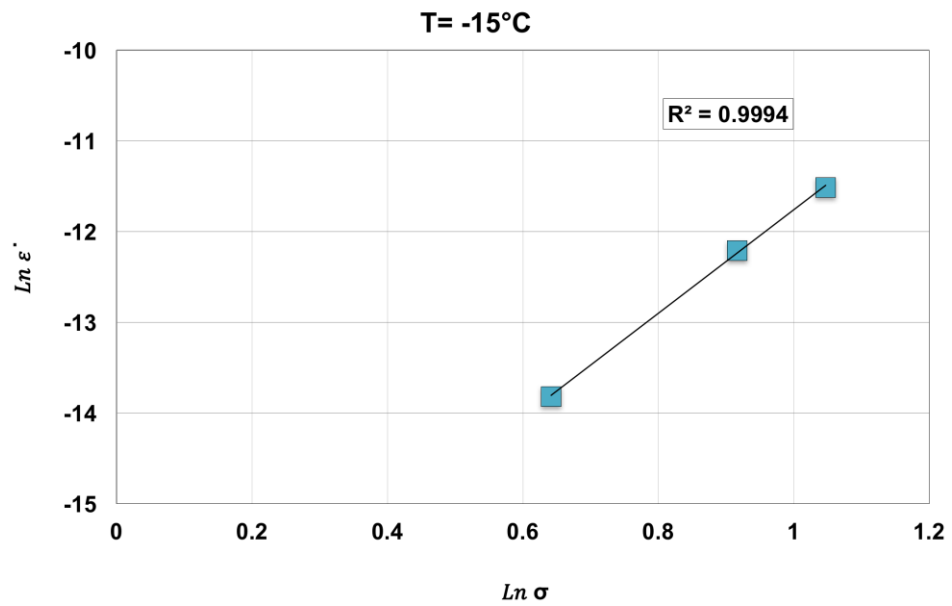
T (°C)	n	B
-15	5,7	2,59E-08
-10	4,18	1,56E-07
-5	3,3	8,27E-07



(a)



(b)



(c)

Figure 4.7 : Variation de $\ln \dot{\epsilon}$ versus $\ln \sigma$

Petrenko et Whitworth croient que n représente le rapport de la force de montée sur la force de glissement agissant sur les dislocations [5]. Si la montée des dislocations et de glissement des dislocations sont considérés comme représentatifs du comportement visqueux et du comportement instantané, respectivement, la diminution continue du paramètre n dans les zones I et II indique que le matériau a tendance à avoir un comportement plus visqueux lorsque la température augmente de -15 à -5 ° C. Cependant, l'effet du paramètre B , dans le cas de cette tendance, ne devrait pas être ignoré, en particulier pour la zone II.

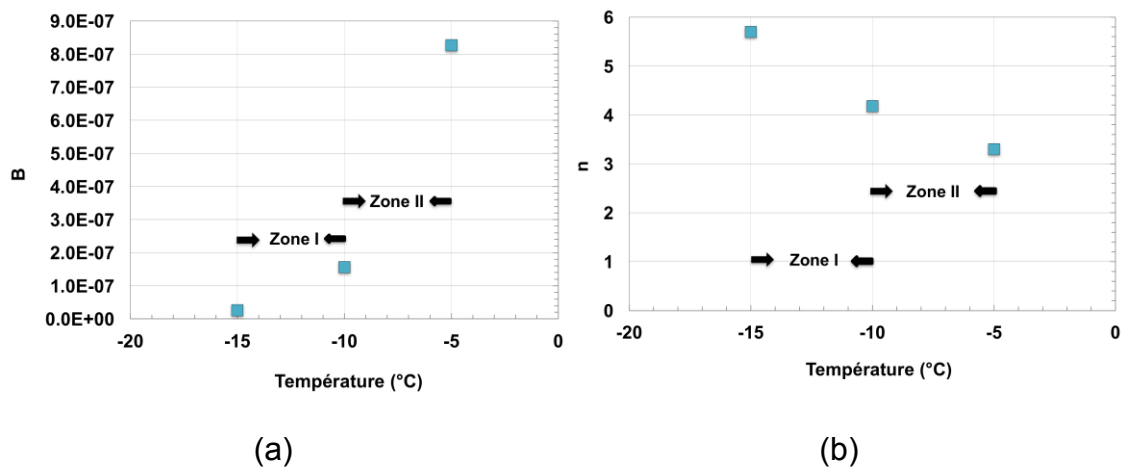


Figure 4.8 : Variation de B (a) et de n (b) en fonction de la température pour la glace isotrope.

4.3 Conclusion

Trois procédés de fabrication de glace isotrope polycristalline dans un cadre expérimental ont été utilisés pour réaliser un matériau avec un minimum degré d'anisotropie et de porosité. Il n'y avait pas de différences significatives dans les résultats de l'essai de compression simple effectuée sur différents échantillons, peut-être en raison de résultats similaires avec la porosité et le degré d'anisotropie. Cependant, le procédé dans lequel de l'eau dégazée et déionisée est ajoutée aux particules de glace sous vide (voir méthode 2) a été sélectionné en tant que procédure de fabrication de la glace, car elle donne un degré d'anisotropie et de porosité inférieurs en comparaison avec les deux autres méthodes.

Les essais de compression simple ont été effectués sur les échantillons fabriqués par le procédé choisi. Trois températures élevées de -15 , -10 °C et -5 °C ont été sélectionnés pour les essais mécaniques. La vitesse de déformation axiale a été choisie comme l'autre variable, en plus de la température, afin d'étudier le comportement visqueux (fluage secondaire) du matériau. On a observé qu'un plateau de contrainte est établi au cours de l'essai de compression simple, pour chaque paire de température et de vitesse de déformation axiale, de sorte que les paramètres de comportement visqueux ont été évalués à chaque température. Les valeurs des paramètres B et n sont en bon accord avec celles données dans la littérature. D'après les

valeurs obtenues pour les paramètres de comportement visqueux à chaque température, une tendance accrue vers un comportement visqueux est observée lorsque la température varie de -15 à -10 °C et bien plus de -10 à -5 °C.

CHAPITRE 5 : DÉVELOPPEMENT D'UN
MODÈLE DE COMPORTEMENT DE
DÉFORMATION DE LA GLACE
ISOTROPE

5.1 Introduction

Parmi les différents travaux que l'on peut effectuer sur la glace et ses propriétés, l'étude de son comportement mécanique en déformation est un sujet important. Néanmoins, les études existantes réalisées pour identifier le phénomène de déformation de la glace ne considèrent pas l'existence d'une déformation inélastique permanente, de nature indépendante du temps, tel qu'observée dans d'autres matériaux comme les métaux. Afin d'étudier la présence de cette déformation et de déterminer les autres composantes de la déformation comme la déformation élastique, viscoélastique et le fluage primaire, des essais de fluage sous compression uniaxiale constante, avec plusieurs temps de chargement (2, 30 et 70 minutes) et de déchargement, ont été effectués à des températures de -5, -10 et -15 °C.

Par la suite la contribution de chacune des composantes de la déformation totale, i.e., la déformation élastique, viscoélastique et plastique, ainsi que le fluage primaire et secondaire, a été déterminé en fonction du temps. Les effets de la température sur la contribution de chacune des composantes de la déformation dans la déformation permanente ont aussi été étudiés.

5.2 Étude expérimentale

5.2.1 Les essais de fluage

Des échantillons cylindriques avec une longueur d'environ 125 mm et un diamètre d'environ 50 mm ont été préparés et utilisés pour la réalisation des essais de fluage. Les essais de fluage sous chargement en compression uniaxiale constante ont été réalisés à l'aide d'une machine MTS-810 installée dans une chambre froide à température régulée (Figure 3.9-b). Les essais ont été effectués à des températures de -5, -10 et -15 ° C.

Les résultats des essais de fluage sous contrainte constante sont sur la courbe de la déformation axiale réelle par rapport au temps (avec le signe positif pour les valeurs de contrainte en compression et de déformation).

À chaque température, les essais de fluage ont été répétés de 4 à 5 fois, et la moyenne de ces essais a été utilisée pour déterminer les paramètres de fluage. Ces résultats pour les températures de -5, -10 et -15°C sont présentés aux Figure 5.1, Figure 5.2 et Figure 5.3, respectivement.

De plus, afin de déterminer des paramètres de déformation, nous avons réalisé des essais de fluage avec plusieurs temps de chargement. Les temps de chargement considérés étaient de 2, 30 et 70 minutes. À chaque

température et pour chaque temps de chargement, plusieurs tests ont été réalisés. La longueur des échantillons avant l'essai (L_0), tout de suite après le déchargement (L_1) et après la recouvrance de déformation élastique et viscoélastique (L_2) a été mesurée afin de déterminer la déformation permanente de la glace.

La valeur de la contrainte constante appliquée (Tableau 5–1) à chaque température a été choisie inférieure à la résistance maximale obtenue à la suite des essais de compression sur le même type de glace (voir Figure 4.5 et Figure 4.6).

Tableau 5–1 : Valeurs de la contrainte constante appliquée pour les essais de fluage.

Température	Contrainte constante appliquée pour l'essai de fluage
-5°C	0,5 MPa
-10°C	0,8 MPa
-15°C	1 MPa

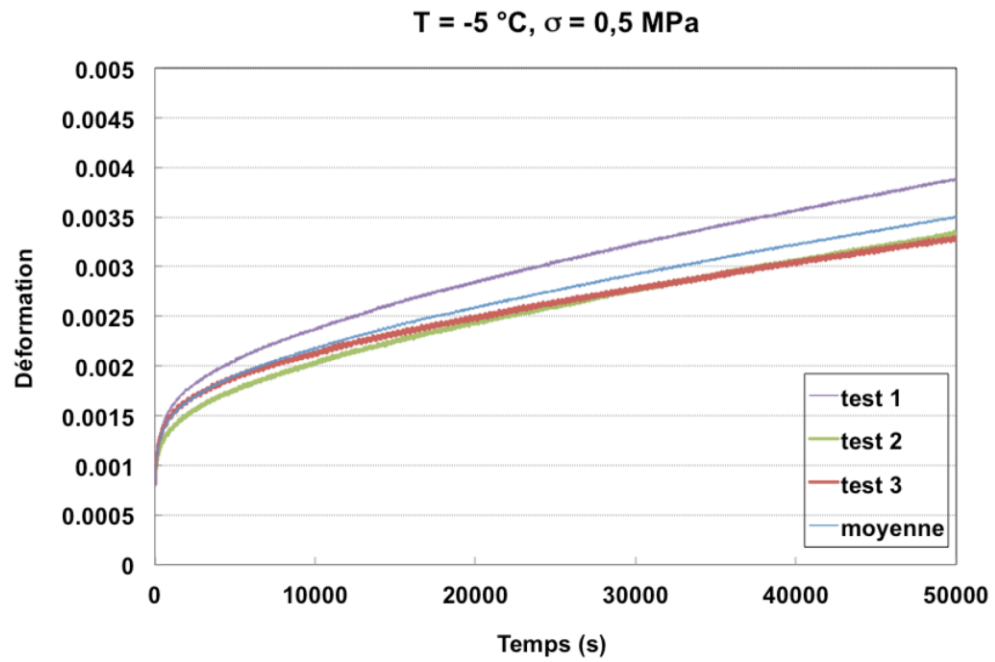


Figure 5.1: Les résultats des essais de fluage à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

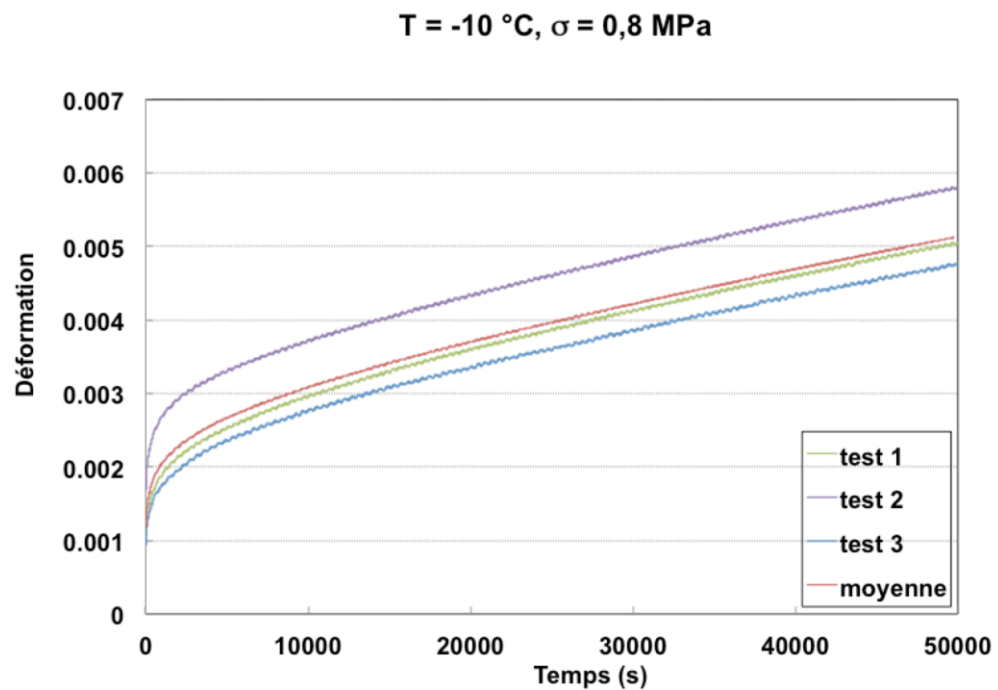


Figure 5.2: Les résultats des essais de fluage à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

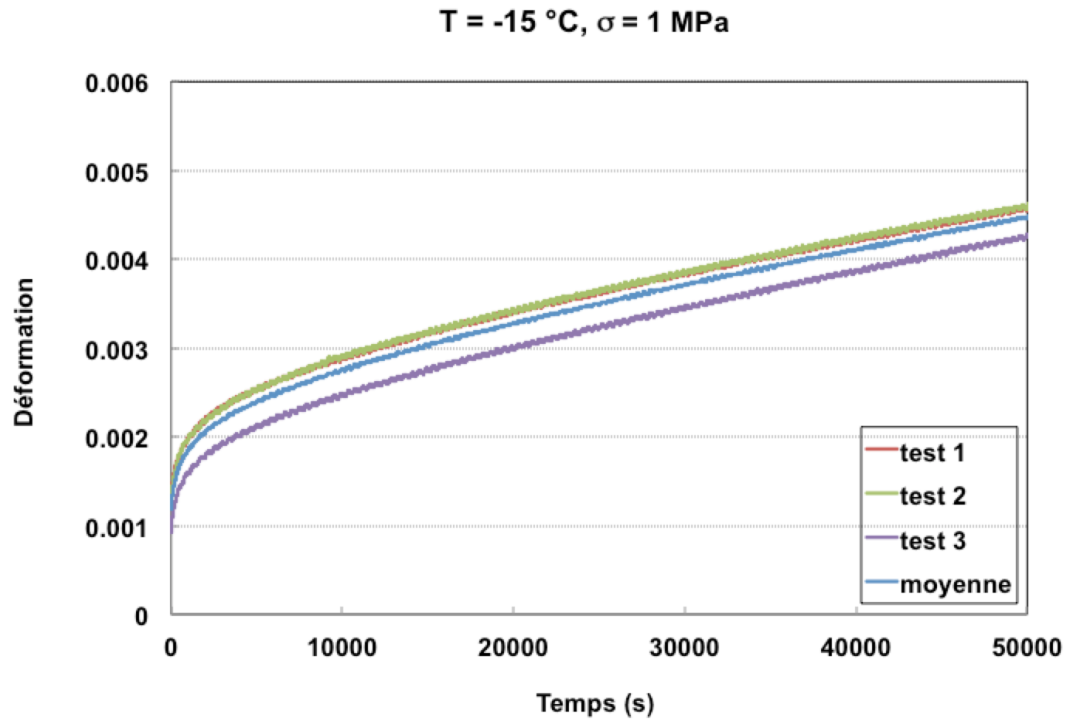


Figure 5.3: Les résultats des essais de fluage à -15°C .

Tel qu'illustré aux Figure 5.1, Figure 5.2 et Figure 5.3, pour l'ensemble des essais réalisés à plusieurs températures, la vitesse de déformation a une allure non linéaire dans la première partie de la courbe et cette non linéarité est liée au fluage primaire et à la déformation élastique retardée (viscoélastique). Notons que ces déformations ont été atteintes après la déformation instantanée, qui peut être liée à la déformation élastique et plastique. Par la suite, on observe que la vitesse de déformation a une tendance linéaire et montre que, dans cette partie, le fluage secondaire comprend la majeure partie de la déformation. Ces observations ont été faites sur des courbes de fluage d'autres matériaux comme le sol gelé,

l'acier, etc. ([33], [44]). Dans l'ensemble des essais réalisés, on n'a pas réussi à observer la phase de fluage tertiaire (rupture), puisque la contrainte constante axiale appliquée n'est pas très élevée pour ces essais. En fait, même après plus de 14 h de temps de chargement la rupture n'a pas été atteinte.

5.3 Le modèle de comportement développé

Tel qu'abordé précédemment, l'équation 2.1 a été utilisée pour identifier et déterminer la déformation de la glace. Dans le modèle présenté, la déformation totale est décomposée en trois termes de déformation (élastique, viscoélastique et permanente). Comme nous l'avons évoqué au chapitre 2, les auteurs considèrent que la déformation permanente est une déformation viscoplastique, où le fluage primaire n'est attribué qu'à la déformation transitoire produite par le comportement viscoélastique (déformation anélastique) ([2], [11]). Elle peut être considérée aussi comme la somme des déformations primaire et secondaire ([36]). Donc le fluage primaire est parfois considéré dans la littérature comme une déformation anélastique, mais il est interprété dans cette thèse comme une déformation permanente. C'est ainsi que notre analyse repose sur l'hypothèse de l'existence de la déformation plastique. Donc, la déformation permanente a été définie comme la somme des trois termes suivants : la déformation du fluage primaire, la déformation du fluage secondaire et une déformation plastique indépendante du temps.

Autrement dit, on a ajouté la déformation plastique à ce que les autres auteurs considèrent comme la déformation permanente, ce qui est exprimé comme :

$$\begin{cases} \varepsilon_{Totale} = \varepsilon_e + \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{permanente} \\ \varepsilon_{permanente} = \varepsilon_{pc} + \varepsilon_{sc} + \varepsilon_{plastique} \end{cases} \quad 5-1$$

Où ε_{Totale} est la déformation totale de la glace, ε_e et ε_{ve} sont respectivement les déformations élastique et viscoélastique de la glace qui sont récupérables (déformation recouvrable); ε_{pc} et ε_{sc} sont les déformations viscoplastiques liées au phénomène de fluage primaire et secondaire de la glace, et $\varepsilon_{plastique}$ est la déformation plastique non dépendante du temps. Pour le fluage primaire et la déformation viscoélastique, nous avons utilisé les équations 2.37 et 2.3, respectivement. Le fluage secondaire (ou fluage à l'état stationnaire) se déroule sur une période importante de temps et est caractérisé par une vitesse de déformation axiale minimale et constante. L'équation 4.1 qui représente la loi de Glen est utilisée avec les constantes (B et n) selon le Tableau 4-4 pour les températures -5,-10 et -15°C [32].

5.3.1 Détermination de la déformation permanente

Tel que mentionné dans la section 5.2.1, la longueur des échantillons avant la réalisation des essais (L_0), au moment du déchargement (L_1) et à la

fin de l'essai, i.e. que la stabilisation de la déformation (L_2) a été mesurée. La déformation permanente ($Ln (L_2/L_0)$) a été calculée plusieurs fois avec différents temps de chargement pour chaque température. Les valeurs moyennes de ce paramètre pour chaque température sont présentées au Tableau 5–2.

Tableau 5–2 : Les valeurs de déformation permanente réelles.

-5 °C		-10 °C		-15 °C	
Temps de chargement	Déformation permanente réelle	Temps de chargement	Déformation permanente réelle	Temps de chargement	Déformation permanente réelle
87 s	8,2778E-04	94 s	5,4837E-04	94 s	4,6338E-04
1767 s	1,0408E-03	1774 s	7,6923E-04	1774 s	7,7921E-04
4167 s	1,2983E-03	4174 s	1,0151E-03	4174 s	9,6668E-04

5.3.2 Détermination de la déformation plastique

En utilisant l'équation 4.1 et les constantes (B et n) présentées au Tableau 4–4, la déformation liée au fluage secondaire a été soustraite de la déformation permanente totale (Tableau 5–2) selon la température et le temps de chargement. Les valeurs qui sont présentées dans le Tableau 5–3

représentent la somme de la déformation liée au fluage primaire et de la déformation plastique.

Tableau 5–3 : Valeurs des déformations de fluage primaire et plastique.

-5 °C		-10 °C		-15 °C	
Temps de chargement	$\varepsilon_{pc} + \varepsilon_{plastique}$	Temps de chargement	$\varepsilon_{pc} + \varepsilon_{plastique}$	Temps de chargement	$\varepsilon_{pc} + \varepsilon_{plastique}$
87 s	8,205E-04	94 s	5,426E-04	94 s	4,612E-04
1767 s	8,925E-04	1774 s	6,603E-04	1774 s	7,335E-04
4167 s	9,484E-04	4174 s	7,589E-04	4174 s	8,588E-04

Puisque la déformation plastique est constante pour une valeur de contrainte appliquée et le fluage primaire est fonction du temps (équation 2.37), l'équation 5.2 avec les données du Tableau 5–3, a été utilisée pour déterminer la déformation plastique pour chacune des températures et contraintes appliquées.

$$\varepsilon_{primaire+plastique} = at^b + \varepsilon_{plastique} \quad 5-2$$

Dans cette équation, le terme at^b est équivalent au fluage primaire selon l'équation 2.37 i.e $b = M / (M + N)$ et $a = \left[\frac{M+N}{M} \left(\frac{\sigma}{K} \right)^N \right]^b$.

En utilisant l'option de régression non linéaire dans le logiciel Mathematica ([45]), les valeurs de déformation plastique ont été calculées pour chaque température (Tableau 5–4).

Tableau 5–4 : Déformation plastique en fonction de la température.

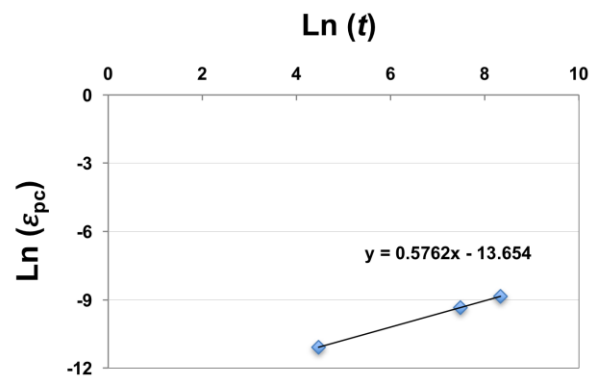
Contrainte constante appliquée (MPa)	Température °C	Déformation plastique
0.5	-5	8,051E-04
0.8	-10	5,200E-04
1	-15	2,370E-04

5.3.3 Identification du fluage primaire

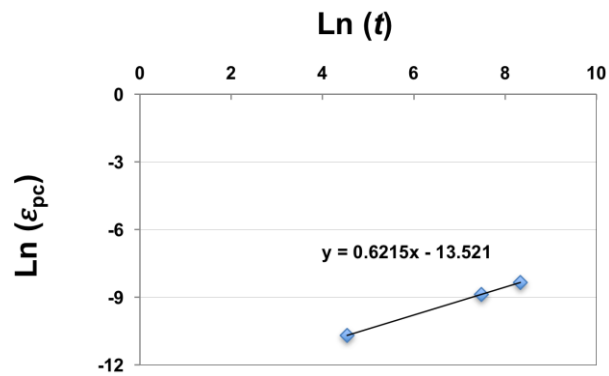
L'équation 2.37 a été choisie pour déterminer la déformation liée au fluage primaire dans la glace. Afin de déterminer les constantes utilisées dans cette équation (M , N , K), la déformation plastique $\varepsilon_{plastique}$ a été soustraite à partir des données du Tableau 5–3 pour obtenir les valeurs du fluage primaire. Ainsi, à partir de l'équation 5.3 ci-dessous, et en utilisant les valeurs de fluage primaire, les constantes (M , N , K) ont été déterminés. En effet, une droite de régression linéaire passant par les trois couples des valeurs mesurées à chaque température ($Ln(\varepsilon_{pc})$ en fonction de $Ln(t)$) a été

ajustée de telle sorte que la valeur b dans les équations 5.2 et 5.3 soit identique (Figure 5.4 a, b et c).

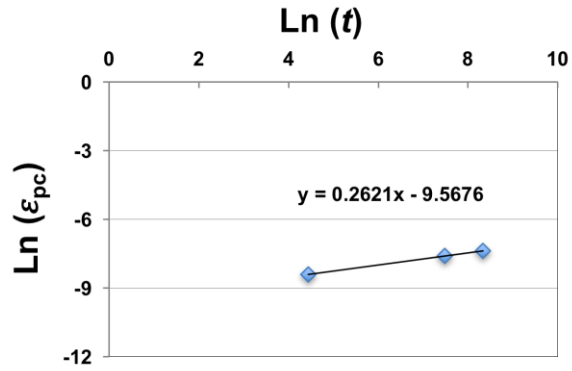
$$\begin{cases} \ln(\varepsilon_{pc}) = b * \ln\left(\frac{\left(\frac{\sigma}{K}\right)^N}{b}\right) + b * \ln(t) \\ b = \frac{M}{M+N} \end{cases} \quad 5-3$$



(a)



(b)



(c)

Figure 5.4: Droites de régression linéaire passant sur des résultats de déformation de fluage primaire : a) -5°C, b) -10°C, c) -15°C.

En utilisant les résultats de la régression linéaire et en trouvant la fonction de $\ln(\epsilon_{pc})$ en fonction de $\ln(t)$, on a préparé un jeu de données qui va servir à déterminer M , N et K , puisqu'avec seulement trois couples de données le processus d'optimisation n'est pas arrivé à converger. Ce jeu de données a été créé en utilisant la droite de régression selon l'équation 5.3 pour chaque température et en attribuant plusieurs valeurs à la variable temps t , de sorte que la valeur de ϵ_{pc} a été déterminée. Ce jeu de données a été utilisée avec la fonction *Findfit* du logiciel Mathematica pour déterminer les valeurs de N et de K dans l'équation 5.3. Par la suite, connaissant les paramètres N et b , on a pu déterminer le paramètre M avec la relation b

$$= \frac{M}{M+N}.$$

À titre d'exemple pour la température de -10°C , en utilisant l'équation 5.2 et les données du Tableau 5–3 pour cette température, la valeur des constantes a , b et c ont été établies : $a = 1.34244 \cdot 10^{-6}$, $b = 0.6215$, $c = 5.20\text{E-}04$. La valeur du paramètre c est égale à celle de la déformation plastique (voir Tableau 5–4). Afin de déterminer les paramètres du fluage primaire, et selon l'équation 5.3, tout en gardant la constante b égale à 0.6215, une droite de régression a été ajustée sur les données du fluage primaire pour la température de -10°C (Figure 5.4 b). Les valeurs des constantes M , N et K , ont été par la suite déterminés sur une base de données, créé en attribuant plusieurs valeurs à la variable temps t ($\text{Ln}(t)$) et la détermination de la valeur de $\text{Ln}(\varepsilon_{pc})$ a été obtenue en utilisant l'équation 5.3 (voir Tableau 5–5).

À l'aide des résultats du Tableau 5–5 et de la fonction Findfit de Mathematica, les valeurs des coefficients K et N ont été déterminées : $N = 15,523$, $K = 3,349$ pour la température de -10°C . Avec la valeur de N et sachant celle de b dans l'équation de la régression, la valeur de M a été déterminée comme étant 25,49. De la même manière, les paramètres M , N et K pour le fluage primaire ont été déterminés pour les autres températures, -5 et -15°C . Les résultats sont présentés dans le Tableau 5–6. Les détails de ces calculs sont présentés à l'annexe III.

Tableau 5–5 : Jeu de données créé pour déterminer les paramètres du fluage primaire à -10°C.

$(Ln(t))$	$Ln(\varepsilon_{pc})$	$(Ln(t))$	$Ln(\varepsilon_{pc})$
1,929418926	-12,32186614	3,395326393	-11,41080465
2,311753861	-12,08424498	3,415807728	-11,3980755
2,511883361	-11,95986449	3,435366507	-11,38591972
2,648360011	-11,87504425	3,454082271	-11,37428787
2,752048448	-11,81060189	3,472024698	-11,36313665
2,835690571	-11,75861831	3,489255168	-11,35242791
2,90579588	-11,71504786	3,505828034	-11,34212788
2,966141733	-11,67754291	3,52179165	-11,33220649
3,01911629	-11,64461923	3,537189226	-11,3226369
3,066325925	-11,61527844	3,552059534	-11,313395
3,108903128	-11,58881671	3,566437492	-11,3044591
3,147676324	-11,56471916	3,580354661	-11,29580958
3,183269844	-11,54259779	3,593839661	-11,28742865
3,216165902	-11,52215289	3,606918526	-11,27930014
3,24674471	-11,50314816	3,619615006	-11,27140927
3,275311355	-11,48539399	3,631950826	-11,26374256
3,302114377	-11,46873591	3,643945913	-11,25628762
3,327358934	-11,45304642	3,655618584	-11,24903305
3,351216345	-11,43821904	3,666985718	-11,24196838

Tableau 5–6 : Les paramètres M , N et K du fluage primaire pour chaque température.

Température	M	N	K
-5 °C	15	11	4,25
-10 °C	25,49	15,52	3,34
-15 °C	3,68	10,37	38,35

5.4 Identification de la déformation de recouvrance

La somme des déformations élastiques et viscoélastiques est la déformation de recouvrance. À chaque température et chaque temps de chargement, ces valeurs ont été calculées avec la relation $\ln(L_1/L_0) - \ln(L_2/L_0)$ et sont listées dans le Tableau 5–7.

Tableau 5–7 : Valeurs des déformations de recouvrance réelle.

-5 °C		-10 °C		-15 °C	
Temps de chargement	Déformation recouvrance	Temps de chargement	Déformation recouvrance	Temps de chargement	Déformation recouvrance
87 s	3,1617E-04	94 s	4,6969E-04	85 s	5,3096E-04
1767 s	5,0304E-04	1774 s	1,2062E-03	1765 s	1,3515E-03
4167 s	5,6842E-04	4174 s	1,2522E-03	4165 s	1,3085E-03

Pour calculer la déformation élastique, la loi de Hooke (σ/E) a été utilisée. Le module de Young a été considéré de 9,5 GPa [7].

Afin de calculer la déformation viscoélastique, les valeurs de déformation élastique ont été soustraites des valeurs du Tableau 5–7, ce qui a résulté le Tableau 5–8. Ces résultats ont été utilisés pour identifier la contribution de la déformation viscoélastique.

Tableau 5–8 : Valeurs des déformations viscoélastiques.

-5 °C		-10 °C		-15 °C	
Temps de chargement	Déformation Viscoélastique	Temps de chargement	Déformation Viscoélastique	Temps de chargement	Déformation Viscoélastique
87 s	2,635E-04	94 s	3,855E-04	87 s	2,635E-04
1767 s	4,504E-04	1774 s	1,122E-03	1767 s	4,504E-04
4167 s	5,158E-04	4174 s	1,168E-03	4167 s	5,158E-04

Pour l'identification des paramètres de cette déformation (viscoélastique ou élastique retardée) selon le modèle de Sinha [2], l'équation 2.3 a été utilisée avec des valeurs de d_1 et S considérées égales à 1 selon la suggestion de Sinha [2]. Nous avons considéré un diamètre de 3 mm pour les grains([31]). Le paramètre a_T dans l'équation 2.3 est dépendant de la température selon l'équation 2.5. La valeur de ce paramètre est $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ S}^{-1}$ à -10°C ; et pour les autres températures, sa valeur est calculée par la fonction Shift de WLF (équation 5.4). Où Q est l'énergie d'activation qui est de 65 kJ/mole pour la glace ([2]) et R est la constante des gaz parfaits qui est $8,3144 \cdot 10^{-3} \text{ KJ/mole}^\circ\text{K}$. Les valeurs du paramètre a_T pour -5 , -10 et -15°C sont présentées au Tableau 5–9.

$$\begin{cases} S_{1,2} = \text{Exp} \left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \\ \frac{a_{T_1}}{a_{T_2}} = S_{1,2} \end{cases} \quad 5-4$$

Tableau 5–9 : Paramètre a_T pour chaque température.

-5 °C	-10 °C	-15 °C
$a_T = 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ S}^{-1}$	$a_T = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ S}^{-1}$	$a_T = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ S}^{-1}$

En utilisant ce paramètre et les données du Tableau 5–8 et en se servant de l'équation 2.3, les valeurs des constantes c_1 et b ont été déterminées, et sont présentées au Tableau 5–10.

Tableau 5–10 : Constantes de la déformation viscoélastique en fonction de la température.

-5 °C		-10 °C		-15 °C	
b	c_1	b	c_1	b	c_1
0,255	42,448	0,45	71,16	0,45	72,17

5.5 Interprétation des résultats

5.5.1 Effet de la température sur la déformation plastique

Tel que mentionné dans la section précédente, la déformation plastique a été calculée à chaque température avec différentes contraintes ((-5, 0,5 MPa), (-10, 0,8 MPa) et (-15, 1 MPa)). Ces valeurs sont présentées à la Figure 5.5.

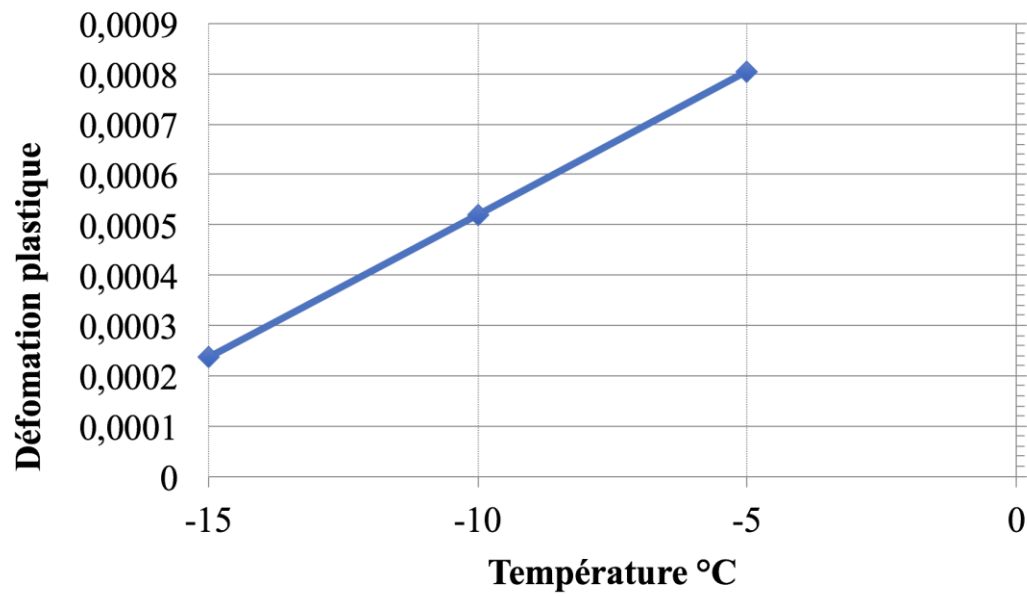


Figure 5.5 : Valeurs de déformation plastique en fonction de la température.

5.5.2 Variation des paramètres de fluage primaire en fonction de la température

Les constantes M , N et K utilisées dans l'identification du fluage primaire ont été calculées dans la section précédente afin d'identifier la relation du fluage primaire en fonction du temps (Figure 5.6).

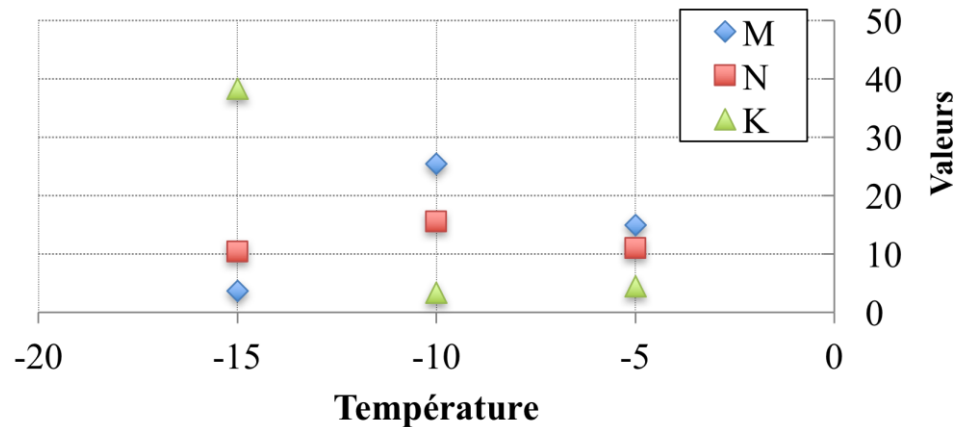


Figure 5.6 : Variation des paramètres M , N et K identifiant le fluage primaire en fonction de la température.

Tel que mentionné dans la section précédente, le paramètre N est l'exposant de viscosité; il est de l'ordre de 2 pour des matériaux très visqueux et de l'ordre de 100 pour des matériaux peu visqueux, bien que les valeurs obtenues pour la glace se situent entre 10 et 15,5. En ce qui concerne le paramètre M , il est l'exposant d'écrouissage qui varie de 2 à 50 pour les métaux [44]; la gamme de variation obtenue pour la glace granulaire isotrope est de 3 à 25,4. Par contre, le paramètre K , qui dépend de la résistance et varie de 100 à 1000 MPa pour les métaux, est largement inférieur à 100 pour la glace puisque celle-ci est moins résistante par rapport aux métaux. De plus, la variation de ce paramètre en fonction de la température n'est pas aussi élevée, puisque la résistance de la glace dans cette gamme de température est entre 1 et 3 MPa [32], ce qui n'est pas très significatif.

5.5.3 Variation des paramètres de déformation viscoélastique en fonction de la température

Comme on voit au Tableau 5–10, la valeur du paramètre b augmente avec la diminution de la température, dans l'intervalle de -5 à -10 °C, alors qu'il demeure constant dans l'intervalle -10 à -15 °C. On observe le même phénomène pour le paramètre c_1 en rapport avec ces deux intervalles.

5.6 Contribution des déformations

5.6.1 Contribution des différentes composantes de déformation dans la déformation totale

Afin de déterminer la contribution de chaque composante de déformation en fonction du temps, les paramètres identifiés pour chacun de ces composantes, c_1 et b pour la déformation viscoélastique, M , N et K pour le fluage primaire, ainsi que B et n pour le fluage secondaire sont utilisés dans les équations 2.3, 2.37 et 4.1 respectivement. Pour chaque temps t et à une température donnée, la valeur de chacune de ces composantes est divisée par la valeur de la déformation totale. Ces contributions en fonction du temps sont présentées à la Figure 5.7.

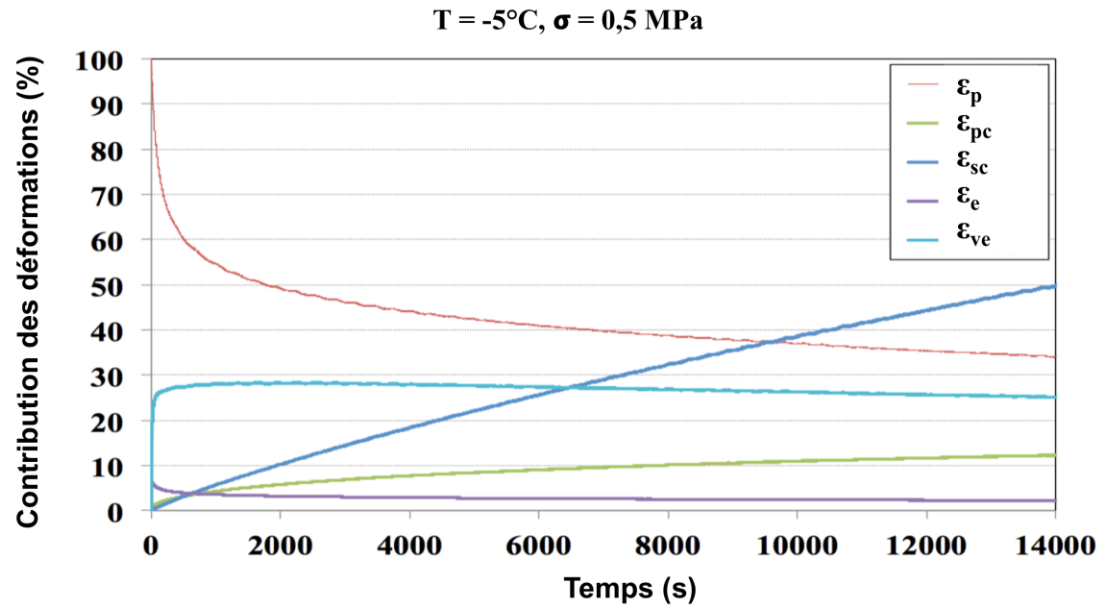
En ce qui concerne la valeur de la déformation plastique, elle est constante à chaque température (Tableau 5–4). Comme on peut le constater à la Figure 5.7-a, la contribution de la déformation plastique dans la déformation totale de la glace liée à des contraintes de compression uniaxiale est très grande par rapport aux autres composantes de la déformation pour la température de -5°C . Toutefois, cette différence diminue lorsque la température baisse. Pour toutes les températures en général, on peut dire que la contribution de cette composante de la déformation est relativement importante.

Pour la contribution à la déformation de fluage primaire, comme on peut aussi le voir dans la majorité des matériaux [44], elle est plus importante au début du processus de chargement, alors que celle liée au fluage secondaire prend le relai par la suite.

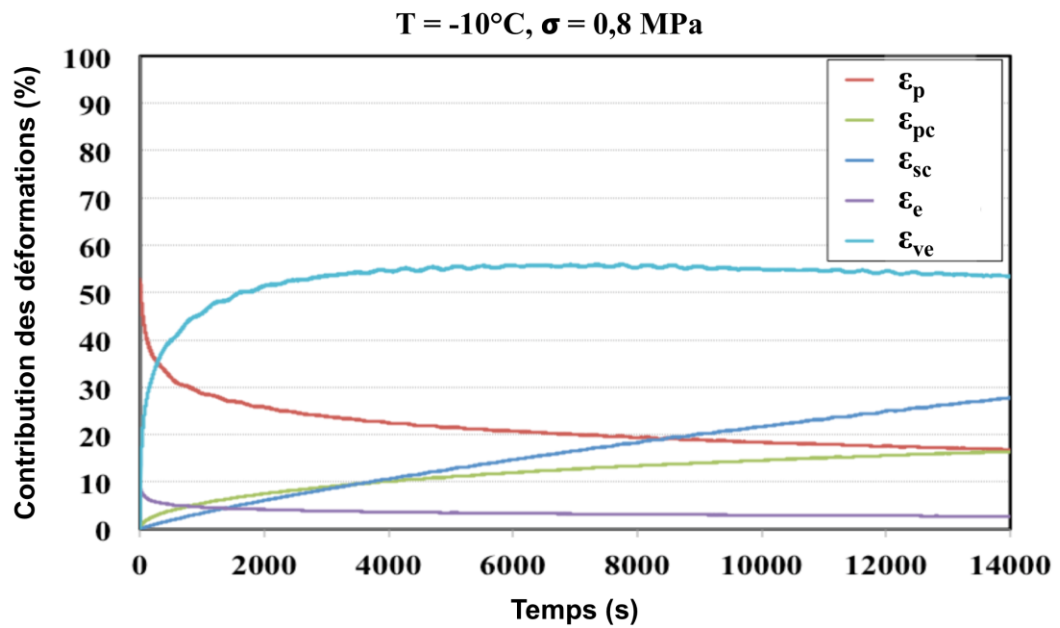
Pour chaque valeur de température, la déformation élastique durant les essais demeure pratiquement constante puisque le module de Young et le niveau de contrainte durant l'essai sur la glace sont considérés comme constants; cependant la contribution de cette déformation est importante au début de la phase de chargement, puis elle diminue légèrement avec le temps.

Concernant la déformation viscoélastique, comme celle du fluage primaire, sa contribution pour les trois valeurs de température augmente

considérablement au début du chargement et par la suite elle diminue légèrement.



(a)



(b)

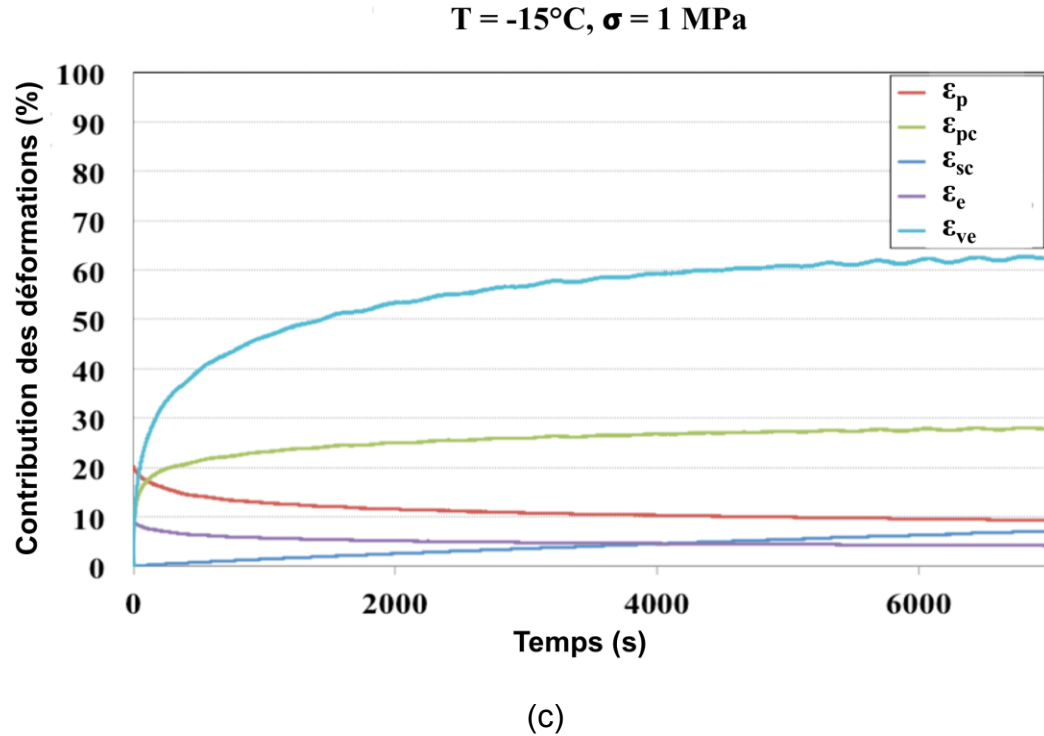
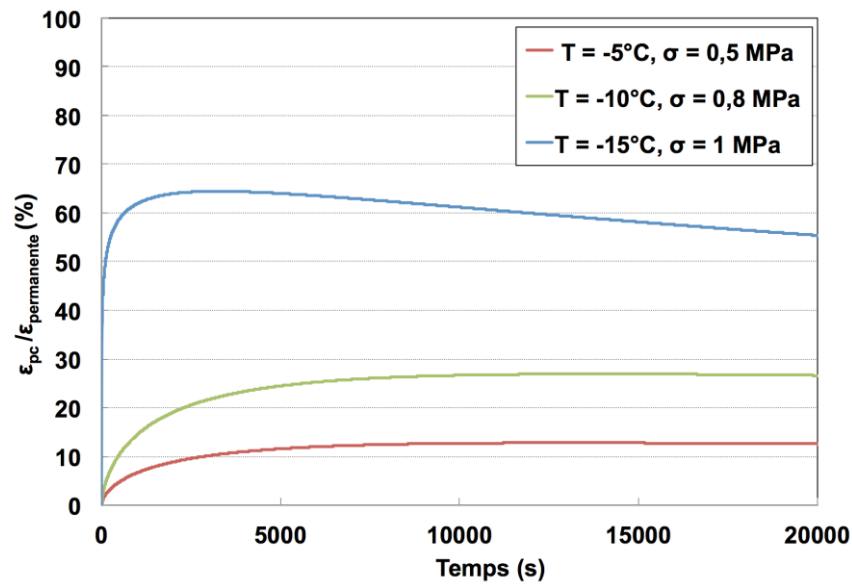


Figure 5.7: Contribution des composantes de la déformation en fonction du temps à des température a) -5°C b) -10°C , c) -15°C .

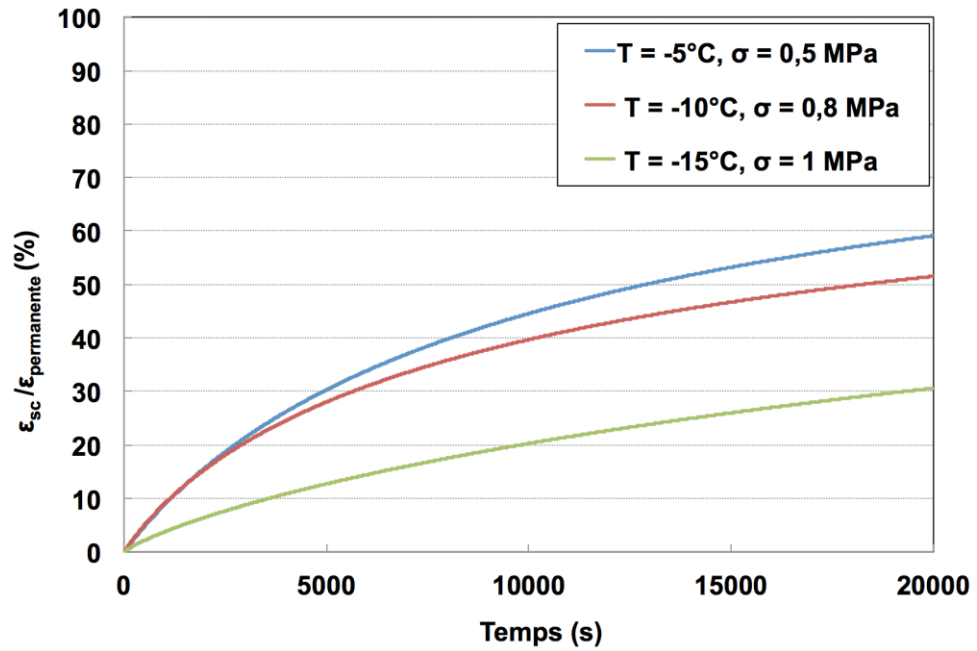
5.6.2 Effet de la température sur la contribution des déformations

Un élément novateur de ce travail est la prise en compte de la déformation plastique instantanée, de même que la vérification de l'effet de la température sur la contribution de cette déformation dans la déformation permanente. Ainsi, la contribution des deux autres composantes (fluage primaire et secondaire) dans la déformation permanente a été calculée en fonction de la température (Figure 5.8). Comme on peut voir dans cette figure, la contribution du fluage primaire dans la déformation permanente augmente de façon très prononcée lorsque la température diminue. À une

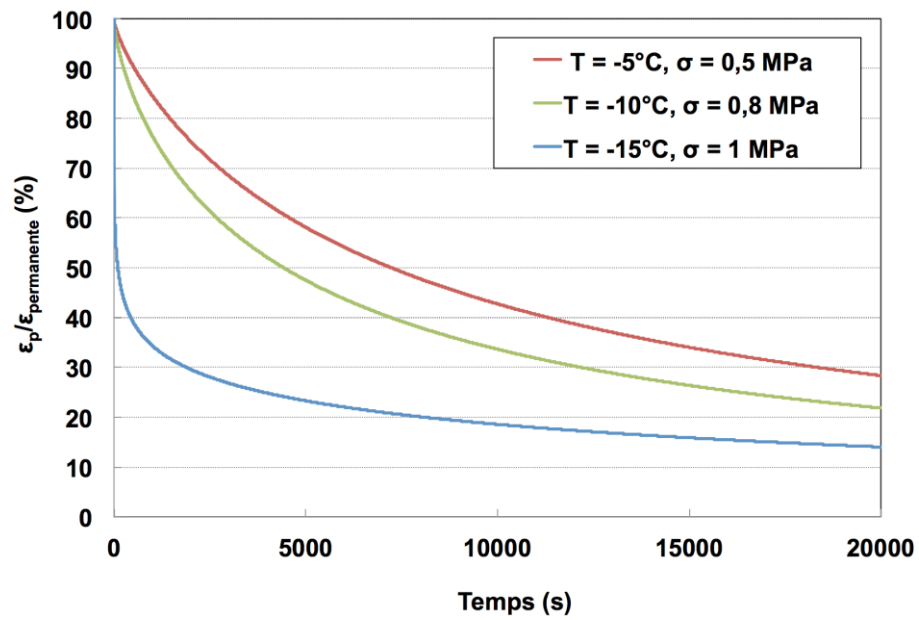
température de -5°C , qui est proche du point de fusion de la glace, la contribution du fluage primaire est plus basse que par rapport aux températures de -10 et -15°C (Figure 5.8-a). Pour le fluage secondaire, contrairement au fluage primaire, sa contribution augmente, dans la déformation permanente lorsque la température augmente. La contribution du fluage secondaire dans la déformation permanente est moins élevée pour -15°C que pour -5°C (Figure 5.8-b). Pour la déformation plastique (Figure 5.8-c), la contribution de cette déformation, dans la déformation permanente, est en relation proportionnelle avec la température.



(a)



(b)



(c)

Figure 5.8 : Contribution de plusieurs composantes de déformation en fonction de la température a) Fluage primaire b) Fluage secondaire c) plastique.

5.7 Validation du modèle développé

5.7.1 Déformation plastique instantanée

Afin de valider l'existence de la déformation plastique instantanée dans la procédure de compression de la glace, on a appliqué un chargement instantané sur un échantillon de glace à température constante. Ceci a été effectué pour mesurer la déformation permanente. Ensuite, on a comparé les valeurs de cette dernière avec celles calculées en utilisant le modèle de comportement développé dans ce chapitre. Pour cela, deux essais de compression simple à -10°C ont été réalisés. La déformation permanente a été déterminée en mesurant la longueur des échantillons avant et après l'application du chargement en accordant un temps suffisant pour la stabilisation et récupération de toutes les déformations récupérables.

Le problème rencontré avec la machine MTS utilisée, ou plus généralement pour tout essai mécanique avec n'importe quelle machine du même genre, est qu'on ne peut pas vraiment appliquer un chargement instantané. Par exemple, si on veut appliquer un chargement constant de 0,8 MPa, on partira de 0 pour augmenter linéairement le chargement jusqu'au chargement désiré, le processus de stabilisation du chargement prenant

environ 30 secondes. On ne peut donc pas appliquer un chargement instantané. Deux essais ont été réalisés à température -10°C et contrainte constante de 0,8 MPa. La déformation permanente mesurée est présentée au Tableau 5–11.

Tableau 5–11 : Détermination de la déformation permanente dans les deux essais de validation.

	Essai 1	Essai 2
La longueur initiale (L_0 (mm))	1,250E+02	1,250E+02
La longueur secondaire (L_2 (mm))	1,250E+02	1,250E+02
Déformation permanente	6,400E-04	5,180E-04

Malgré le fait que la contribution de fluage primaire et secondaire durant les 30 secondes du temps de chargement soit négligeable, ces déformations ont été calculées avec les équations 2.37 et 4.1 en utilisant les constantes calculées pour ces déformations à la température -10°C .

Les essais de fluage ont été réalisés avec une contrainte constante. Puisque le chargement appliqué augmente de 0 à 0,8 MPa linéairement sur 30 secondes et ensuite s'arrêter, nous avons considéré une vitesse de contrainte égale à $0,8/30$ sur une durée de 30 secondes, et calculé la contrainte pour chaque seconde de chargement. Ensuite, les déformations de fluage primaire et secondaire ont été calculées avec les contraintes calculées

pour chaque seconde sur la durée de 30 secondes. Les contraintes pour les 8 premières secondes sont montrées à la Figure 5.9. Les valeurs de déformation primaire et secondaire ont été calculées sur 30 secondes, tel que présentées au Tableau 5–12.

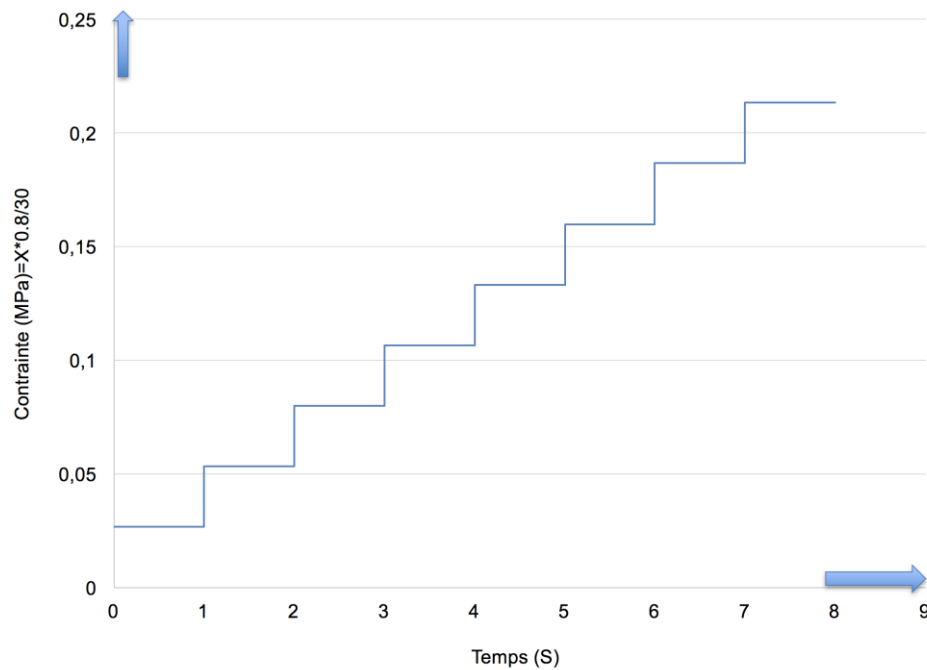


Figure 5.9 : Les valeurs des contraintes pour chaque huit secondes de chargement pour déterminer les déformations de fluage primaire et secondaire.

On a aussi calculé la déformation plastique instantanée en soustrayant les déformations liées au fluage primaire et secondaire aux valeurs de déformation permanente qui ont été calculées (Tableau 5–12).

Tableau 5-12 : Les valeurs des déformations de fluage primaire, secondaire, et plastique dans l'essai validation à température de -10°C.

	Essai 1	Essai 2
Fluage primaire (ε_{pc})	4,49E-06	4,49E-06
Fluage secondaire (ε_{sc})	3,87E-07	3,87E-07
Déformation plastique (ε_p)	6,35E-04	5,14E-04

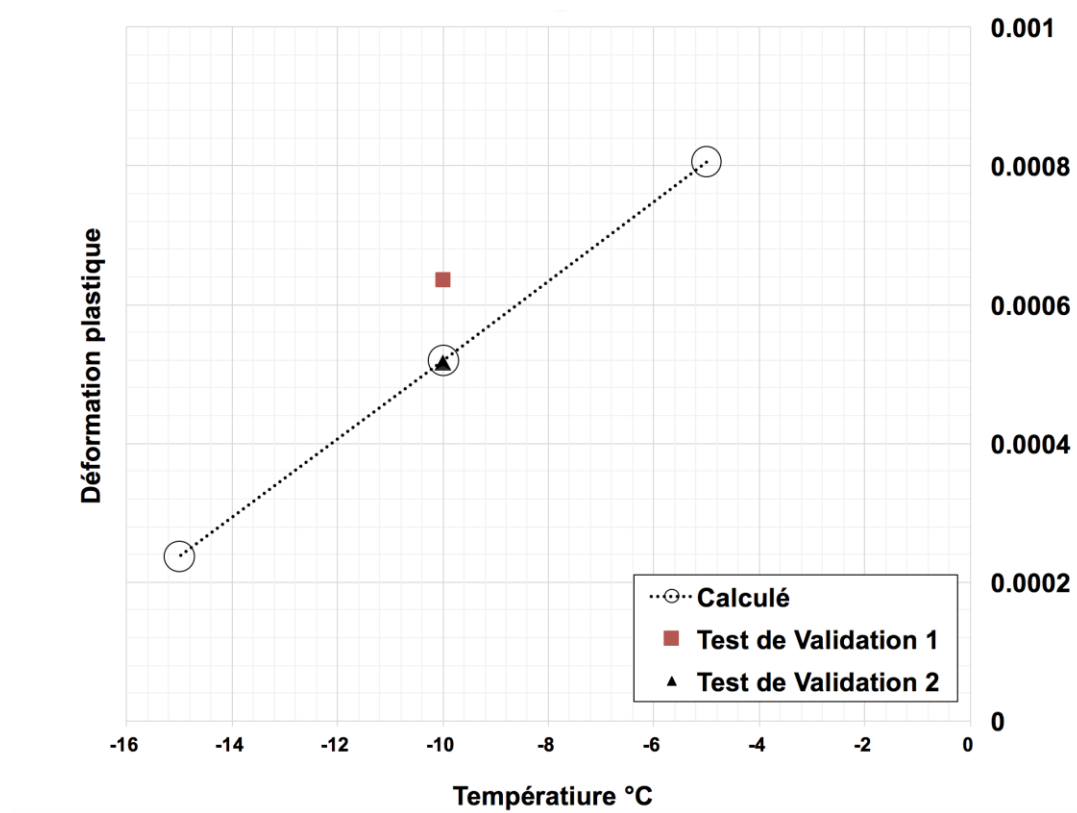


Figure 5.10 : Validation de la déformation plastique à -10°C.

Afin de valider la déformation plastique calculée par le modèle (Figure 5.5), les résultats des essais de validation ont été superposés sur cette figure et ils

sont présentés sur la Figure 5.10. Comme on peut le voir dans la Figure 5.10, les résultats des essais instantanés sont très proches des résultats des déformations plastiques liées à des essais de fluage à -10°C .

5.7.2 Validation de fluage secondaire

Comme on a vu à la section 4.2.4, les valeurs des constantes B et n dans la loi de Glen ([25]) ont été déterminées par les valeurs de contrainte au plateau des essais de compression uniaxiale (essais avec la vitesse de déformation constante). Afin de valider ces données, il fallait déterminer les valeurs des paramètres B et n par les essais de fluage, et les comparer avec celles des essais de compression uniaxiale avec la vitesse de déformation constante. Puisque les essais de fluage ont été réalisés pour une seule valeur de contrainte, il n'était pas possible de déterminer les valeurs de B et n . Par contre, nous avons pu déterminer la vitesse de déformation ($\dot{\epsilon}$) avec les essais de fluage, laquelle est équivalente à la pente de la courbe de déformation en fonction de temps dans la partie de fluage secondaire. La vitesse de déformation a été calculée également par les valeurs de B et n déterminées pour chaque température en utilisant la loi de Glen (équation 4.1). Ces valeurs sont présentées dans le Tableau 5–13.

**Tableau 5–13 : les vitesses de déformation déterminée par l'essais
de fluage et la loi de Glen**

Température/ Contrainte appliquée	$\dot{\epsilon}$ Calculé par loi de Glen	$\dot{\epsilon}$ Déterminé par des essais fluage
T= -5°C / $\sigma=0,5$ Mpa	$8,4 \cdot 10^{-8}$	$9,07 \cdot 10^{-8}$
T= -10°C / $\sigma=0,8$ Mpa	$6,14 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$
T= -15°C / $\sigma=1$ Mpa	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$

Comme on voit dans le tableau 5-13, les valeurs mesurées par essais de fluage sont très proches de celles calculées par la loi de Glen.

5.8 Conclusion

L'existence de la déformation plastique instantanée pour la glace isotrope à plusieurs températures a été vérifiée et calculée. Cette déformation n'est pas dépendante du temps, mais varie selon la température et augmente avec l'augmentation de la température puisque l'écoulement plastique dans la glace à des températures plus proches du point de fusion est plus élevé par rapport à la température loin du point de fusion.

Les constantes M , N et K pour le fluage primaire ont été déterminés. La gamme de valeurs du paramètre M ou exposant d'écrouissage est de 3 à 25,4. La variation du paramètre N qui est l'exposant de la viscosité est entre

10 et 15,5. La gamme de valeurs du paramètre K qui est dépendant de la résistance des matériaux est comprise entre 3 à 38,3.

La contribution de chaque composante de la déformation dans la déformation totale en fonction du temps à chaque valeur de température et de contrainte appliquée a été calculée. Les résultats permettent deux observations.

- La contribution de la déformation plastique dans la déformation totale est très importante par rapport aux autres composantes de déformation à une température proche du point de fusion. Les résultats d'analyse montrent aussi que pour toutes les températures, la contribution de cette composante est importante dans la déformation de la glace.
- Pour la contribution de déformation de fluage primaire, on a observé qu'au début du processus de chargement, la contribution de cette déformation est plus importante; par la suite, c'est la contribution de déformation liée au fluage secondaire qui devient plus importante.

Les effets de la température avec différentes valeurs de contrainte i.e. (-5°C, 0,5 MPa), (-10°C, 0,8 MPa) et (-15°C, 1 MPa) sur la contribution des différentes composantes de la déformation permanente dans le processus de fluage ont été étudiés. Les résultats permettent trois autres observations.

- La contribution du fluage primaire dans la déformation permanente augmente de façon très prononcée avec la diminution de la température.
- Pour le fluage secondaire, contrairement au fluage primaire, la contribution de cette composante de déformation dans la déformation permanente augmente avec l'augmentation de la température.
- La contribution de la déformation plastique dans la déformation permanente diminue lorsque la température baisse.

CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

6.1 Conclusions

La recherche réalisée dans le cadre de cette thèse concerne le développement d'un modèle de comportement uniaxial pour la déformation de la glace isotrope en compression. Elle a été motivée par la nécessité d'approfondir nos connaissances sur le givrage atmosphérique qui est à la source de dommages importants et récurrents sur les réseaux de transport aérien de l'énergie électrique, particulièrement en ce qui a trait au délestage naturel de la glace de câbles et de conducteurs de ces réseaux. Pour éviter ou diminuer le risque d'occurrence de ce phénomène, il est nécessaire de connaître et de comprendre le comportement mécanique de la glace, particulièrement le comportement en déformation de la glace isotrope polycristalline, le type de glace choisi pour cette étude.

Le thème principal abordé dans cette recherche était de développer un modèle de comportement de la glace polycristalline isotrope en compression. Pour développer ce modèle, plusieurs objectifs ont été réalisés :

- ✚ *Développement d'une procédure de fabrication de glace avec un minimum de porosité et d'anisotropie ;*
- ✚ *Détermination du comportement visqueux de la glace en fonction de la température ;*
- ✚ *Étude de la présence de déformation plastique instantanée de la glace en compression ;*

 Détermination de la contribution de chacune partie de la déformation dans la déformation totale.

Les principaux résultats intermédiaires et conclusions de ce travail sont les suivants :

- Afin de obtenir des échantillons avec une faible porosité et une isotropie des axes C, trois procédés de fabrication de glace ont été vérifiés expérimentalement à cet effet. On a observé qu'il n'y avait pas de différence significative entre les trois procédés dans les résultats des essais de compression simple effectuée sur différents échantillons, peut-être en raison de la proximité des résultats avec la porosité et le degré d'anisotropie. Cependant, le procédé dans lequel de l'eau dégazée et déionisée est ajoutée aux particules de glace sous vide (voir méthode 2) a été sélectionné en tant que procédure de fabrication de la glace, car il donne un degré d'anisotropie et de porosité inférieurs en comparaison avec les deux autres méthodes.
- En première approche, une série d'essais en compression uniaxiale a été menée sur des échantillons fabriqués par le procédé choisi. Les essais ont été réalisés à des températures de -5, -10 et -15°C et la vitesse de déformation axiale a été choisie comme l'autre variable. Avec les résultats expérimentaux obtenus, on a réussi à caractériser de comportement visqueux de la glace isotrope. Les valeurs obtenues

pour les paramètres de comportement visqueux montrent une tendance accrue vers un comportement visqueux lorsque la température varie de -15 à -10 °C, ainsi que de -10 à -5 °C.

- Les modèles présentés dans la littérature sur la glace ne considèrent pas l'existence d'une déformation inélastique instantanée qui est présente dans d'autres matériaux cristallins, tel que les métaux. Donc dans la présente étude, cependant, une déformation de type permanente (plastique) a été également considérée, en plus du fluage primaire et du fluage secondaire. Ce type de déformation est indépendant du temps, mais il varie selon la température; en effet, ce type de déformation augmente avec l'augmentation de la température pour les essais effectués dans ce travail avec les paramètres sélectionnés.
- Trois paramètres (M , N et K) relatifs à la déformation permanente de la glace due au fluage primaire ont été identifiés. Ces paramètres dépendent de la température. La variation des paramètres M et N sont dans la gamme des valeurs trouvées dans la littérature. Par contre, la gamme de variation du paramètre K , qui est dépendante de la résistance des matériaux, ne correspond pas à celle des métaux, ce qui est normal, puisque la résistance de la glace est énormément moindre que celle des métaux.

En se basant sur une modélisation non-unifiée incluant des déformations élastique, viscoélastique, le fluage primaire, le fluage secondaire et plastique, on a analysé les résultats expérimentaux afin d'obtenir la valeur et la contribution des composantes recouvrables et irréversibles de déformation dans la déformation totale en fonction du temps, Voici les observations que l'on a pu en tirer.

- Pour chaque température, la déformation élastique durant les essais était constante puisque le module de Young et le niveau de contrainte sont constants, mais sa contribution en début de phase initiale de chargement est importante et elle diminue légèrement avec le temps.
- Au début du chargement, la contribution de la déformation viscoélastique augmente et par la suite elle diminue légèrement pour les trois températures.
- On a observé que la contribution quantitative du fluage primaire dans la déformation totale est importante, en particulier dans les étapes initiales de la charge de la glace. Toutefois, cette contribution diminue à mesure que le temps de chargement augmente et que la déformation liée au fluage secondaire s'effectue.
- Contrairement aux modèles déjà présentés dans la littérature pour la glace, la contribution de la déformation plastique est relativement

importante pour les essais effectués dans ce travail avec les paramètres sélectionnés.

Les effets de la température sur la contribution des trois composantes de la déformation inélastique (plastique, de fluage primaire et de fluage secondaire) à plusieurs valeurs de température et de contrainte appliquée i.e. (-5°C, 0,5 MPa), (-10°C, 0,8 MPa) et (-15°C, 1 MPa) ont été calculés et on peut conclure :

- Les calculs de la contribution du fluage primaire dans la déformation permanente montrent qu'elle augmente de façon très prononcée lorsque la température diminue.
- La contribution du fluage secondaire dans la déformation permanente augmente lorsque la température augmente.
- La contribution de la déformation plastique augmente lorsque la température augmente.

6.2 Perspectives

À la suite de ce travail de recherche, les sujets suivants devraient être approfondis :

- Étude de l'effet de la porosité de la glace sur plusieurs parties de déformation en prenant en compte la déformation plastique.

- Détermination des composantes de déformation de la glace colonnaire en incluant la composante de déformation plastique introduit dans ce travail.
- Étude de l'effet de contrainte sur la déformation plastique selon la température.
- Comparaison de plusieurs modèles rhéologiques existants dans la littérature, dont la plupart sont présentés dans cette thèse, et choix du modèle qui sera le plus performant par rapport aux résultats expérimentaux.
- Les études réalisées confirment que la présence d'un champ électrique affecte la structure de la glace accumulée sur les conducteurs. En général, et dans certaines conditions, la quantité et la densité des dépôts de glace diminuent avec l'augmentation du champ électrique à la surface des conducteurs haute tension. Cette diminution de la quantité et de la densité des dépôts est plus prononcée en courant continu sous tension négative que sous tension positive et alternative. Il serait par conséquent intéressant d'évaluer les effets de ce champ sur le modèle de comportement développé et notamment sur différentes parties de déformation en prenant en compte la température et le niveau de contrainte appliqué.

RÉFÉRENCES

- [1] Skyscan-Bruker-Microct, “Morphometric parameters measured by SkyscanTM CT- analyser software,” bruker microct, Kontich, Belgium, 2016.
- [2] N. K. Sinha, “Creep model of ice for monotonically increasing stress,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 25–33, Aug. 1983.
- [3] M. Kermani, “Ice shedding from cables and conductors – a cracking model of atmospheric ice, Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Quebec, Canada, 2007.
- [4] A. Cabanes, “C Microphysique du manteau neigeux. Evolution de la surface spécifique de la neige dans les Alpes et l’Arctique. Impact sur la chimie atmosphérique, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble I, 1992.
- [5] V. F. Petrenko and R. W. Whitworth, *Physics of Ice*. Oxford University Press, New York, USA, Chap 8. ISBN: 0-19-851895-1, 1999.
- [6] M. Eskandarian, “Ice shedding from overhead electrical lines by mechanical breaking: a ductile model for viscoplastic behaviour of atmospheric ice,” Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Quebec, Canada, 2005.
- [7] N. K. Sinha, “Elasticity of natural types of polycrystalline ice,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 127–135, 1989.
- [8] M. Farzaneh, *Atmospheric Icing of Power Networks*. Springer Science

& Business Media, ISBN 978-1-4020-8531-4, 2008.

- [9] B. Michel, *Ice mechanics*. Presses de l'université Laval, ISBN: 978-0774668767, 1978.
- [10] 2011. Singh V.P, Singh, and U. Haritashya, Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Springer Science & Business Media, "Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers," *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht, p. 1300, 2011.
- [11] A. Derradji-Aouat, N. K. Sinha, and E. Evgin, "Mathematical modelling of monotonic and cyclic behaviour of fresh water columnar grained S-2 ice," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 1, pp. 59–81, 2000.
- [12] Dantl G, "Elastic moduli of ice," In Physics of ice (ed N. Riehl, B. Bullemer and H. Engelhardt), pp. 223–30, Plenum press, New York, 1969.
- [13] E. R. Pounder and M. P. Langleben, "Arctic Sea Ice of Various Ages: II. Elastic Properties," *J. Glaciol.*, vol. 5, no. 37, pp. 99–105, 1964.
- [14] M. F. Markham, "Correlation between the elastic constants of polycrystalline aggregates and single crystals," *Mat. Res.*, vol. 1, p. 107–114, 1962.
- [15] U. Nakaya, "Visco-elastic properties of snow and ice in the Greenland ice cap," Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Ser. 2, Physics , 5(3): 119-164 1959.
- [16] M. Kermani, M. Farzaneh, and R. Gagnon, "Compressive strength of

- atmospheric ice,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 3, pp. 195–205, Sep. 2007.
- [17] A. M. A. Mohamed and M. Farzaneh, “An experimental study on the tensile properties of atmospheric ice,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 3, pp. 91–98, Sep. 2011.
 - [18] N. K. Sinha, “Rheology of columnar-grained ice,” *Exp. Mech.*, vol. 18, no. 12, pp. 464–470, 1978.
 - [19] N. K. Sinha, “Intercrystalline cracking, grain-boundary sliding, and delayed elasticity at high temperatures,” *J. Mater. Sci.*, vol. 19, no. 2, pp. 359–376, Feb. 1984.
 - [20] M. F. Ashby and P. Duval, “The creep of polycrystalline ice,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 3, pp. 285–300, Nov. 1985.
 - [21] D. H. Choi and J. J. Connor, “A constitutive creep model for single crystal ice,” *Mech. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 97–112, 1997.
 - [22] R. Duddu and H. Waisman, “A temperature dependent creep damage model for polycrystalline ice,” *Mech. Mater.*, vol. 46, pp. 23–41, 2012.
 - [23] D. G. Karr and K. Choi, “A three-dimensional constitutive damage model for polycrystalline ice,” *Mech. Mater.*, vol. 8, no. 1, pp. 55–66, Aug. 1989.
 - [24] S. Murakami, “Notion of Continuum Damage Mechanics and its Application to Anisotropic Creep Damage Theory,” *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 105, no. 2, pp. 99–105, Apr. 1983.

- [25] J. W. Glen, "The Creep of Polycrystalline Ice," *Proc. R. Soc. Lond. A. Math. Phys. Sci.*, vol. 228, no. 1175, pp. 519–538, Mar. 1955.
- [26] J. Weertman, "Creep Deformation of Ice," *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 11, no. 1, p. 494, 1983.
- [27] R. W. Neu and H. Sehitoglu, "Thermomechanical fatigue, oxidation, and Creep: Part II. Life prediction," *Metall. Trans. A*, vol. 20, no. 9, pp. 1769–1783, 1989.
- [28] M. Mellor and D. M. Cole, "Deformation and failure of ice under constant stress or constant strain-rate," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 201–219, 1982.
- [29] A. Derradji-Aouat, N. K. Sinha, and E. Evgin, "Practical elastic moduli for polycrystalline ice," 13th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Houston, TX, 27 February - 3 March 1994.
- [30] A. Pralong, "Dynamic damage model of crevasse opening and application to glacier calving," *J. Geophys. Res.*, vol. 110, no. B1, p. B01309, 2005.
- [31] A. Goubert, "Fluage de la glace polycristalline en compression uniaxiale," Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, Grenoble, France, 1993.
- [32] M. Seifaddini, G. Aryanpour, and M. Farzaneh, "Structural properties and simple compression behavior of laboratory-made polycrystalline

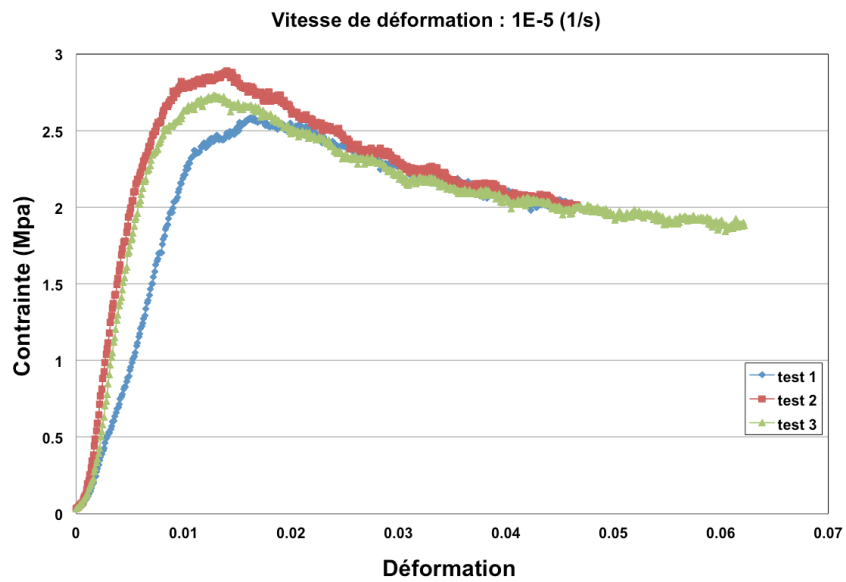
- isotropic ice at high temperatures,” *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, Aug. 2017.
- [33] S. Wang, J. Qi, Z. Yin, J. Zhang, and W. Ma, “A simple rheological element based creep model for frozen soils,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 106–107, pp. 47–54, Oct. 2014.
 - [34] S. P. C. Marques and G. J. Creus, *Computational Viscoelasticity*. Springer Science & Business Media, 4 janv., ISB 978-3-642-25311-9, 2012 - 124 pages.
 - [35] Y. Ye, X. Yang, and C. Chen, “Experimental researches on visco-elastoplastic constitutive model of asphalt mastic,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 10, pp. 3161–3165, 2009.
 - [36] G. Aryanpour and M. Farzaneh, “Contribution of Primary Creep in Modeling the Mechanical Behavior of Polycrystalline Ice,” *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, vol. 135, no. 3, p. 31502, Jun. 2013.
 - [37] G. Lambrinos, J. Aguirre-Puente, and M. Sally, *Experimental Research on the Sublimation of Ice Samples*. Gauthier-Villars, 1987.
 - [38] J. Druez, D. D. Nguyen, and Y. Lavoie, “Mechanical properties of atmospheric ice,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 67–74, Oct. 1986.
 - [39] D. H. Choi and J. J. Connor, “A constitutive creep model for single crystal ice,” *Mech. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 97–112, Mar. 1997.
 - [40] P. Mansuy, “Contribution à l’étude du comportement viscoplastique

d'un multicristal de glace : hétérogénéité de la déformation et localisation expériences et modèles,” Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, Grenoble, France, 2001.

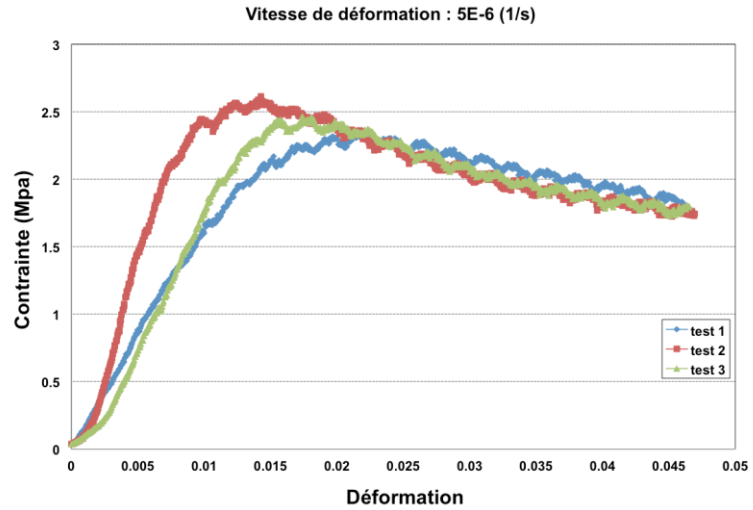
- [41] J. W. Glen, “The Creep of Polycrystalline Ice,” *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.*, vol. 228, no. 1175, p. 519 LP-538, Mar. 1955.
- [42] F. Grennerat, “Hétérogénéités de déformation au cours du fluage transitoire de la glace polycristalline. Mesures par corrélation d’images numériques et modélisation,” Université de Grenoble, Grenoble, France, 2011.
- [43] J. Meyssonier and A. Goubert, “Transient creep of polycrystalline ice under uniaxial compression: an assessment of internal state variable models,” *Ann. Glaciol.*, vol. 19, pp. 55–63, 1994.
- [44] J. Lemaitre, J. Chaboche, A. Benallal, and R. Desmorat, *Mécanique des Matériaux Solides*. Dunod, EAN :9782100541331, 580 pages, 2009.
- [45] Wolfram, “Mathematica (<https://www.wolfram.com/mathematica/>).” 2016.

ANNEXES

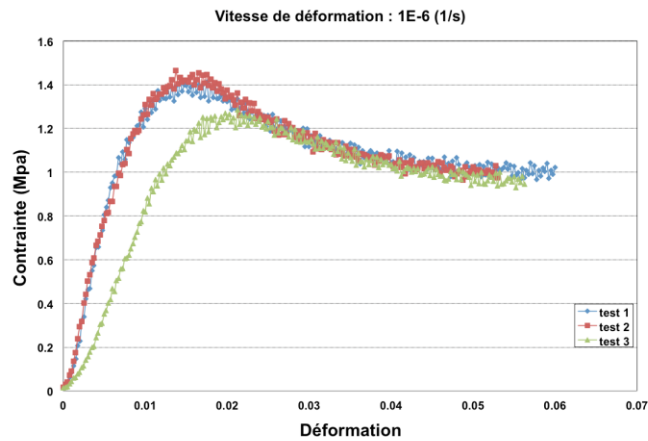
Annexe I : Les résultats des essais de contrainte-déformation dans l'essai de compression uniaxiale



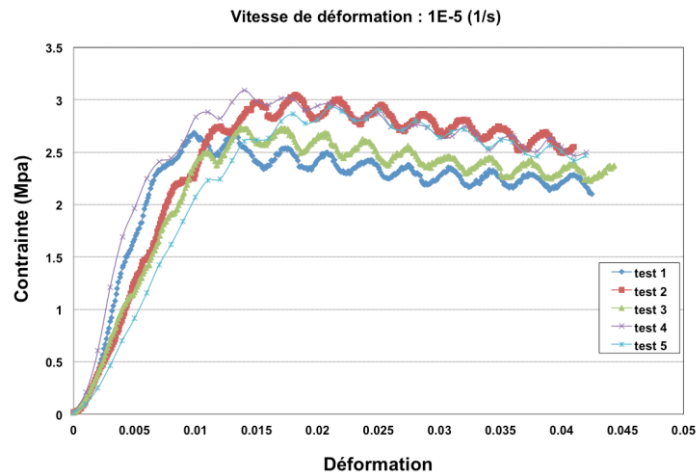
Les courbes de contrainte-déformation obtenues à la températures -5°C et vitesse de déformation axiale $1E-5$ (1/s) .



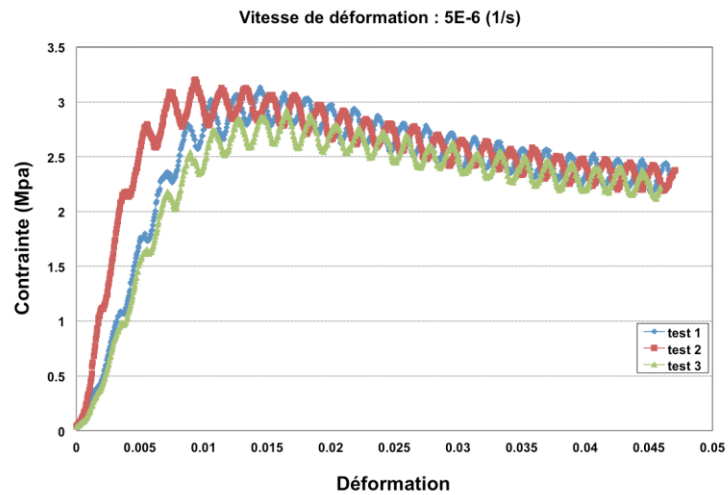
Les courbes de contrainte-déformation obtenues à la températures -5°C et vitesse de déformation axiale 5E-6 (1/s).



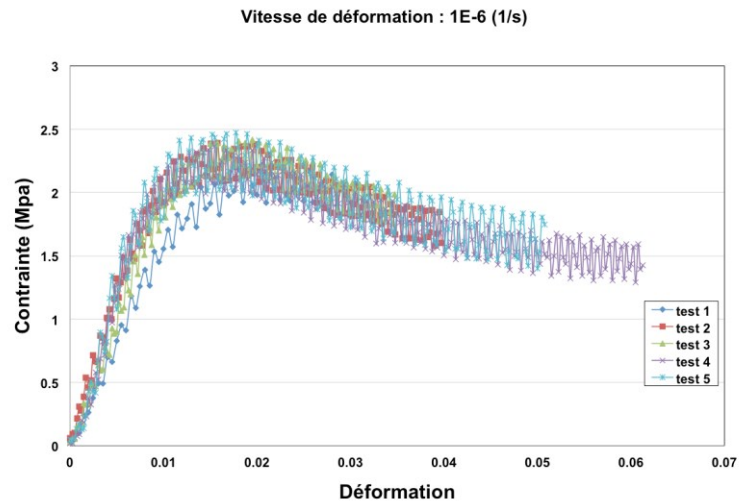
Les courbes de contrainte-déformation obtenues à températures -5°C et vitesse de déformation axiale 1E-6 (1/s).



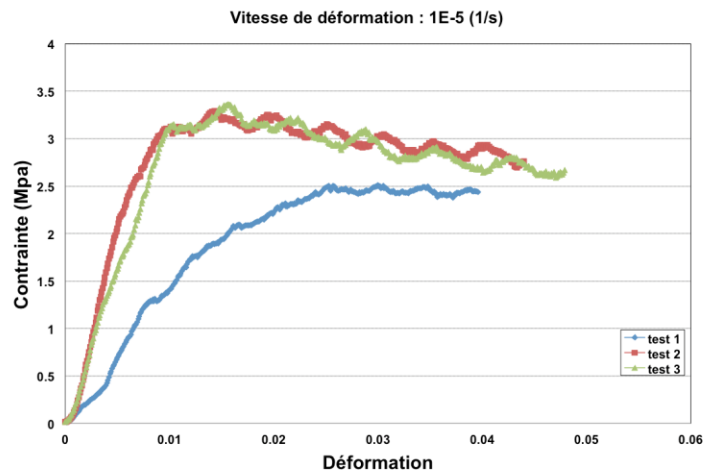
Les courbes de contrainte-déformation obtenues à températures -10°C et vitesse de déformation axiale $1E-5$ (1/s).



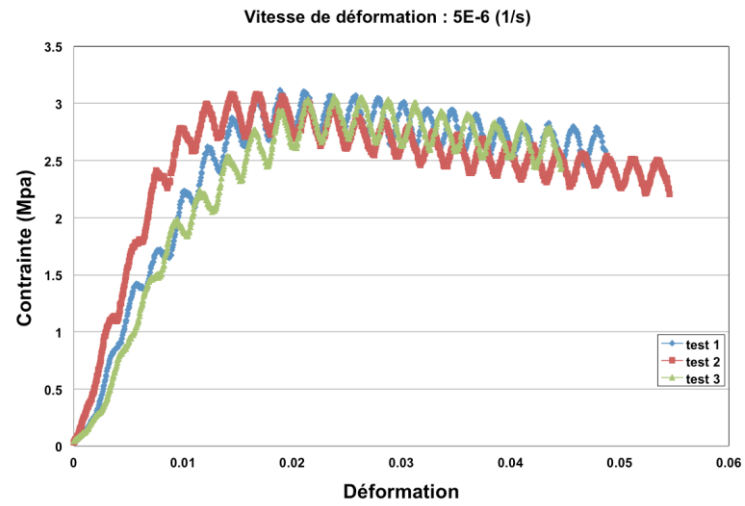
Les courbes de contrainte-déformation obtenues à températures -10°C et vitesse de déformation axiale $5E-6$ (1/s).



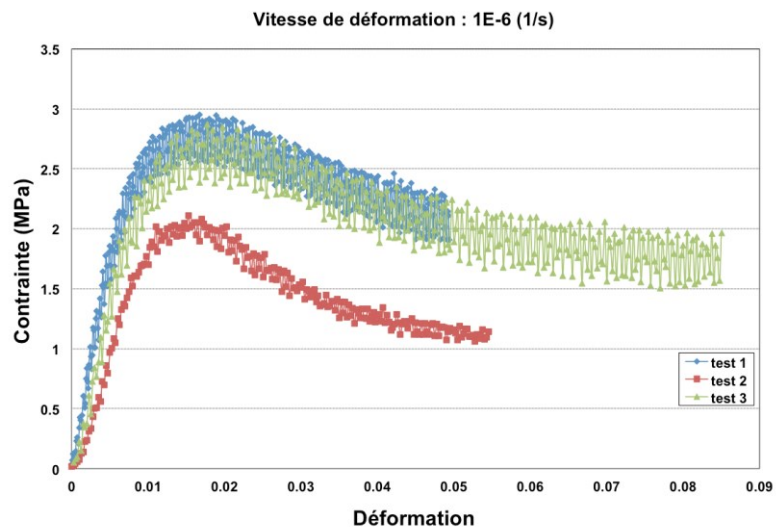
Les courbes de contrainte-déformation obtenues à températures -10°C et vitesse de déformation axiale 1E-6 (1/s).



Les courbes de contrainte-déformation obtenues à températures -15°C et vitesse de déformation axiale 1E-5 (1/s).

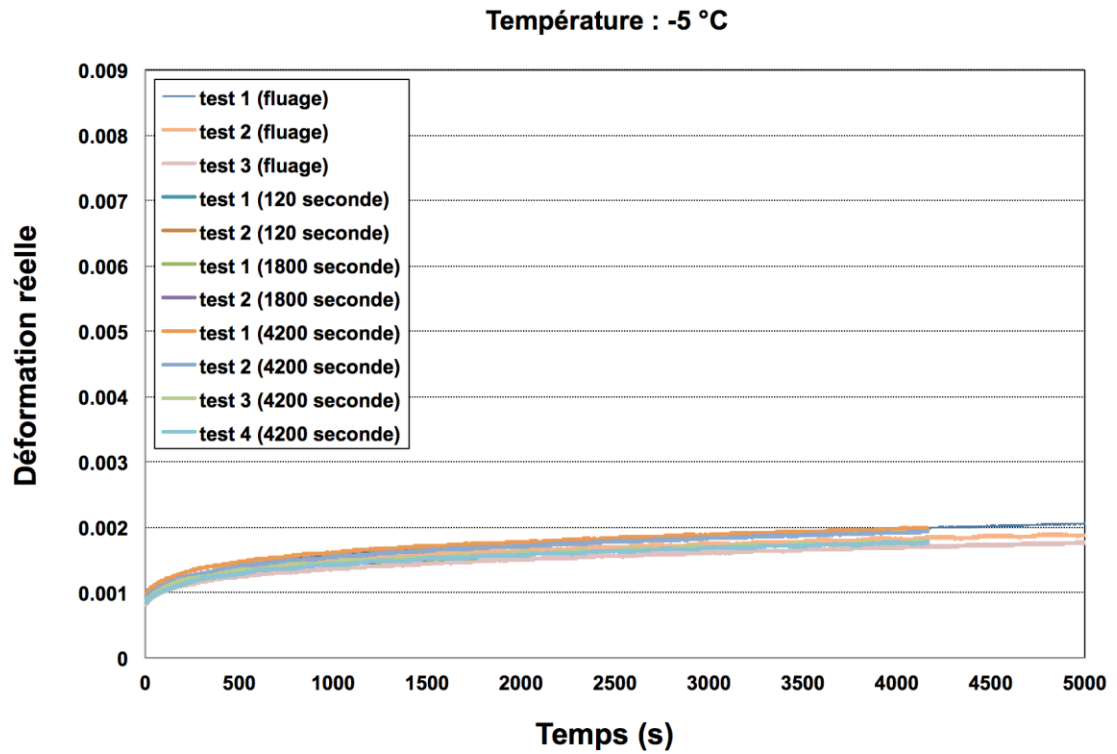


Les courbes de contrainte-déformation obtenues à températures -15°C et vitesse de déformation axiale $5E-6$ (1/s).

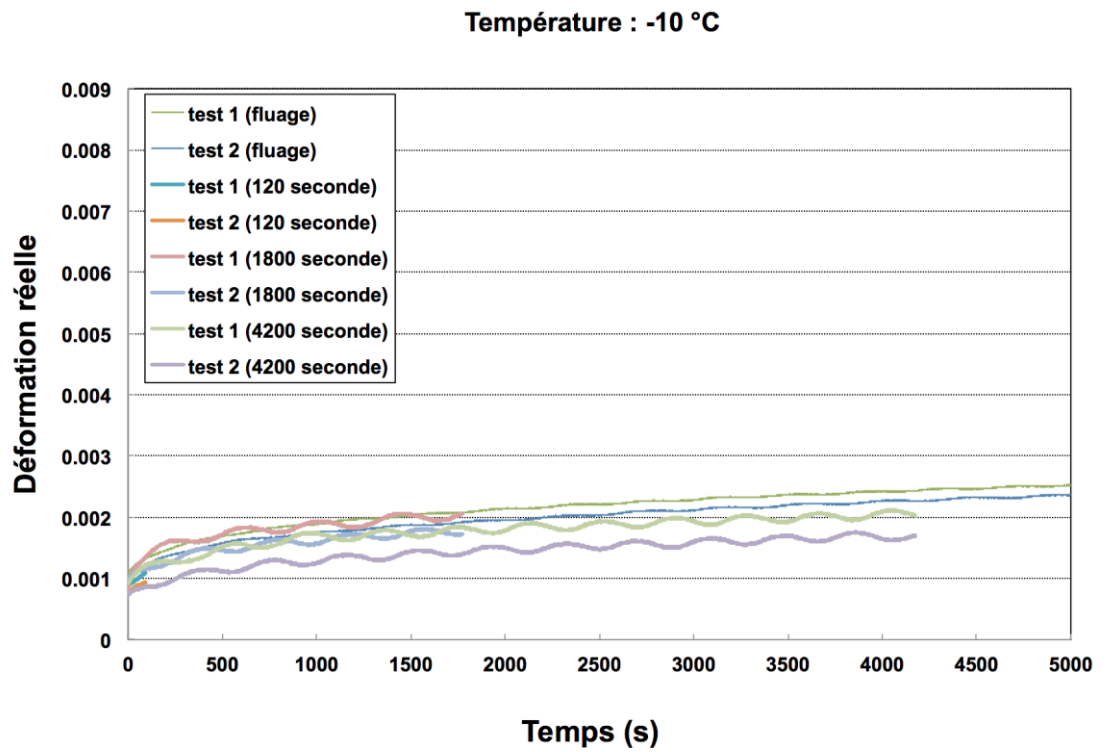


Les courbes de contrainte-déformation obtenues à températures -15°C et vitesse de déformation axiale $1E-6$ (1/s).

Annexe II : Les résultats des essais de Fluage à différentes températures et de temps de chargement

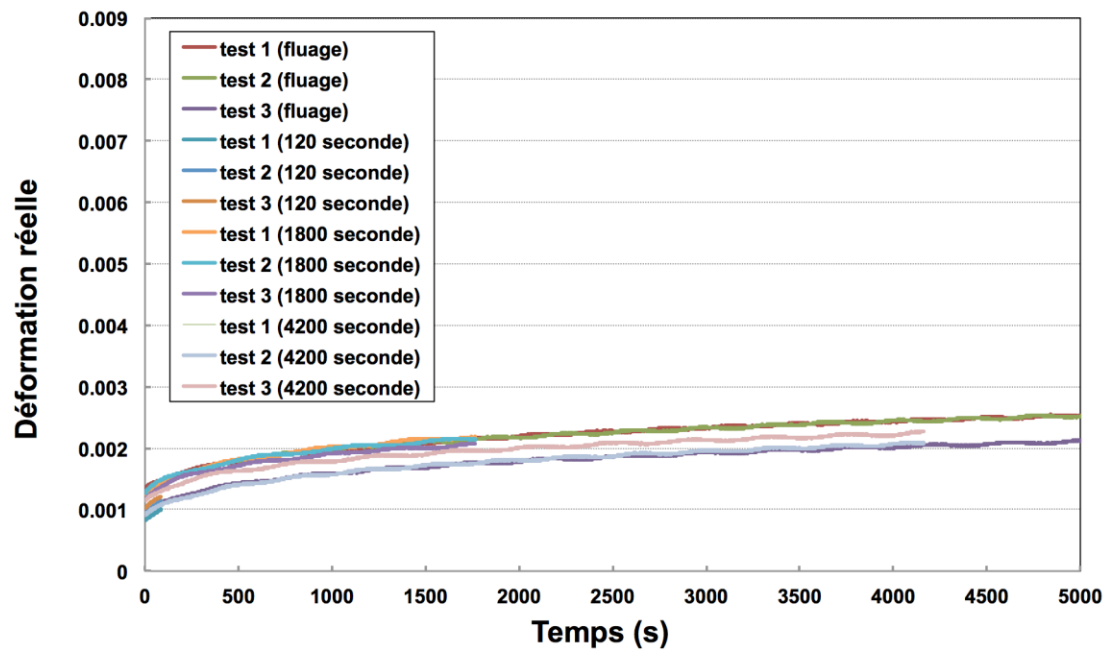


Les courbes de déformation-temps obtenues à températures -5 °C, la contrainte 0,5 MPa et plusieurs temps de chargement.



Les courbes de déformation-temps obtenues à températures -10 °C, la contrainte 0,8 MPa et plusieurs temps de chargement.

Température : -15 °C



Les courbes de déformation-temps obtenues à températures -15 °C, la contrainte 1 MPa et plusieurs temps de chargement.

Annexe III : Le détail de calcul de la déformation plastique et les paramètres du fluage primaire

Température : -5°C

Donnée d'entrée de la fluage primaire + déformation plastique

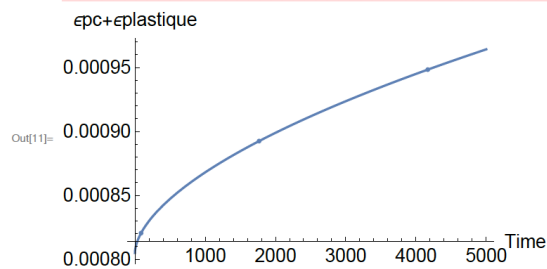
```
In[1]= Clear[data];  
      efface  
      data = {{87., 0.0008204732802551847},  
             {1767., 0.0008924632178439531}, {4167., 0.0009483579885387712}};
```

Calcul de la déformation plastique

```
In[5]= Clear[a, b, c];  
      efface  
      FindFit[data, a * t^b + c, {a, b, c}, t, Gradient -> "FiniteDifference"]  
      trouve ajustement gradient
```

```
Out[6]= {a -> 1.1756 × 10-6, b -> 0.576267, c -> 0.000805058}
```

```
In[7]= Clear[a, b, c];  
      efface  
      a = 1.1756044073247819 * 10-6;  
      b = 0.576266742873794;  
      eplastique = 0.0008050583470215904;  
  
      Show[ListPlot[data], Plot[a * x^b + eplastique, {x, 0, 5000}], PlotRange -> All,  
      mon... tracé de liste tracé de courbes zone de tracé tout  
      AxesStyle -> Directive[Black, 14], AxesLabel -> {Time, "epc+eplastique"} ]  
      style d'axe directive noir titre d'axe
```



Calcul de la fluage primaire

```
In[12]= Clear[data3];  
      efface
```

```

data3 = {{1.92941892571429`, -12.5418688150034`},
{2.16136800223497`, -12.4082197571122`},
{2.31175386105575`, -12.3215674252597`}, {2.42324587393681`,
-12.2573257274376`}, {2.51188336097887`, -12.206252807404`},
{2.5854607295085`, -12.1638575276572`}, {2.64836001098093`,
-12.1276149616728`}, {2.70329137811866`, -12.095963507928`},
{2.75204844781944`, -12.0678696843664`}, {2.79588001734408`,
-12.0426139340063`}, {2.83569057149243`, -12.0196750927061`},
{2.87215627274829`, -11.9986635556424`}, {2.90579588036787`,
-11.979280413732`}, {2.93701610746481`, -11.9612913188788`},
{2.96614173273903`, -11.9445091335958`}, {2.99343623049761`,
-11.9287820439873`}, {3.01911629044707`, -11.9139851934444`},
{3.04336227802113`, -11.9000146554042`}, {3.06632592536204`,
-11.8867830018064`}, {3.08813608870055`, -11.8742159856907`},
{3.10890312766731`, -11.8622500178381`}, {3.12872228433843`,
-11.8508302197642`}, {3.1476763242411`, -11.8399089019723`},
{3.16583762469013`, -11.8294443606535`}, {3.1832698436828`, -11.81939991607`},
{3.20002926655377`, -11.8097431366117`},
{3.21616590228599`, -11.8004452071028`},
{3.23172438332852`, -11.7914804103261`},
{3.24674470972384`, -11.7828256982571`},
{3.26126286879249`, -11.7744603350018`}, {3.27531135454181`,
-11.766365597513`}, {3.28891960566173`, -11.7585245232177`},
{3.3021143769562`, -11.7509216959978`}, {3.31492005599242`,
-11.7435430637372`}, {3.32735893438633`, -11.7363757820066`},
{3.33945144130644`, -11.7294080795192`}, {3.35121634533934`,
-11.7226291418155`}, {3.36267092972567`, -11.7160290102921`},
{3.37383114507383`, -11.7095984942085`}, {3.38471174293828`,
-11.703329093719`}, {3.39532639306935`, -11.6972129323134`},
{3.40568778667278`, -11.6912426973191`}, {3.41580772763554`,
-11.6854115873364`}, {3.42569721336259`, -11.6797132656605`},
{3.43536650661266`, -11.6741418188898`}, {3.44482519950975`,
-11.6686917200425`}, {3.45408227073109`, -11.6633577956047`},
{3.46314613672635`, -11.6581351960183`}, {3.47202469770028`,
-11.6530193691851`}, {3.48072537898849`, -11.6480060366268`},
{3.48925516836926`, -11.6430911719856`}, {3.49762064978129`,
-11.638270981596`}, {3.50582803385484`, -11.6335418868928`},
{3.51388318561109`, -11.6289005084509`}, {3.52179164963912`,
-11.6243436514779`}, {3.52955867302116`, -11.6198682926052`},
{3.53718922624364`, -11.6154715678384`}, {3.54468802230268`,
-11.6111507615492`}, {3.55205953418788`, -11.6069032964009`},
{3.55930801090701`, -11.6027267241154`}, {3.56643749219507`,
-11.5986187169972`}, {3.57345182203549`, -11.5945770601432`},

```

```
{3.58035466110659`, -11.5905996442704`}, {3.58714949825434`,  
-11.5866844591058`}, {3.59383966108127`, -11.582829587285`},  
{3.60042832573213`, -11.5790331987131`}, {3.60691852594829`,  
-11.5752935453486`}, {3.61331316145546`, -11.5716089563694`},  
{3.61961500574281`, -11.567977833691`}, {3.62582671328571`,  
-11.5643986478048`}, {3.63195082625922`, -11.5608699339094`},  
{3.63798978078469`, -11.5573902883119`}, {3.64394591274807`,  
-11.5539583650746`}, {3.64982146322457`, -11.55057287289`},  
{3.65561858354122`, -11.5472325721635`}, {3.66133934000604`,  
-11.5439362722885`}, {3.66698571832966`, -11.5406828290985`},  
{3.67255962776328`, -11.5374711424828`}, {3.67806290497435`,  
-11.5343001541538`}, {3.68349731767981`, -11.5311688455529`}};
```

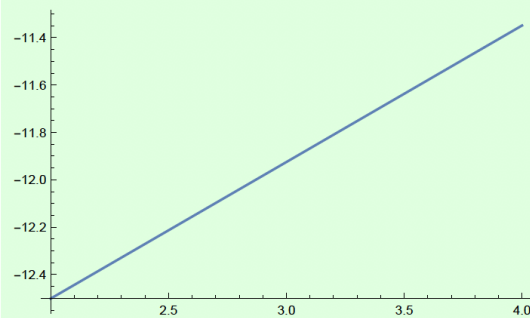
```
In[14]:= Clear[LnEpcCreepPrimer, n, k]  
LnEpcCreepPrimer[b_, n_, k_, σ_, logt_] := b * Log[(σ/k)^n] / b + b * logt  
FindFit[data3, LnEpcCreepPrimer[0.57626674287308, n, k, 0.5, t],  
{n, k}, t, Gradient -> "FiniteDifference"]
```

```
Out[16]= {n -> 11.3612, k -> 4.22426}
```

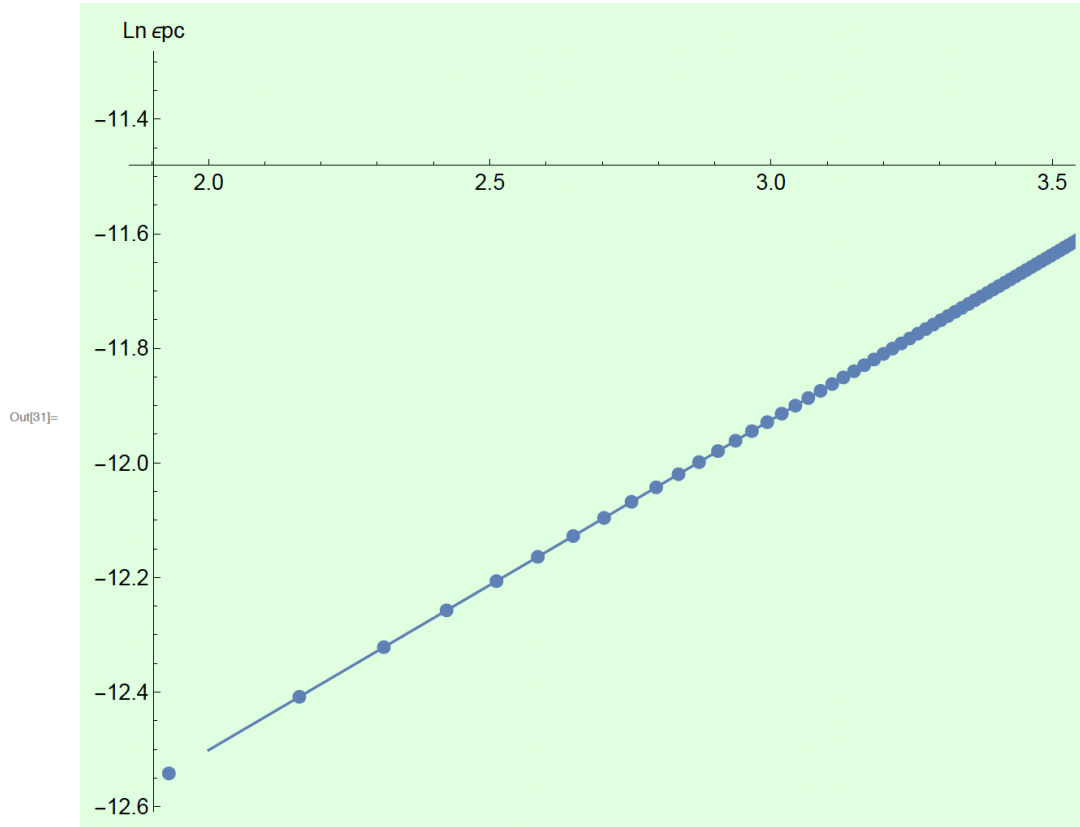
```
In[26]:= Clear[n, k, b];  
n = 11.36122484513571`;  
k = 4.224261340087171`;  
b = 0.576266742873794`;
```

```
In[30]:= Plot[LnEpcCreepPrimer[b, n, k, 0.5, t], {t, 2, 4}]
```

```
Out[30]=
```



```
In[31]:= Show[ListPlot[data3], Plot[LnEpcCreepPrimer[b, n, k, 0.5, t], {t, 2, 4}],
mon...   tracé de liste   tracé de courbes
PlotRange → All, AxesStyle → Directive[Black, 14], AxesLabel → {Time, Ln (εpc)}
zone de tracé   tout   style d'axe   directive   noir   titre d'axe
```



Calcule le paramètre M

```
In[32]:= Clear[b];
efface
b[m_, n_] := m / (m + n)
```

```
In[39]:= Solve[b[m, n] == 0.57, m]
résous
```

... Solve: 15.450984432785287 is not a valid variable.

Out[39]= Solve[False, 15.451]

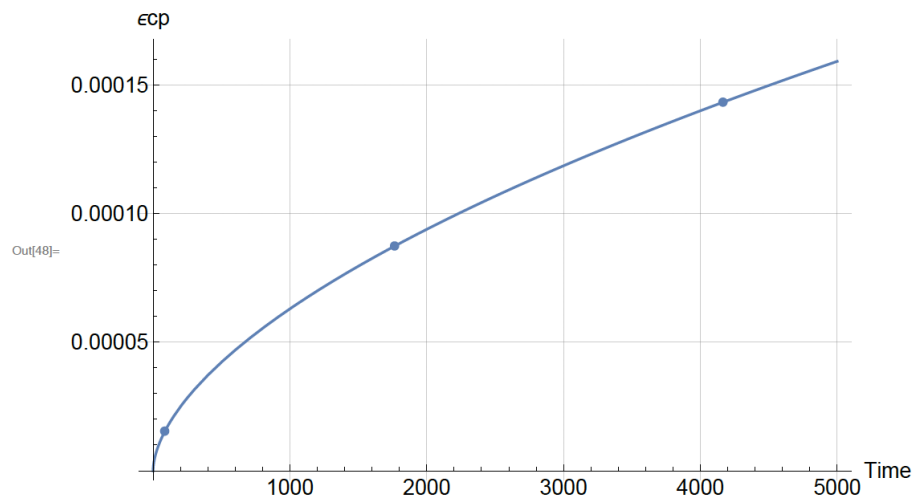
```
In[40]:= m = 15.450984432785287`;
```

```
In[41]:=
```

```
Clear[RlationFluagePrimaire];
RlationFluagePrimaire[m_, n_, k_, σ_, t_] := ((m + n) / m * (σ / k) ^ n * t) ^ (m / (m + n))
```

Superposition de prédiction de la fluage primaire et les résultat de mesure

```
In[47]:= dataprimaire = {{85., 0.0000154149332341846},
  {1765., 0.000087404870822953}, {4165., 0.000143299641517771}};
Show[ListPlot[dataprimaire], Plot[RlationFluagePrimaire[m, n, k, 0.5, t],
  {t, 0, 5000}], PlotRange → All, AxesStyle → Directive[Black, 14],
  AxesLabel → {Time, εcp}, GridLines → Automatic]
```



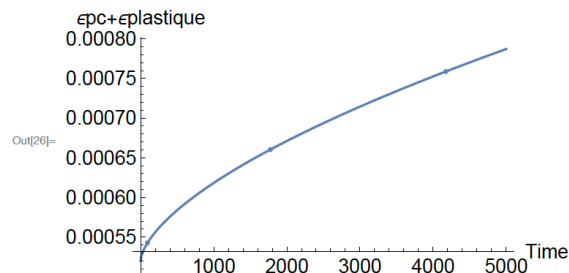
Température : -10°C

Donnée d'entrée de la fluage primaire + déformation plastique

```
In[1]:= Clear[data];  
data = {{94., 0.0005426000958647301},  
        {1774., 0.0006603334049365031}, {4174., 0.0007588497036104645}};
```

Calcul de la déformation plastique

```
In[3]:= Clear[a, b, c];  
FindFit[data, a * t^b + c, {a, b, c}, t, Gradient -> "FiniteDifference"]  
Out[4]:= {a -> 1.34244 x 10^-6, b -> 0.621519, c -> 0.000519994}  
  
In[23]:= a = 1.342440240553351`*^-6;  
b = 0.6215187299770141`;  
eplastique = 0.0005199937233582993`;  
Show[ListPlot[data], Plot[a * x^b + eplastique, {x, 0, 5000}], PlotRange -> All,  
      AxesStyle -> Directive[Black, 14], AxesLabel -> {Time, "epc+eplastique"} ]
```



Calcul de la fluage primaire

```
In[27]:= Clear[data3];
```

```

data3 = {{1.92941892571429`, -12.3218661376686`},
{2.16136800223497`, -12.177709786611`},
{2.31175386105575`, -12.0842449753538`}, {2.42324587393681`,
-12.0149526893483`}, {2.51188336097887`, -11.9598644911516`},
{2.5854607295085`, -11.9141361566105`}, {2.64836001098093`,
-11.8750442531754`}, {2.70329137811866`, -11.8409044084993`},
{2.75204844781944`, -11.8106018896802`}, {2.79588001734408`,
-11.7833605692207`}, {2.83569057149243`, -11.7586183098175`},
{2.87215627274829`, -11.7359548764869`}, {2.90579588036787`,
-11.7150478603514`}, {2.93701610746481`, -11.6956444892106`},
{2.96614173273903`, -11.6775429131027`}, {2.99343623049761`,
-11.6605793827457`}, {3.01911629044707`, -11.6446192254871`},
{3.04336227802113`, -11.6295503442099`}, {3.06632592536204`,
-11.6152784373875`}, {3.08813608870055`, -11.6017234208726`},
{3.10890312766731`, -11.5888167061548`}, {3.12872228433843`,
-11.5764991002837`}, {3.1476763242411`, -11.5647191644842`},
{3.16583762469013`, -11.5534319162551`}, {3.1832698436828`,
-11.5425977921511`}, {3.20002926655377`, -11.5321818108368`},
{3.21616590228599`, -11.5221528917293`}, {3.23172438332852`,
-11.5124832957613`}, {3.24674470972384`, -11.5031481629066`},
{3.26126286879249`, -11.4941251270455`}, {3.27531135454181`,
-11.4853939931523`}, {3.28891960566173`, -11.4769364650812`},
{3.3021143769562`, -11.4687359147217`}, {3.31492005599242`,
-11.4607771852007`}, {3.32735893438633`, -11.4530464222789`},
{3.33945144130644`, -11.445530929228`}, {3.35121634533934`,
-11.4382190413716`}, {3.36267092972567`, -11.4311000171755`},
{3.37383114507383`, -11.4241639433366`}, {3.38471174293828`,
-11.4174016517639`}, {3.39532639306935`, -11.4108046467074`},
{3.40568778667278`, -11.4043650405829`}, {3.41580772763554`,
-11.3980754972745`}, {3.42569721336259`, -11.3919291818952`},
{3.43536650661266`, -11.3859197161402`}, {3.44482519950975`,
-11.3800411385047`}, {3.45408227073109`, -11.3742878687406`},
{3.46314613672635`, -11.3686546760246`}, {3.47202469770028`,
-11.3631366503793`}, {3.48072537898849`, -11.3577291769587`},
{3.48925516836926`, -11.3524279128585`}, {3.49762064978129`,
-11.3472287661609`}, {3.50582803385484`, -11.3421278769592`},
{3.51388318561109`, -11.3371216001427`}, {3.52179164963912`,
-11.3322064897493`}, {3.52955867302116`, -11.3273792847173`},
{3.53718922624364`, -11.3226368958896`}, {3.54468802230268`,
-11.3179763941389`}, {3.55205953418788`, -11.3133949995022`},
{3.55930801090701`, -11.3088900712213`}, {3.56643749219507`,
-11.3044590986008`}, {3.57345182203549`, -11.3000996926049`},
{3.58035466110659`, -11.2958095781223`}, {3.58714949825434`,

```

```

-11.2915865868349`}, {3.59383966108127`, -11.287428650638`},
{3.60042832573213`, -11.2833337955575`}, {3.60691852594829`,
-11.2793001361231`}, {3.61331316145546`, -11.2753258701554`},
{3.61961500574281`, -11.2714092739308`}, {3.62582671328571`,
-11.2675486976929`}, {3.63195082625922`, -11.2637425614799`},
{3.63798978078469`, -11.2599893512423`}, {3.64394591274807`,
-11.2562876152271`}, {3.64982146322457`, -11.2526359606059`},
{3.65561858354122`, -11.2490330503291`}, {3.66133934000604`,
-11.2454776001862`}, {3.66698571832966`, -11.2419683760581`},
{3.67255962776328`, -11.2385041913451`}, {3.67806290497435`,
-11.2350839045584`}, {3.68349731767981`, -11.231706417062`}}];

```

```

In[29]:= Clear[LnEpcCreepPrimer, n, k]
          efface
LnEpcCreepPrimer[b_, n_, k_, σ_, logt_] := b * Log[ ((σ/k) ^ n) / b] + b * logt
          logarithme
FindFit[data3, LnEpcCreepPrimer[0.6215187299770141`, n, k, 0.8, t],
          trouve ajustement
          {n, k}, t, Gradient → "FiniteDifference"]
          gradient

```

```
Out[31]= {n → 15.5217, k → 3.35039}
```

```

In[32]:= Clear[n, k, b];
          efface
n = 15.523017667922275`;
k = 3.349975959855066`;
b = 0.6215187299770141`;

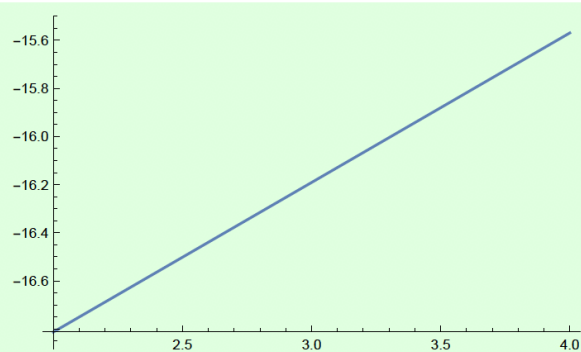
```

```

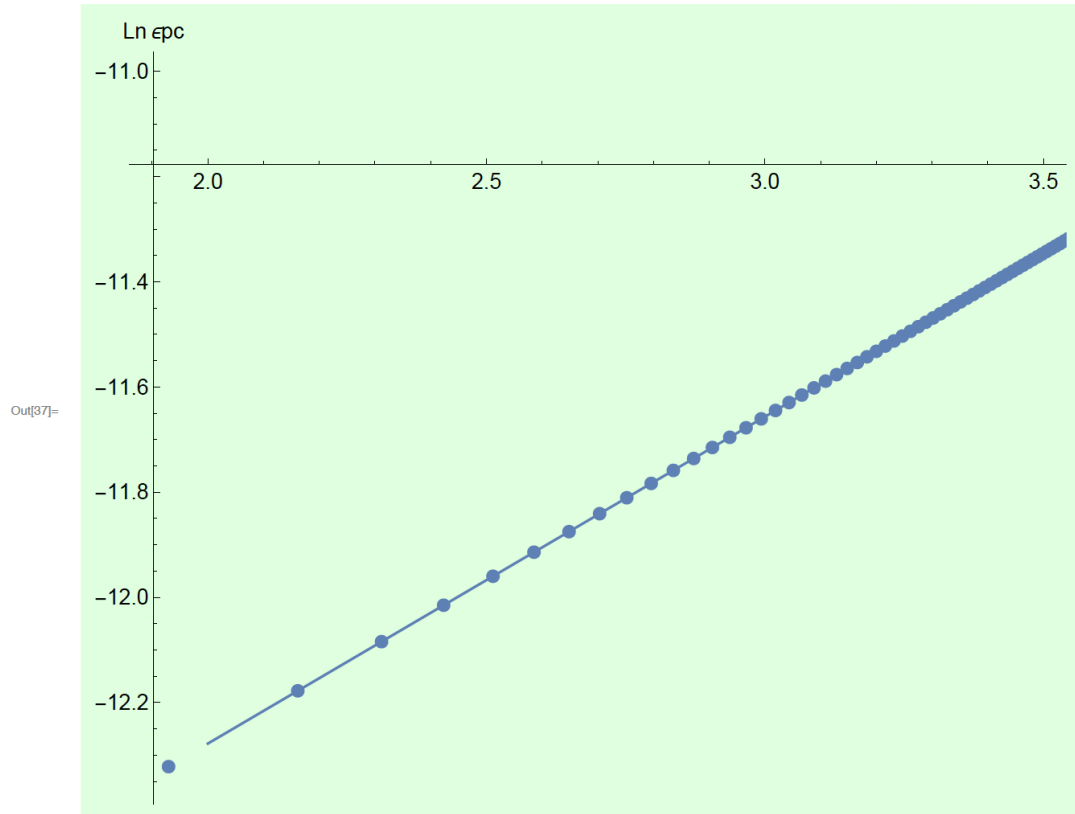
In[36]:= Plot[LnEpcCreepPrimer[b, n, k, 0.5, t], {t, 2, 4}]
          tracé de courbes

```

```
Out[36]=
```



```
In[37]:= Show[ListPlot[data3], Plot[LnEpcCreepPrimer[b, n, k, 0.8, t], {t, 2, 4}],
mon...   tracé de liste   tracé de courbes
PlotRange → All, AxesStyle → Directive[Black, 14], AxesLabel → {Time, Ln (εpc)}
zone de tracé   tout   style d'axe   directive   noir   titre d'axe
```



Calcule le paramètre M

```
In[38]:= Clear[b];
          efface
          b[m_, n_] := m / (m + n)
```

```
In[40]:= Solve[b[m, n] == 0.6215187299770142`, m]
résous
```

```
Out[40]= {{m → 25.4909}}
```

```
In[41]:= m = 25.490947612260644`;
```

In[42]:=

```
Clear[epPcPlusCreepPrimer];
RlationFluagePrimaire[m_, n_, k_, σ_, t_] := ((m + n) / m * (σ / k) ^ n * t) ^ (m / (m + n))
```

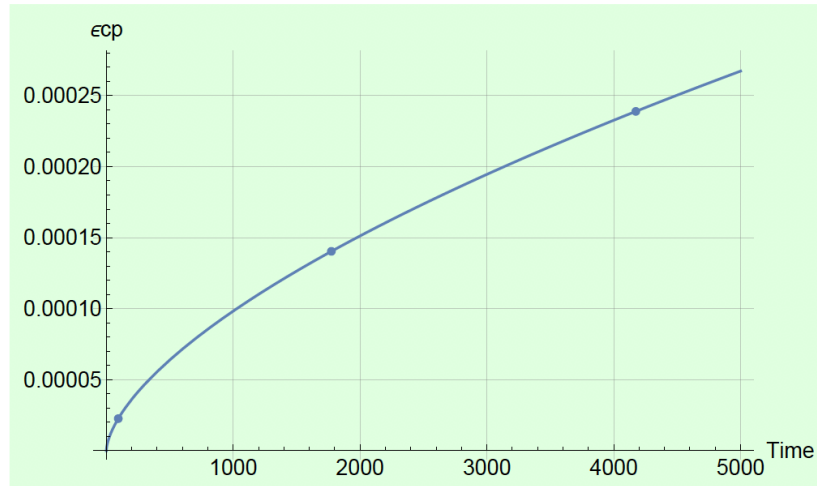
Superposition de prédiction de la fluage primaire et les résultat de mesure

```
In[47]:= dataprimaire = {{94., 0.000022606372506440075},
  {1774., 0.0001403396815782131}, {4174., 0.00023885598025217452}};
```

In[49]:=

```
aaa = Show[ListPlot[dataprimaire],
  Plot[RlationFluagePrimaire[m, n, k, 0.8, t], {t, 0, 5000}], PlotRange -> All,
  AxesStyle -> Directive[Black, 14], AxesLabel -> {Time, εcp}, GridLines -> Automatic]
```

Out[49]=



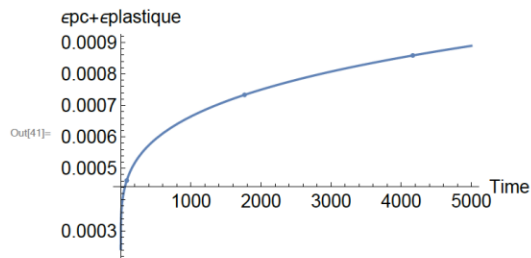
Température : -15°C

Donnée d'entrée de la fluage primaire + déformation plastique

```
In[33]:= Clear[data];  
data = {{85., 0.0004611755},  
        {1765., 0.0007334955}, {4165., 0.0008588094999999999}};
```

Calcul de la déformation plastique

```
In[35]:= Clear[a, b, c];  
FindFit[data, a * t^b + c, {a, b, c}, t, Gradient -> "FiniteDifference"]  
  
Out[36]:= {a -> 0.000069967, b -> 0.262122, c -> 0.000236975}  
  
In[37]:= Clear[a, b, c];  
a = 0.00006996703993728852;  
b = 0.2621222103509833;  
eplastique = 0.00023697475386480992;  
  
Show[ListPlot[data], Plot[a * x^b + eplastique, {x, 0, 5000}], PlotRange -> All,  
      AxesStyle -> Directive[Black, 14], AxesLabel -> {Time, "epc+eplastique"} ]
```



Calcul de la fluage primaire

```
In[42]:= Clear[data3];
```

```

data3 = {{1.92941892571429`, -9.06186071119177`,
{2.16136800223497`, -9.00106221925417`,
{2.31175386105575`, -8.96164307794007`, {2.42324587393681`,
-8.93241879152368`}, {2.51188336097887`, -8.90918513342022`},
{2.5854607295085`, -8.88989903358123`}, {2.64836001098093`,
-8.87341187392168`}, {2.70329137811866`, -8.85901326396754`},
{2.75204844781944`, -8.84623306085757`}, {2.79588001734408`,
-8.83474392985377`}, {2.83569057149243`, -8.82430878740041`},
{2.87215627274829`, -8.81475039778722`}, {2.90579588036787`,
-8.80593278383797`}, {2.93701610746481`, -8.79774933791132`},
{2.96614173273903`, -8.79011492901444`}, {2.99343623049761`,
-8.78296049526197`}, {3.01911629044707`, -8.77622923794801`},
{3.04336227802113`, -8.7698738796851`}, {3.06632592536204`,
-8.7638546484441`}, {3.08813608870055`, -8.75813776842981`},
{3.10890312766731`, -8.75269431217584`}, {3.12872228433843`,
-8.74749931482921`}, {3.1476763242411`, -8.74253108188992`},
{3.16583762469013`, -8.73777064181622`}, {3.1832698436828`,
-8.73320130857386`}, {3.20002926655377`, -8.72880832865093`},
{3.21616590228599`, -8.7245785936928`}, {3.23172438332852`,
-8.72050040464193`}, {3.24674470972384`, -8.71656327668719`},
{3.26126286879249`, -8.71275777683211`}, {3.27531135454181`,
-8.7090753877475`}, {3.28891960566173`, -8.70550839296395`},
{3.3021143769562`, -8.70204977951224`}, {3.31492005599242`,
-8.69869315492327`}, {3.32735893438633`, -8.69543267611866`},
{3.33945144130644`, -8.69226298820476`}, {3.35121634533934`,
-8.68917917155965`}, {3.36267092972567`, -8.68617669590031`},
{3.37383114507383`, -8.68325138025325`}, {3.38471174293828`,
-8.68039935794102`}, {3.39532639306935`, -8.67761704584866`},
{3.40568778667278`, -8.67490111735733`}, {3.41580772763554`,
-8.67224847843217`}, {3.42569721336259`, -8.6696562464334`},
{3.43536650661266`, -8.66712173128669`}, {3.44482519950975`,
-8.66464241870451`}, {3.45408227073109`, -8.66221595519597`},
{3.46314613672635`, -8.65984013464129`}, {3.47202469770028`,
-8.6575128862388`}, {3.48072537898849`, -8.65523226365954`},
{3.48925516836926`, -8.65299643526705`}, {3.49762064978129`,
-8.65080367527933`}, {3.50582803385484`, -8.64865235576597`},
{3.51388318561109`, -8.64654093938762`}, {3.52179164963912`,
-8.64446797279659`}, {3.52955867302116`, -8.64243208062769`},
{3.53718922624364`, -8.64043196001702`}, {3.54468802230268`,
-8.63846637559402`}, {3.55205953418788`, -8.63653415489867`},
{3.55930801090701`, -8.63463418418105`}, {3.56643749219507`,
-8.63276540454583`}, {3.57345182203549`, -8.63092680840806`},
{3.58035466110659`, -8.62911743623074`}, {3.58714949825434`,

```

```

-8.62733637351757`, {3.59383966108127`, -8.62558274803738`},
{3.60042832573213`, -8.62385572725909`}, {3.60691852594829`,
-8.62215451597844`}, {3.61331316145546`, -8.6204783541193`},
{3.61961500574281`, -8.6188265146947`}, {3.62582671328571`,
-8.61719830191355`}, {3.63195082625922`, -8.61559304942093`},
{3.63798978078469`, -8.61401011866072`}, {3.64394591274807`,
-8.61244889735048`}, {3.64982146322457`, -8.61090879805958`},
{3.65561858354122`, -8.60938925688218`}, {3.66133934000604`,
-8.60788973219762`}, {3.66698571832966`, -8.60640970351143`},
{3.67255962776328`, -8.60494867037069`}, {3.67806290497435`,
-8.60350615134812`}, {3.68349731767981`, -8.60208168308977`}};

```

```

In[53]:= Clear[LnEpcCreepPrimer, n, k]
          efface
LnEpcCreepPrimer[b_, n_, k_,  $\sigma$ _, logt_] := b * Log[ $((\sigma/k)^n)/b$ ] + b * logt
          logarithme
FindFit[data3, LnEpcCreepPrimer[0.26212221035077876`, n, k, 1, t],
          trouve ajustement
          {n, k}, t, Gradient → "FiniteDifference"]
          gradient

```

```
Out[55]:= {n → 8.5214, k → 84.8195}
```

```

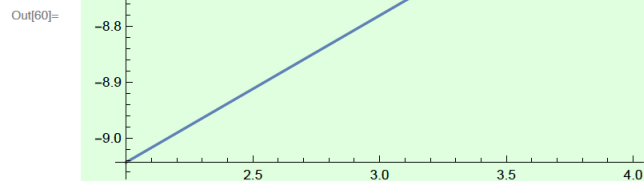
In[56]:= Clear[n, k, b];
          efface
n = 8.52140190927093`;
k = 84.81951342470163`;
b = 0.2621222103509833;

```

```

In[60]:= Plot[LnEpcCreepPrimer[b, n, k, 1, t], {t, 2, 4}]
          tracé de courbes

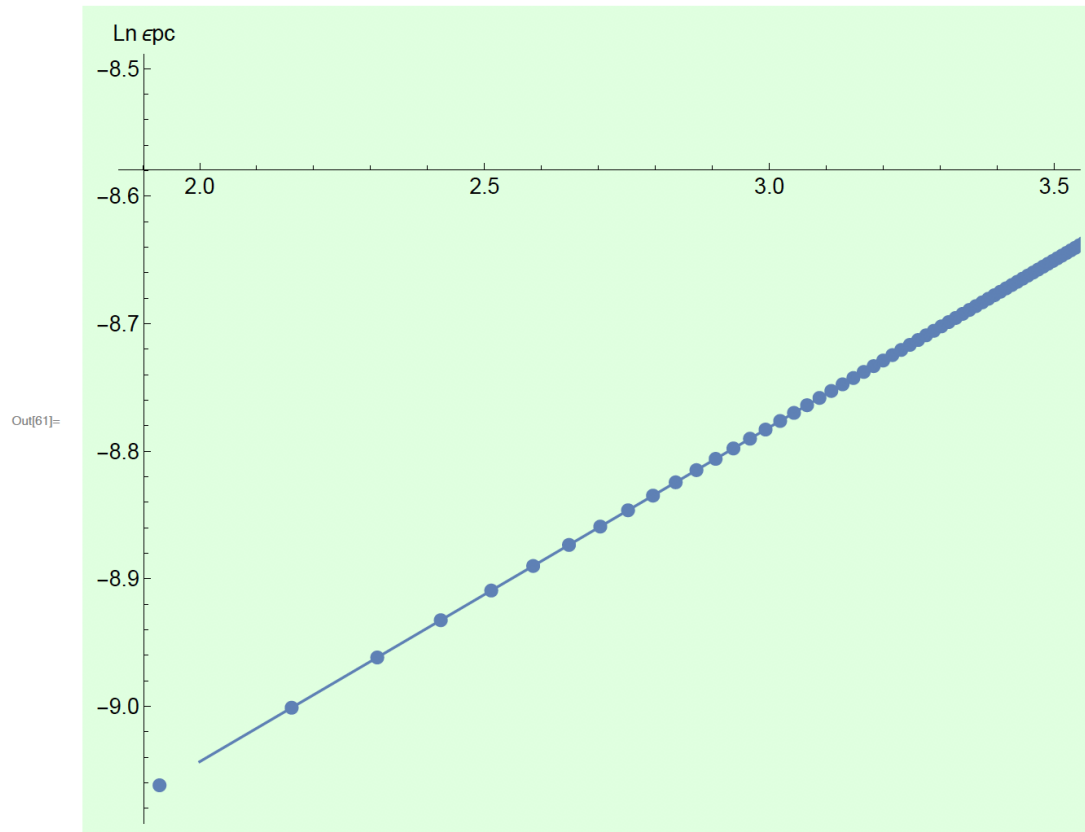
```



```

In[61]:= Show[ListPlot[data3], Plot[LnEpcCreepPrimer[b, n, k, 1, t], {t, 2, 4}],
mon... [tracé de liste] [tracé de courbes]
PlotRange → All, AxesStyle → Directive[Black, 14], AxesLabel → {Time, Ln (εpc)}]
[zone de tracé] [tout] [style d'axe] [directive] [noir] [titre d'axe]

```



Calcule le paramètre M

```

In[63]:= Clear[b];
[efface]
b[m_, n_] := m / (m + n)

In[65]:= Solve[b[m, n] == 0.2621222103509833, m]
[résous]

Out[65]= {{m → 3.02713}}

In[66]:= m = 3.0271255417643834';

```

In[67]:=

```
Clear[RlationFluagePrimaire];
RlationFluagePrimaire[m_, n_, k_, σ_, t_] := ((m + n) / m * (σ / k) ^ n * t) ^ (m / (m + n))
```

Superposition de prédiction de la fluage primaire et les résultat de mesure

```
In[71]:= dataprimaire = {{85., 0.000224200746135191},
                        {1765., 0.000496520746135191}, {4165., 0.000621834746135191}};
Show[ListPlot[dataprimaire], Plot[RlationFluagePrimaire[m, n, k, 1, t], {t, 0, 5000}],
PlotRange -> All, AxesStyle -> Directive[Black, 14],
AxesLabel -> {Time, εcp}, GridLines -> Automatic]
```

