



Prédiction de la rupture fragile de la glace atmosphérique des câbles et des conducteurs des réseaux aériens de transport de l'énergie électrique par le développement des critères de rupture

Hicham Farid

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

Québec, Canada

© Hicham Farid, 2016

RÉSUMÉ

Les lignes de transport de l'énergie électrique sont l'une des structures les plus vulnérables au givrage atmosphérique. Le givrage atmosphérique est un phénomène météorologique qui se manifeste par un dépôt des gouttes d'eau ou des flocons de neige, sur une surface froide exposée à l'air ambiant.

Lorsque la glace accumulée sur la structure subit des contraintes environnementales ou structurales, sa masse se réduit, d'une façon souvent brutale, menant au phénomène de délestage. Ce phénomène affecte considérablement la stabilité des équipements et des structures et constitue un danger véritable sur la vie des individus. La compréhension du phénomène de délestage nécessite une étude approfondie de la physique de la glace atmosphérique, de ses caractéristiques thermodynamiques, rhéologiques et mécaniques.

L'objet de la présente étude est de développer des outils pour prévoir le phénomène de délestage de la glace atmosphérique, le but primordial étant de développer des critères de rupture sous chargement uniaxial et triaxial. Le premier type de critère de rupture se base sur les observations expérimentales lors des essais de compression et de traction uniaxiale, ayant une nature purement phénoménologique, le critère de rupture uniaxial prend en considération l'effet du taux de déformation, de la température et de la porosité. Le deuxième type de critère de rupture, quant à lui, se base sur l'identification structurale des constantes matérielles incorporées dans des critères de rupture triaxiaux, en se basant sur les résultats des essais de compression triaxiale réalisés au sein de la CIGELE (Chaire industrielle sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques) sur la glace atmosphérique, sous différentes conditions expérimentales. L'influence de la température et du taux de déformation sur la résistance sous confinement est également mise en évidence.

La glace atmosphérique est accumulée au sein de la soufflerie de la CIGELE. Le flux et la vitesse à l'intérieur du tunnel sont contrôlés via un ordinateur de contrôle, la vitesse de l'air est ajustée à 20 m/s afin d'avoir un MVD (*mean volume droplet diameter*) de 40 μ m et une teneur en eau liquide (LWC) de 2,5 g/m³. La glace atmosphérique est accumulée sur un cylindre rotatif en aluminium de 78 mm de diamètre et de 590 mm de longueur, les températures considérées sont -5, -10, -15 et -20°C. Afin de déceler l'effet de la porosité, la glace granulaire désaérée est préparée en utilisant une autre technique développée au sein de la CIGELE. La structure cristalline et le taux de la porosité sont évalués en utilisant la microtomographie à rayon X.

L'étude de la microstructure de la glace atmosphérique indique une taille des grains qui dépend fortement de la température. Le diamètre moyen des grains est d'environ 0.137 mm pour les échantillons de glace accumulés à -20°C, de 1.249 mm à -15°C et de 4.511 mm à -5°C. La porosité est de 2.25% à -20°C, de 1.06% à -15°C et de 0.28% à -5°C.

Les essais de compression uniaxiale montrent que la résistance à la compression de la glace croît avec l'augmentation du Taux de déformation, la croissance se poursuit jusqu'à la transition ductile-fragile. Au-delà de cette transition, la glace se fragilise et sa résistance décroît. La glace colonnaire S2 présente un comportement fortement anisotrope. Sa résistance à la compression est maximale dans le sens parallèle à l'axe des colonnes. La résistance à la compression augmente avec la diminution de la température pour la glace granulaire désaérée. En ce qui concerne la glace granulaire poreuse, un seuil de résistance maximale est observé, au-delà duquel une diminution de la résistance à la compression est observée. La glace atmosphérique poreuse présente un comportement ductile même à des taux de déformation relativement élevés, ceci étant dû à la présence des cavités et des pores.

Un critère empirique sous chargement uniaxial est proposé. Le critère permet de présenter le comportement de la glace atmosphérique en compression et en traction uniaxiale, sous différentes conditions. La dépendance du critère de rupture proposé de la température est présentée par la fonction *shift* WLF (Williams-Landel-Ferry).

Afin de prédire la rupture fragile de la glace atmosphérique, un modèle neuronal est proposé. L'apprentissage dynamique par les données expérimentales permet d'apprendre le réseau, d'autres données sont utilisées pour la validation. Le modèle proposé montre une bonne capacité de prédiction, avec un taux d'erreur très acceptable.

Les essais de compression triaxiale montrent que la résistance de la glace atmosphérique croît en augmentant la contrainte de confinement. Même sous confinement, la transition ductile-fragile de la glace atmosphérique est toujours observée à un taux de déformation de 10^{-3}s^{-1} , pour une température de -5°C , tandis que cette transition n'est plus observée pour des températures plus froides de -10 et -15°C . La dépendance de la résistance triaxiale de la glace atmosphérique à la température et du taux de déformation est toujours observée.

Les trois critères de rupture de Mohr-Coulomb, de Hoek-Brown et de Larme sont considérés pour la glace atmosphérique, afin de prévoir la rupture de celle-ci sous des contraintes triaxiales. Les résultats des tests triaxiaux ont été utilisés pour identifier les constantes matérielles incorporées dans ces critères de rupture.

Un modèle éléments finis a été appliqué afin de valider le critère de rupture de Mohr-Coulomb. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance avec les résultats des mesures expérimentales.

À mon épouse, Sheila,
Pour son amour,
À mon fils, Jibrael-Hossein,
Pour son sourire et sa patience,
À ma famille, à mes amis.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	xi
REMERCIEMENTS	xvi
Chapitre 1 INTRODUCTION	1
1.1 La problématique du délestage de la glace atmosphérique	1
1.2 Objectifs	3
1.2.1 Objectif général	3
1.2.2 Objectifs spécifiques	3
1.3 Méthodologie	5
1.3.1 Réalisation des tests de compression uniaxiale	5
1.3.2 Réalisation des tests de compression triaxiale	6
1.4 Originalités	7
1.5 Structure de la thèse	8
Chapitre 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	10
2.1 Structure cristalline et classification de la glace atmosphérique	10
2.2 Aspect météorologique du givrage atmosphérique	12
2.3 Analyse des efforts appliqués sur un manchon de glace	16
2.3.1 Efforts d'origine mécanique	16
2.3.2 Efforts d'origine thermique	30
2.4 Problématique du délestage de la glace atmosphérique	32
2.4.1 Délestage par fonte	33
2.4.2 Délestage par sublimation	34
2.4.3 Délestage par bris mécanique	34
2.5 Rupture fragile de la glace	35

2.5.1	Amorçage des fissures.....	36
2.5.2	Propagation des fissures	38
2.6	Critères de rupture de la glace.....	46
2.6.1	Critères de rupture en chargement uniaxial.....	47
2.6.2	Critères de rupture en chargement triaxial	49
2.7	Conclusions	52
Chapitre 3	MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE.....	54
3.1	Introduction	54
3.2	Préparation de la glace	54
3.2.1	Préparation de la glace atmosphérique poreuse.....	55
3.2.2	Préparation de la glace désaérée.....	56
3.3	Étude de la microstructure cristalline de la glace	58
3.4	Préparation des échantillons	61
3.5	Réalisation des essais de compression uniaxiale.....	62
3.6	Réalisation des essais de compression triaxiale	64
Chapitre 4	UN CRITÈRE EMPIRIQUE UNIAXIAL POUR LA GLACE ATMOSPHÉRIQUE.....	67
4.1	Introduction	67
4.2	Analyse des données expérimentales en compression uniaxiale.....	67
4.2.1	Effet du Taux de déformation	71
4.2.2	Effet de la température.....	76
4.2.3	Effet de la porosité.....	79
4.2.4	Effet de l'anisotropie.....	82
4.3	Développement du critère de rupture empirique en compression uniaxiale	83
4.3.1	Proposition d'un critère de rupture basé sur les résultats expérimentaux.....	83
4.3.2	Intégration de l'effet de la température sur le critère de rupture	88
4.4	Validation expérimentale.....	89
4.4.1	Tests de compression uniaxiale	89
4.4.2	Tests de traction uniaxiale	90
4.5	Réseaux de neurones et prédiction de la rupture fragile de la glace atmosphérique.....	92
4.5.1	Architecture du réseau de neurones utilisé.....	92

4.5.2	Prédiction de la résistance à la compression de la glace atmosphérique avec les réseaux de neurones.....	93
Chapitre 5 ANALYSE DES RÉSULTATS ET CRITÈRES DE RUPTURE DE LA GLACE		
ATMOSPHÉRIQUE SOUS CHARGEMENT TRIAXIAL.....		98
5.1	Introduction	98
5.2	Analyse des résultats expérimentaux en compression triaxiale	98
5.2.1	Effet du confinement sur le comportement de la glace atmosphérique.....	101
5.2.2	Effet du taux de déformation sur la résistance triaxiale de la glace atmosphérique	
	105	
5.2.3	Effet de la température sur la résistance triaxiale de la glace atmosphérique	107
5.3	Critères de rupture de la glace atmosphérique	110
5.3.1	Critère de Mohr-Coulomb.....	111
5.3.2	Critère de Hoek-Brown	112
5.3.3	Critère de Larme.....	112
5.4	Identification et validation par les résultats expérimentaux	115
5.4.1	Critère de Mohr-Coulomb.....	115
5.4.2	Critère de Hoek-Brown	119
5.4.3	Critère de Larme.....	123
5.4.4	Discussion.....	126
5.5	Validation du comportement et modélisation par éléments finis.....	127
5.5.1	Implémentation et calibration du critère de Mohr-Coulomb.....	127
5.5.2	Validation et comparaison avec les résultats expérimentaux	130
Chapitre 6	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	133
6.1	Conclusions	133
6.2	Recommandations	136
LISTE DES RÉFÉRENCES		138
Annexe A : Présentation de l'approche neuronale.....		147
Caractéristiques des réseaux de neurones artificiels.....		147
Architecture d'un réseau de neurones		148
Apprentissage des réseaux de neurones		149

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Caractéristiques météorologiques de formation des différents types de glace [18]	15
Tableau 2-2 : Comparaison entre les trois types de mouvements vibratoires [28]	27
Tableau 4-1 : Résultats de compression uniaxiale de la glace préparée et testée à la même température	69
Tableau 4-2 : Résultats de compression uniaxiale de la glace colonnaire et granulaire préparée et testée à la même température	72
Tableau 4-3 : Différents paramètres présentés dans le critère de rupture en fonction de la température.	85
Tableau 4-4 : Différents paramètres présentés dans le critère de rupture à -10°C.....	89
Tableau 4-5 : Différents paramètres présentés dans le critère de rupture en fonction de la température pour les données de traction	91
Tableau 4-6 : Valeurs de la résistance à la compression expérimentales comparées aux valeurs estimées par le model neuronal.....	95
Tableau 5-1 : Résultats de la compression triaxiale de la glace atmosphérique préparée et testée à -5°C.	99
Tableau 5-2 : Résultats de la compression triaxiale de la glace atmosphérique préparée et testée à -10°C	100
Tableau 5-3 : Résultats de la compression triaxiale de la glace atmosphérique préparée et testée à -15°C	101
Tableau 5-4 : La cohésion C et l'angle de frottement ϕ pour chaque taux de déformation à -5, -10 et -15°C	115
Tableau 5-5 : Valeurs de la résistance à la compression prédites par le critère de Mohr-Coulomb.....	117
Tableau 5-6 : Paramètres du critère de Hoek-Brown en fonction du taux de déformation à -5, -10 et -15°C	119
Tableau 5-7 : Valeurs de la résistance à la compression prédites par le critère de Hoek-Brown	121
Tableau 5-8 : Paramètres du critère de Larme en fonction du taux de déformation à -5, -10 et -15°C	123
Tableau 5-9 : Valeurs de la résistance à la compression prédites par le critère de Larme	125

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Différents efforts mécaniques et thermiques appliqués sur la glace accumulée sur un câble électrique	2
Figure 2-1 : Présentation hexagonale du monocrystal de la glace [12]	11
Figure 2-2 : Morphologie cristallographique de la glace colonnaire et granulaire [9]	12
Figure 2-3 : Différents types de la glace atmosphérique en relation avec les conditions météorologiques (figure reproduite d'après [19])	15
Figure 2-4 : Distribution de l'écoulement autour d'un conducteur en présence de la glace atmosphérique (figure reproduite à partir de [22]).....	17
Figure 2-5 : Composantes des forces aérodynamiques	21
Figure 2-6 : Oscillation induite par sillage dans un double conducteur (figure reproduite à partir de [22])	25
Figure 2-7 : Classification des oscillations induites par sillage [10].....	26
Figure 2-8 : Différentes formes d'accumulation de la glace atmosphérique sur câble (figure reproduite à partir de [30])	29
Figure 2-9 : Moment appliqué par le poids de la glace atmosphérique	29
Figure 2-10 : Événement de givrage atmosphérique en trois phases (courbe reproduite d'après de [7]) ...	32
Figure 2-11 : Dépendance entre taux de déformation et transition ductile-fragile de la glace [42]	35
Figure 2-12 : Orientation des raideurs et des complaisances dans un microcristal de glace [43].....	39
Figure 2-13 : Représentation de deux grains adjacents dans un polycristal (Figure reproduite à partir de [44])	39
Figure 2-14 : Concentration des contraintes à la suite d'un empilement des dislocations [43]	43
Figure 2-15 : Orientation du champ des contraintes à la pointe d'un empilement d'une dislocation (figure reproduite à partir de [43])	44
Figure 2-16 : Concentration des contraintes à la suite d'un glissement des joints des grains [43].....	46
Figure 2-17 : Critères de Von Mises et de Tresca dans l'espace des contraintes principales [61].....	48

Figure 2-18 : Courbe typique de contrainte-déformation d'une rupture fragile de la glace et illustration du critère de la contrainte maximale	48
Figure 3-1 : Accumulation de la glace atmosphérique sur le cylindre et coupe de l'échantillon	56
Figure 3-2 : Glace pendant la congélation dans une boîte en bois et Styromousse	57
Figure 3-3 : Micro-tomographe rayon X (SkyScan)	58
Figure 3-4 : Image binaire d'une coupe transversale de la glace poreuse à différentes températures	59
Figure 3-5 : Images binaires d'une coupe transversale de la glace à -20°C: À gauche, glace atmosphérique poreuse, à droite, glace désaérée	59
Figure 3-6 : Orientation cristalline d'une coupe transversale de la glace poreuse à différentes températures.....	60
Figure 3-7 : Découpage du grand bloc de glace et préparation des échantillons cylindriques	61
Figure 3-8 : Différentes composantes de la machine de test à boucle fermée MTS 810	62
Figure 3-9: Éprouvettes cylindriques en glace montées entre les plaques de la machine de compression à - 5°C (à gauche glace désaérée, à droite glace atmosphérique).....	63
Figure 3-10 : Rupture d'une éprouvette cylindrique après essai de compression uniaxiale (taux de déformation de 10^{-2} s^{-1}).....	63
Figure 3-11 : État de contrainte triaxiale.....	64
Figure 3-12 : Composantes du système de test triaxial	65
Figure 3-13 : Montage expérimental pour test triaxial.....	66
Figure 4-1 : Courbe Contraintes-Déformations à -5°C pour un échantillon typique : (a) de la glace poreuse, (b) de la glace désaérée	70
Figure 4-2 : Courbe Contraintes-Déformations à -15°C pour un échantillon typique : (a) de la glace poreuse, (b) de la glace désaérée	70
Figure 4-3 : Courbe Contraintes-Déformations à -20°C pour un échantillon typique : (a) de la glace poreuse, (b) de la glace désaérée	71
Figure 4-4 : L'évolution de la résistance à la compression de la glace granulaire désaérée à -15°C	72

Figure 4-5 : L'évolution de la résistance à la compression de la glace colonnaire S2 désaérée à -15°C.....	73
Figure 4-6 : Comparaison des résultats obtenus de la présente étude avec d'autres résultats de la littérature	75
Figure 4-7 : Évolution de la résistance à la compression de la glace désaérée en fonction de la température pour différents taux de déformation.....	76
Figure 4-8 : Évolution de la résistance à la compression de la glace poreuse en fonction de la température pour différents taux de déformation.....	76
Figure 4-9 : Résistance à la compression de la glace désaérée à différentes températures	77
Figure 4-10 Résistance à la compression de la glace poreuse à différentes températures	78
Figure 4-11 : Évolution de la porosité en fonction de la température pour : (a) la glace poreuse, (b) la glace désaérée	79
Figure 4-12 : Résistance à la compression de la glace poreuse et de la glace désaérée à -20°C	79
Figure 4-13 : Résistance à la compression à -15°C de la glace poreuse et de la glace désaérée	80
Figure 4-14 : Résistance à la compression à -5°C de la glace poreuse et de la glace désaérée	80
Figure 4-15 : Évolution de la résistance à la compression en fonction de la porosité pour la glace poreuse	81
Figure 4-16 : Évolution de la résistance à la compression en fonction de la porosité pour la glace désaérée	81
Figure 4-17 : Évolution de la résistance à la compression des deux types de la glace en fonction du taux de déformation à -15°C.....	82
Figure 4-18 : Évolution des paramètres α , $f(\eta)$ et n en fonction de la température.....	86
Figure 4-19 : Évolution du critère de rupture et comparaison avec l'expérimentale pour les trois températures, glace atmosphérique poreuse	87
Figure 4-20 : Évolution de la courbe normale et comparaison avec l'expérimentale pour les trois températures, glace désaérée.....	87
Figure 4-21 : Évolution de la fonction shift et comparaison avec les valeurs expérimentales, glace désaérée	88

Figure 4-22 : Comparaison entre critère de rupture et données expérimentales à -10°C.	90
Figure 4-23 : Évolution du critère de rupture et comparaison avec les données expérimentales de traction uniaxiale de la glace atmosphérique poreuse	91
Figure 4-24 : L'architecture du modèle neuronal	93
Figure 4-25 : Algorithme de modélisation par réseaux de neurones	94
Figure 4-26 : Résistance à la compression prédictive à -20°C	95
Figure 4-27 : Résistance à la compression prédictive à -15°C	96
Figure 4-28 : Résistance à la compression prédictive à -5°C	96
Figure 4-29 : Comparaison entre les valeurs mesurées et celles prédictives par le modèle neuronal	97
Figure 5-1 : Courbe contrainte-déformation pour différentes pressions de confinement à un taux de déformation de 10^{-4}s^{-1} à -5°C.....	102
Figure 5-2 : Courbe contrainte-déformation pour différentes pressions de confinement à un taux de déformation de 10^{-3}s^{-1} à -5°C.....	102
Figure 5-3 : Courbe contrainte-déformation pour différentes pressions de confinement à un taux de déformation de 10^{-2}s^{-1} à -5°C.....	103
Figure 5-4 : Contrainte axiale en fonction du confinement à -5°C	104
Figure 5-5 : Contrainte axiale en fonction de la contrainte de confinement pour des températures de (a) -10 et (b) -15°C	105
Figure 5-6 : Contrainte axiale en fonction des taux de déformation pour différentes pressions de confinement à -5°C	106
Figure 5-7 : Contrainte axiale en fonction des taux de déformation pour différentes pressions de confinement à (a) -10 et (b) -15°C	106
Figure 5-8 : Contrainte axiale en fonction de la température pour différents taux de déformation sous différentes pressions de confinement	108
Figure 5-9 : Contrainte axiale en fonction des taux de déformation pour différentes températures sous différentes pressions de confinement.....	109

Figure 5-10 : Critères de Von Mises et de Tresca dans l'espace des contraintes principales [61].....	110
Figure 5-11 : Critères de Mohr-Coulomb et de Hoek-Brown dans l'espace des contraintes principales	112
Figure 5-12 : Comparaison entre le critère de Larme et les critères de Mohr-Coulomb et de Hoek-Brown dans l'espace des contraintes principales	114
Figure 5-13 : Évolution de la cohésion C et de l'angle de frottement ϕ en fonction des taux de déformation pour les trois températures -5, -10 et -15°C.....	116
Figure 5-14 : Comparaison entre le critère de rupture de Mohr-Coulomb et les données expérimentales pour différentes conditions expérimentales	118
Figure 5-15 : Évolution des constantes σ_c , m et s en fonction des taux de déformation pour les trois températures -5, -10 et -15°C.....	120
Figure 5-16 : Comparaison entre le critère de rupture de Hoek-Brown et les données expérimentales pour différentes conditions expérimentales	122
Figure 5-17 : Évolution des constantes T, C et θ en fonction des taux de déformation pour les trois températures -5, -10 et -15°C.....	124
Figure 5-18 : Comparaison entre le critère de rupture de Larme et les données expérimentales pour différentes conditions expérimentales	126
Figure 5-19 : Algorithme utilisé pour l'identification des constantes de Mohr-Coulomb	128
Figure 5-20 : Conditions aux limites et type d'éléments utilisés pour le modèle éléments finis	129
Figure 5-21 : Comparaison entre l'image d'une fissure dans une éprouvette en compression simple et la concentration des déformations plastiques dans le modèle éléments finis	130
Figure 5-22 : Comparaison entre la courbe contrainte déformation expérimentale et celle donnée par le modèle éléments finis pour un taux de déformation de 10^{-4}s^{-1}	132
Figure A-1 : Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel.....	148
Figure A-2 : Structure d'un réseau de neurones multicouches	149

REMERCIEMENTS

Je témoigne toutes mes reconnaissances et mes remerciements les plus profonds à mon directeur de recherche Monsieur Masoud Farzaneh, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi et titulaire de la Chaire Industrielle CRSNG/Hydro-Québec/UQAC, sur le Givrage atmosphérique des équipements des réseaux électrique (CIGELE), d'avoir accepté de diriger ce travail. Je lui suis reconnaissant de la confiance et du soutien qu'il m'a témoigné.

Mes remerciements s'adressent également à mon codirecteur Monsieur Ali Saeidi, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi, qui a dirigé ce travail avec bienveillance, pour son écoute et sa disponibilité et pour ses précieux conseils qui m'ont été d'une aide incontournable durant l'élaboration de ce travail. Qu'il reçoive le témoignage de mon profond respect pour les qualités humaines qu'il a montré.

Je présente aussi mes immenses remerciements et mes respects les plus dévoués au Professeur Fouad Erchiqui, mon codirecteur, pour son soutien et ses conseils durant la période de mes études.

Mes remerciements les plus profonds s'adressent également au Professeur Hassan Ezzaidi, pour ses conseils et ses qualités humaines.

Je remercie également le personnel du Laboratoire CIGELE/INGIVRE, au nom de messieurs Pierre Camirand, Claude D'amours, Xavier Bouchard et Denis Masson, pour leur aide, leur disponibilité et leur professionnalisme.

Également, je tiens à formuler ma profonde gratitude à l'ensemble des collègues pour leur aide, amabilité et servabilité, et pour l'ambiance familiale que nous avons vécu ensemble. Je remercie mes collègues Dr. Zahira Ghalmi, Mme Mahdiyeh Seifaddini, Mr. Mustapha Hamaoui et Mr. Jibril Abdelaziz.

Je me fais un devoir de témoigner ma reconnaissance et mon respect à ma famille, particulièrement à mon cher père et à ma chère mère, pour leur soutien et leur aide ainsi que leur amour, ma sœur Hanaa et mon frère Redouane pour leur amour inconditionnel. Également à ma femme Sheila pour son amour et son soutien qui m'ont été une source d'inspiration.

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 La problématique du délestage de la glace atmosphérique

Dans les pays nordiques, y compris le Canada, les composantes du réseau de transport d'énergie électrique subissent des dommages potentiels causés par la présence de la glace atmosphérique. La pluie verglaçante, les nuages et les brouillards givrants, la neige fondante et la condensation sont des phénomènes météorologiques responsables du givrage atmosphérique [1], [2]. Ces dépôts sont à l'origine de plusieurs problèmes de natures mécaniques et électriques, tels que les surcharges mécaniques, la fatigue et la rupture des câbles et des pylônes conséquents aux mouvements vibratoires, les contournements électriques, les vibrations dues aux forces aérodynamiques, etc. [1], [3]–[6].

Les recherches entretenues dans le domaine du givrage atmosphérique ont comme but de comprendre les différents mécanismes d'adhésion de la glace atmosphérique, les divers phénomènes associés, ainsi que les différents mécanismes de son délestage (réduction de la masse de la glace atmosphérique) [7]–[10], d'où vient la nécessité d'appréhender le comportement rhéologique et les limites de rupture de ce type de glace. La littérature englobe plusieurs travaux sur les différents aspects d'accumulation de la glace atmosphérique, alors que peu d'études ont été consacrées au problème de délestage [8]–[10].

La complexité du phénomène de délestage réside dans l'interférence de plusieurs mécanismes physiques. Ce phénomène doit être examiné à la fois d'un point de vue thermodynamique et mécanique. Les échanges thermiques peuvent être transmis à la glace

sous forme de radiations solaires, d'effet Joule, de chaleurs latentes de sublimation, d'évaporation ou de fonte, comme illustré à la Figure 1-1, tandis que les efforts mécaniques englobent la force de pesanteur, le vent, les forces impulsives dues au détachement des morceaux de glace, la fatigue, comme montré également à la Figure 1-1. Chaque mécanisme de délestage (fonte, sublimation ou bris mécanique) doit être analysé en prenant en considération les divers phénomènes physiques associés.

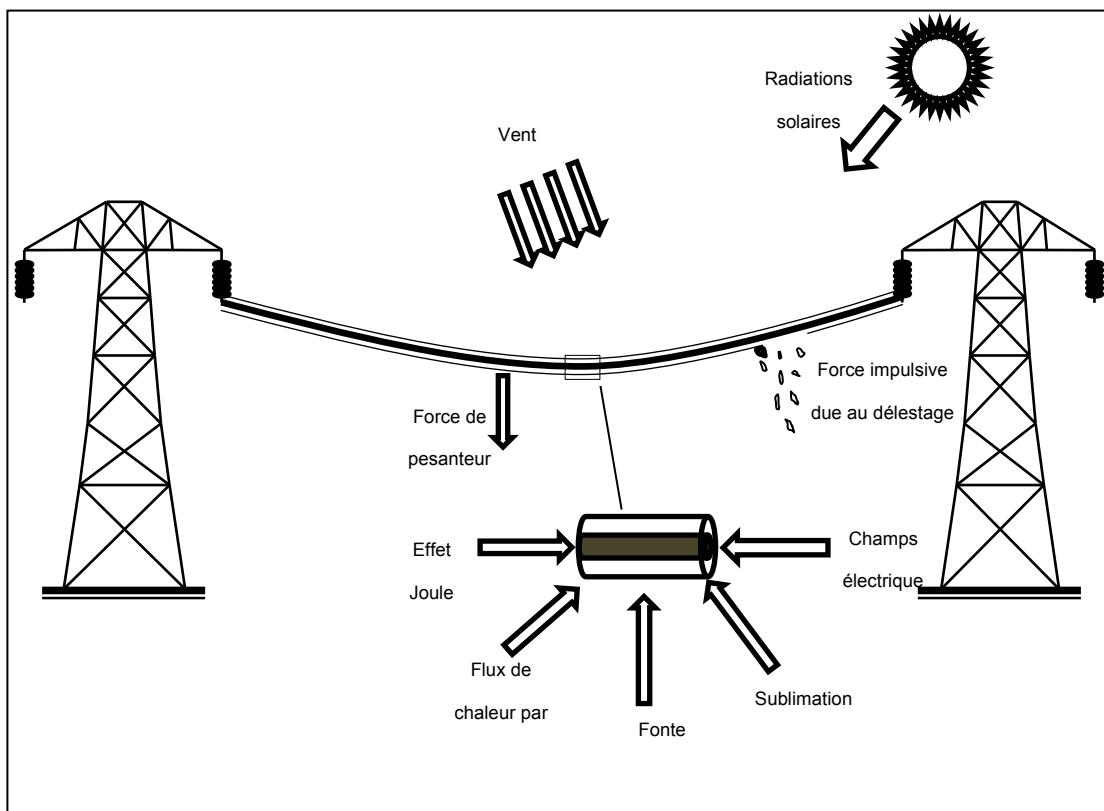


Figure 1-1 : Différents efforts mécaniques et thermiques appliqués sur la glace accumulée sur un câble électrique

Le délestage par bris mécanique est relié aux conditions rhéologiques de la glace atmosphérique, alors que le délestage par fonte et par sublimation sont reliés à ses propriétés thermodynamiques. L'étude couplée du phénomène du délestage est assez complexe et requiert sa décomposition à des problèmes moins embrouillés.

La présente étude s'inscrit comme une continuité des travaux de recherche réalisés sur le délestage de la glace atmosphérique par bris mécanique [9], [10], et aura comme but primordial de comprendre la rupture fragile de ce type de glace et de présenter des critères de rupture empiriques et physiques dans le cas des sollicitations uniaxiales et triaxiales.

1.2 Objectifs

1.2.1 Objectif général

L'objectif principal à atteindre à travers la présente étude est d'analyser le comportement mécanique fragile de la glace atmosphérique, dans le but de comprendre le phénomène du délestage par bris mécanique de la glace atmosphérique.

1.2.2 Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre l'objectif général assigné au projet de thèse, des objectifs spécifiques ont besoin d'être accomplis, les principaux étant :

- **Étudier le comportement mécanique fragile de la glace atmosphérique sous compression uniaxiale et triaxiale** : la glace en général, y compris la glace atmosphérique, montre un comportement ductile pour de faibles taux de déformation, et un comportement fragile pour des taux de déformation relativement élevés. La transition ductile fragile entre les deux modes de déformation est un paramètre important à définir.
- **Déceler les différents paramètres influençant la résistance à la compression de la glace atmosphérique** : le comportement mécanique de la glace atmosphérique est fortement influencé par plusieurs paramètres, tels

que la température, le taux de déformation, la porosité, la pression de confinement, etc. La sensibilité de la résistance à la compression à ces paramètres donne une bonne compréhension de la rupture fragile de la glace atmosphérique.

- **Proposer un critère de rupture empirique sous chargement uniaxial :** l'analyse de sensibilité des résultats expérimentaux permet de proposer un critère empirique sous chargement uniaxial. Ce critère doit prendre en considération l'effet des différents paramètres structureux et environnementaux.
- **Proposer un ou des critères de rupture sous chargement triaxial qui se basent sur les résultats expérimentaux :** la proposition d'un critère de rupture physique permettra de prédire la rupture fragile de la glace atmosphérique, et de mieux comprendre le phénomène de délestage par la suite. Un tel critère se basera sur les résultats des essais triaxiaux et doit incorporer certaines variables physiques de la glace atmosphérique.
- **Modéliser le comportement mécanique fragile de la glace atmosphérique :** l'objectif de modéliser le comportement mécanique fragile de la glace atmosphérique est de fournir des outils de prédiction et d'évaluation de l'état du matériau. Pour cela, une approche qui introduit les réseaux de neurones artificiels sera déployée. Un modèle classique qui se base sur la méthode des éléments finis sera également utilisé pour modéliser et valider le comportement fragile de la glace atmosphérique.

1.3 Méthodologie

1.3.1 Réalisation des tests de compression uniaxiale

- **Préparation de la glace**

Deux types de glace seront préparés, à savoir la glace granulaire poreuse et la glace granulaire désaérée, à différentes températures. Le premier type de glace a été obtenu en accumulant la glace dans la soufflerie réfrigérée à section fermée de la CIGELE. Le but est de simuler les conditions de givrage dans la nature. Le deuxième type de glace, soit la glace granulaire désaérée, a été obtenu à partir de l'eau désaérée congelée dans une enceinte en styrémousse. Le but était de déceler l'effet de la porosité sur le comportement mécanique de la glace atmosphérique.

- **Analyse de la microstructure**

Un microtomographe à rayon X, de type SkyScan, a été utilisé pour caractériser la microstructure de la glace. 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.

- **Machine de test**

Une machine servo-hydraulique à circuit fermé de type MTS sera utilisée pour réaliser les tests de compression uniaxiale et triaxiale. La machine dispose de deux cellules de charge ; 250 KN et 25 KN, d'un capteur de position incorporé dans la traverse mobile qui permet la tracée instantanée des déplacements et, par la suite, l'obtention des déformations.

- **Présentation du critère de rupture uniaxiale**

Les résultats des essais de compression uniaxiale ont permis de déceler l'effet de plusieurs paramètres tels que la température, le taux de déformation et la porosité. Ces résultats ont permis également la présentation d'un critère de rupture empirique.

- **Réseaux de neurones**

Les paramètres influençant le comportement mécanique fragile de la glace atmosphérique, tels que la température, le taux de déformation et la porosité ont été utilisés comme paramètres d'entrée pour le modèle neuronale, la résistance à la compression uniaxiale a été considérée comme réponse du système.

Un perceptron multicouche a été choisi à cette fin, avec apprentissage supervisé et rétropropagation d'erreur. Une fonction de type sigmoïde a été considérée comme fonction de transfert pour les neurones dans les couches cachées.

1.3.2 Réalisation des tests de compression triaxiale

- **Préparation de la glace**

Seule la glace atmosphérique poreuse a été prise en considération dans les tests de compression triaxiale. La glace a été préparée sous des conditions spécifiques, afin de reproduire le processus de givrage naturel.

- **Réalisation des essais expérimentaux**

Une cellule de confinement a été couplée avec la machine de test MTS 810 pour la réalisation des tests. La cellule permet d'avoir un contrôle indépendant de la pression du confinement. Les tests ont été réalisés sous différentes conditions de température, de taux de déformation et de pression de confinement.

- **Présentation de critères de rupture triaxiale**

Les résultats des essais de compression triaxiale permettaient de définir et de proposer des critères de rupture adéquats pour la glace atmosphérique. À cet effet, trois critères de rupture seront considérés : Mohr-Coulomb, Hoek-Brown et Larme.

- **Modélisation par éléments finis**

Un modèle éléments finis a été proposé en utilisant le code commercial Abaqus. La réponse élastique de la glace a été prise en considération par le module de Young, tandis que la rupture a été modélisée par le critère de Mohr-Coulomb. La modélisation a été réalisée en mode dynamique explicite.

1.4 Originalités

À la suite de l'état actuel de l'art dans le domaine de la caractérisation mécanique de la glace atmosphérique, plus spécifiquement à la problématique du délestage par bris mécanique de la glace sur les lignes de transport électrique, il semble que la littérature scientifique reste limitée dans l'étude de la rupture de ce type de glace.

L'étude de la rupture fragile de la glace atmosphérique sous différentes conditions expérimentales reste une contribution originale aux travaux antérieurs sur la thématique du délestage de la glace. L'introduction de l'effet de la porosité sur le comportement mécanique de la glace atmosphérique reste une originalité spécifique à la présente étude.

La proposition d'un critère de rupture empirique, basé sur les résultats des essais de compression uniaxiale, est un point original de la présente étude. Le critère proposé prend en considération l'effet de la température, la porosité, ainsi que le taux de déformation. Le critère reproduit le comportement uniaxial de la glace atmosphérique avec une bonne précision. L'identification des paramètres intrinsèques de la glace dans le critère de rupture proposé, ainsi que la détermination des effets de la température et du taux de déformation sur ces paramètres, présente également un point original de la présente étude.

Les critères élaborés dans la littérature pour modéliser la rupture de la glace sont souvent des critères associés à des matériaux fragiles, qui omettent l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement mécanique de la glace. L'un des critères de rupture proposé prend en considération l'effet de la température au voisinage du point de fusion et reproduit avec une bonne fidélité la rupture fragile de la glace atmosphérique.

La proposition d'un algorithme à la base des réseaux de neurones pour prédire la rupture fragile de la glace atmosphérique est unique à ce projet. À la connaissance de l'auteur, ce genre d'algorithme qui se base sur les principes de l'intelligence artificielle n'a jamais été utilisé dans ce cadre.

1.5 Structure de la thèse

Le chapitre deux expose une revue de la littérature, on y trouve une présentation de la structure cristalline de la glace, l'aspect météorologique du givrage atmosphérique, ainsi que la problématique du délestage de la glace atmosphérique. Le chapitre présente par la suite une analyse des différents efforts appliqués sur la glace atmosphérique accumulée sur un conducteur électrique. L'analyse de ces efforts englobe une présentation des différents phénomènes physiques associés, ainsi que la formulation mathématique des forces engendrées. Le chapitre aborde également une présentation des mécanismes de la rupture fragile. Le chapitre se termine par une présentation des différents mécanismes de rupture et des différents critères de rupture associés à la rupture fragile de la glace.

Le chapitre trois présente la méthodologie expérimentale proposée pour le projet de thèse. Les différentes étapes de la préparation de la glace, l'étude de sa microstructure, ainsi que la réalisation des essais de compression uniaxiale et triaxiale sont présentées. Une présentation de matériels et méthodes utilisés dans l'étude est également abordée dans ce chapitre.

Au chapitre quatre, une analyse détaillée des données expérimentales est présentée, l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement structural de la glace atmosphérique a été décelée. Cette analyse permet la proposition d'un critère de rupture empirique uniaxial. Le chapitre présente également la validation du critère de rupture empirique par les résultats expérimentaux en compression uniaxiale, ainsi qu'en traction uniaxiale. La dernière section du chapitre est consacrée à la présentation de l'approche neuronale. Les résultats illustrés dans les sections précédentes du chapitre quatre seront exploités pour former et tester le réseau de neurones. Le chapitre expose une comparaison entre les résultats de prédiction via les réseaux de neurones avec les résultats expérimentaux.

Le chapitre cinq expose une analyse des résultats des essais de compression triaxiale, l'analyse de ces résultats permet de présenter des critères de rupture convenables. Les constantes matérielles incorporées dans les critères sont identifiées. Le chapitre présente également une validation du comportement fragile et une modélisation par éléments finis en utilisant le critère de Mohr-Coulomb.

Chapitre 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Structure cristalline et classification de la glace atmosphérique

La glace est un matériau polycristallin et sa formation, de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique, dépend de plusieurs paramètres tels que la température, la pression, la vitesse d'écoulement, le taux d'humidité, etc. [11]. Ces paramètres influent sur la disposition des monocristaux au sein du réseau cristallin de la glace qui font partie des douze groupes *allotropiques* [12]. À de très basses températures (en dessous de -140°C), la glace présente une structure amorphe.

À une échelle microscopique, la distribution des molécules d'eau s'effectue selon un arrangement cristallin bien défini, ce qui donne naissance à une symétrie hexagonale. Dans la glace naturelle, les atomes d'oxygène sont arrangés selon un motif tétraédrique [13]. En conséquence, l'arrangement moléculaire donne naissance à une structure cristalline à symétrie hexagonale, selon laquelle les molécules sont concentrées autour d'une série de *Plans Basals*, l'axe normal à ce plan constitue l'axe c de la maille hexagonale (voir Figure 2-1).

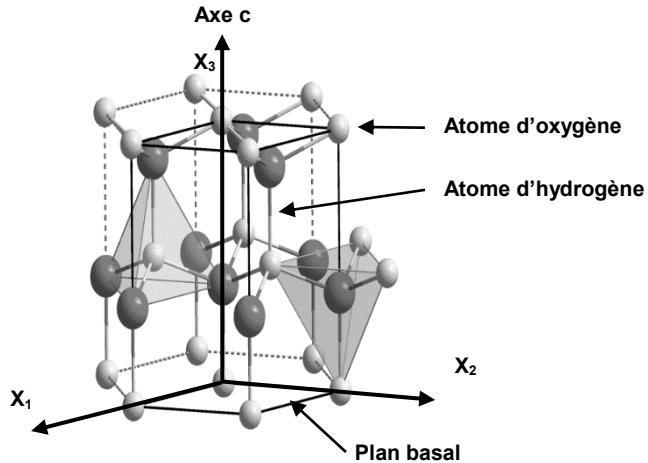


Figure 2-1 : Présentation hexagonale du monocristal de la glace [12]

Dépendamment des conditions météorologiques, de la forme des grains, leur taille et leurs orientations cristallographiques, la structure cristalline de la glace peut être classifiée sous plusieurs types [14]. Dans le cas d'une classification basée sur la texture de la glace, on se base souvent sur la morphologie des grains, leur distribution ainsi que sur l'orientation de l'axe-c (axe qui définit l'orientation de la maille hexagonale de l'arrangement monocristallin de la glace), comme illustré à la Figure 2-1 et qui détermine l'orientation cristalline de la glace [15].

En se basant sur les travaux effectués par Michel et Ramseier [14], Eskandarian [9] a classifié la glace atmosphérique en trois catégories en fonction de sa texture: glace granulaire, glace colonnaire (S1, S2 et S3) ainsi qu'une texture sous forme de plumes, qui est une transition de la glace colonnaire S1 vers la glace granulaire.

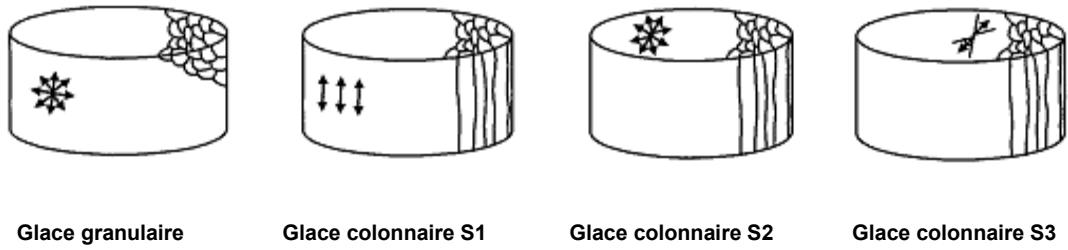


Figure 2-2 : Morphologie cristallographique de la glace colonnaire et granulaire [9]

La glace granulaire est caractérisée par la morphologie de ses grains ainsi que l'orientation aléatoire de l'axe-c. Ceci donne naissance à un comportement mécanique isotrope, indépendamment de l'anisotropie des monocristaux de la glace [9].

Lorsque les grains se développent sous une forme colonnaire, selon leur orientation par rapport à l'axe-c, ils donnent naissance à d'autres types de structure, en particulier les structures S1, S2 et S3. Pour la glace S1, l'orientation cristallographique de l'axe-c est parallèle à la direction colonnaire. Pour la glace S2, l'orientation cristallographique de l'axe-c est perpendiculaire à la direction des colonnes. Dans ces conditions, les deux types de glace sont considérés comme isotropes transverses et leur plan d'isotropie coïncide avec la direction perpendiculaire à l'axe des colonnes.

La présence des forts courants (d'eau) durant le processus de cristallisation donne naissance à une orientation privilégiée de l'axe-c, qui forme la glace colonnaire S3, qualifiée comme glace orthotrope.

2.2 Aspect météorologique du givrage atmosphérique

Le terme glace atmosphérique ou givrage atmosphérique décrit le processus de l'accrétion de la glace sur une surface exposée à l'air ambiant, dit atmosphère [1], [3]–[6], [16].

Le taux de croissance de la glace dépend du flux d'air et des conditions thermiques de la surface, soit les conditions météorologiques. Deux phénomènes météorologiques peuvent être responsables d'un événement de givrage ; givrage par nuages ou givrage par précipitations (Tableau 2-1) [1].

Le givrage par nuages se produit lors du contact des gouttelettes d'eau en surfusion avec une surface, les gouttelettes sont suffisamment petites pour rester suspendues dans les nuages, leur mouvement résulte de la circulation de l'air. Dépendamment de la teneur en eau liquide (LWC), de la taille et de la distribution des gouttelettes dans le nuage, de la température et de la vitesse du vent, le givre dur (lourd) ou le givre mou (léger) peut se produire (Figure 2-3).

Lorsque les gouttelettes d'eau en surfusion arrivent sur une surface sèche et froide, elles gèlent dès que la chaleur latente de fusion est dissipée. Si la température de surface est proche du 0°C, les gouttelettes d'eau gèlent lentement et les particules d'air emprisonnées entre les gouttelettes ont le temps pour s'échapper, donnant naissance à une glace nommée givre lourd, transparente et ayant une densité qui varie entre 0.6 et 0.9 [8]. «Si la température de la surface est en dessous de -5°C, les gouttelettes gèlent rapidement une fois arrivées à la surface, l'air emprisonné dans les interstices n'a pas le temps de s'échapper, donnant naissance à une glace opaque d'une apparence blanchâtre, ayant une densité inférieure à 0.6. Ce type de glace est nommée givre léger.

Le givrage par précipitations peut entraîner la formation du verglas ou de la neige collante, selon comment les précipitations sont influencées par les variations de la température avec l'altitude [2].

Les cristaux de glace atmosphérique sont formés dans les nuages par nucléation des «noyaux de gel» dans l'atmosphère au-dessous de -12°C, ou par gel des gouttelettes d'eau mesurant 20 à 50 µm de diamètre à une température comprise entre -3 et -35°C. La forme initiale du cristal est hexagonale. Ce dernier continue d'évoluer en fonction de la température et de l'humidité. La croissance des cristaux de glace commence par un procédé de dépôt en phase vapeur, pour atteindre une taille millimétrique, suivi d'un processus de liaison mécanique avec d'autres cristaux de glace, ce qui donne des flocons de neige qui tombent sous l'effet de gravité [1].

Au cours des précipitations, si les flocons de neige passent par une isotherme 0°C, ils rencontrent de l'air ayant une température légèrement positive, le processus de croissance de ces flocons s'arrête en raison de l'échange faible avec l'atmosphère, une couche superficielle liquide se développe sur les cristaux, donnant naissance à ce qu'on appelle neige mouillée, ayant une densité variant entre 0.4 et 0.6.

Si la profondeur de l'isotherme est suffisamment importante, les flocons de neige passent par une zone d'inversion de température, ils se fondent totalement et se transforment à des gouttes de pluie. Lorsque ces gouttes de pluie tombent dans une couche de congélation près de la surface de la Terre, ils deviennent en surfusion et peuvent rester à l'état liquide jusqu'à ce qu'elles rencontrent une surface sur laquelle elles gèlent immédiatement lors de l'impact. Ce type de précipitation est nommé verglas, ayant une densité de 0.9 et une apparence transparente due à la faible présence des bulles d'air piégées par les gouttes d'eau. [17].

Tableau 2-1 : Caractéristiques météorologiques de formation des différents types de glace [18]

Types de glace	Densité (g/cm ³)	Température (°C)	Vitesse de vent (m/s)	Apparence	Adhésion	Taille des gouttelettes	Teneur en eau liquide	Durée typique d'une tempête
Givrage par nuages								
Givre mou (léger)	0,4 à 0,6	-20 à -1	<10	Blanche	Moyenne	Petite	Faible	Jours
Givre dur (lourd)	0,7 à 0,9	-10 à -1	10<	Opaque à transparente	forte	Moyenne	Moyenne	Jours
Givrage par précipitation								
Verglas	0,9	-4 à 0	0 à 10	Transparente	forte	Moyenne à grande	Élevée	Heures
Neige collante	0,4 à 0,6	-1 à 2	0 à 20	Blanche	Moyenne	Flocon	Très élevée	Heures

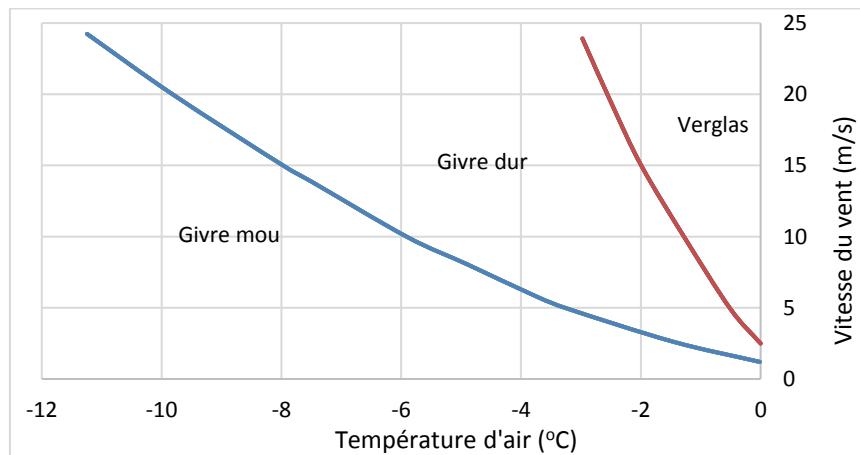


Figure 2-3 : Différents types de la glace atmosphérique en relation avec les conditions météorologiques (figure reproduite d'après [19])

2.3 Analyse des efforts appliqués sur un manchon de glace

Comme illustré à la Figure 1-1, la glace accumulée sur les conducteurs électriques subit des efforts de différentes natures. L'estimation des efforts appliqués sur une ligne de transport électrique passe par une analyse approfondie des différents phénomènes physiques associés.

2.3.1 Efforts d'origine mécanique

2.3.1.1 Effet du vent

Les lignes de transport électrique sont continuellement exposées aux forces du vent. Cela les rend susceptibles au développement des mouvements cycliques. Ces mouvements peuvent prendre la forme de vibrations éoliennes, galops ou oscillations induites par sillage. Dans chacun des cas, des quantités de charges mécaniques induites par le vent sont régulièrement absorbées par les conducteurs [1], [20], [21].

- **Vibrations éoliennes**

Les vibrations éoliennes sont associées aux fluctuations de la pression appliquée par le vent sur la surface d'un conducteur [10], [22]. Ces fluctuations sont dues à l'effusion des tourbillons au-dessus et en dessous du conducteur. L'aérodynamique de ce type de mouvement est caractérisée par le nombre de Reynolds présenté par l'expression :

$$R_e = \frac{Vd}{\nu} \quad (2.1)$$

Où V est la vitesse du vent, d est le diamètre du conducteur, et ν est la viscosité cinétique de l'air.

Dans le cas des écoulements turbulents ($R_e > 2000$), la couche limite reste laminaire au voisinage du point d'arrêt jusqu'au point de la séparation, comme illustré à la Figure 2-4. La couche de cisaillement procédant du point de séparation subit une transition et s'enroule sur elle-même pour former un tourbillon qui va rentrer en aval dans le sillage.

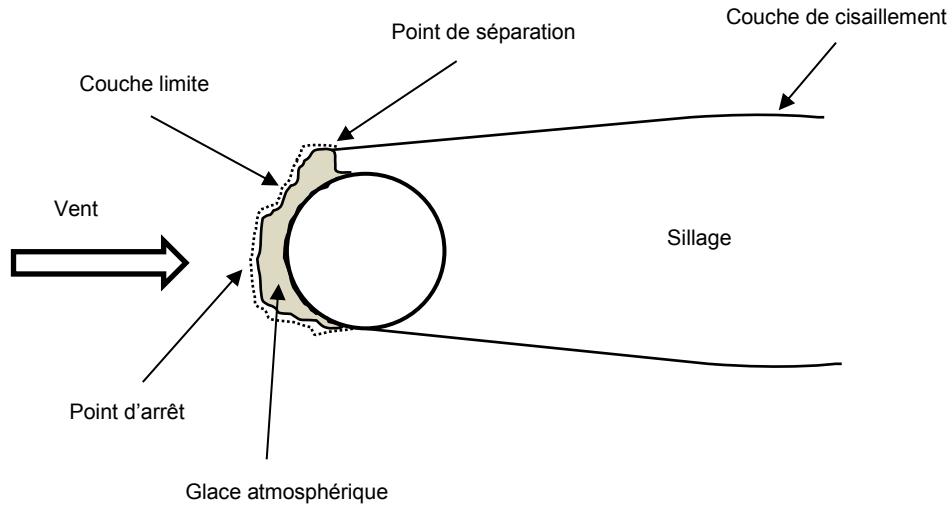


Figure 2-4 : Distribution de l'écoulement autour d'un conducteur en présence de la glace atmosphérique (figure reproduite à partir de [22])

La fréquence de formation des tourbillons dans la zone de sillage est reliée à la vitesse de l'écoulement (vitesse du vent) par le nombre de Strouhal :

$$f_v = \frac{S_n V}{d} \quad (2.2)$$

Où f_v est la fréquence de formation des tourbillons en *Hertz*, S_n est le nombre de Strouhal, V est la vitesse du vent, et d est le diamètre du conducteur.

Les vibrations éoliennes d'un conducteur sont amorcées lorsque la fréquence de formation des tourbillons se rapproche de sa fréquence de résonance. Elles prennent la forme d'une onde sinusoïdale à travers la section du conducteur, ayant une fréquence qui varie de 3 à 150 Hz et une amplitude qui peut atteindre le diamètre d du conducteur. La puissance P transmise par le vent vers le conducteur peut être exprimée comme [23]:

$$P = d^4 f^3 fnc\left(\frac{Y}{d}\right) \quad (2.3)$$

Où Y est l'amplitude des vibrations et la fonction $fnc\left(\frac{Y}{d}\right)$ est déterminée à partir des essais expérimentaux .

Le phénomène des vibrations éoliennes a été examiné par plusieurs chercheurs [24], [25]. Ce phénomène induit des contraintes sur la glace atmosphérique accumulée sur un conducteur. Ces contraintes peuvent être estimées en analysant le comportement vibratoire d'un câble. Les efforts mécaniques sur un morceau de glace peuvent être évalués en résolvant les équations de mouvement d'un câble suspendu données par Abdel-Rohman et Spencer [26] :

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[(T_0 + \tau) \frac{\partial(x + U)}{\partial s} \right] = m \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[(T_0 + \tau) \frac{\partial(y + V)}{\partial s} \right] = -mg + m \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + c \frac{\partial V}{\partial t} + F_v(s, t) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[(T_0 + \tau) \frac{\partial W}{\partial s} \right] = m \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + c \frac{\partial W}{\partial t} + F_w(s, t) \quad (2.6)$$

Où s est l'abscisse curviligne, t est le temps, x est la coordonnée spatiale tout au long du câble, $y(s)$ est le profil statique du câble, $U(s, t)$, $V(s, t)$ et $W(s, t)$ sont respectivement les déplacements dans les plans horizontal, vertical et transversal, m est la masse par unité de longueur, c est le coefficient d'amortissement par unité de longueur, T_0 est la tension statique du câble, τ est la tension dynamique additionnelle dans le câble, $F_v(s, t)$ et $F_w(s, t)$ sont les chargements externes par unité de longueur dans la direction verticale et transversale respectivement.

Afin d'estimer les contraintes induites par le mouvement vibratoire du câble sur la glace atmosphérique, Kermani [10] a réécrit l'équation (2.5) sous la forme :

$$HV_{(x,t)}^n + h_{(t)} \left(\frac{-8d}{L^2} \right) = m\ddot{V} + c\dot{V} + F_0 \sin\omega_s t \quad (2.7)$$

La solution de cette équation permet d'évaluer l'effort appliqué sur le câble par les vibrations éoliennes. Pour résoudre l'équation (2.7), on suppose que :

$$V_{(x,t)} = \sum_i k_0 \varphi_i(x) T_i(t) \quad (2.8)$$

Et

$$h_{(t)} = \sum_i \tilde{h} T_i(t) \quad (2.9)$$

Où $\varphi_i(x)$ est le $i^{\text{ème}}$ mode donné par :

$$\varphi_i(s) = 1 - \tan\left(\frac{1}{2}\beta L\right) \sin(\beta x) - \cos(\beta x) \quad (2.10)$$

Et

$$k_0 = \frac{8d\tilde{h}}{H(\beta L)^2}, \quad \beta = \omega_2 \sqrt{\frac{m}{H}} \quad (2.11)$$

L'équation (2.7) peut être réécrite sous la forme différentielle suivante :

$$a_2 \ddot{T}(t) - a_1 \dot{T}_n(t) + a_0 T_n(t) = \frac{GF_0}{\tilde{h}} \sin \omega_s t \quad (2.12)$$

Avec :

$$a_0 = \frac{8d}{L^2} \left(\frac{A}{\beta^2} - G \right), \quad a_1 = -c \frac{8d}{H(\beta L)^2} B \quad \text{et} \quad a_1 = -m \frac{8d}{H(\beta L)^2} B \quad (2.13)$$

La solution de l'équation (2.12) prendra la forme suivante :

$$T(t) = A_1 e^{\lambda_1 t} + B_1 e^{\lambda_2 t} + P \cos \omega_s t + q \sin \omega_s t \quad (2.14)$$

- **Galops**

Un conducteur de profil cylindrique subit seulement la force aérodynamique de trainée, qui est parallèle au vecteur de la vitesse du vent, et tend à repousser le conducteur. La présence de la glace atmosphérique sur le conducteur altère son profil aérodynamique (Figure 2-5). Cette altération a comme effet de générer une portance qui, sous l'effet du vent, tend à soulever le conducteur, ainsi qu'un moment aérodynamique qui fait tourner le conducteur autour de lui-même.

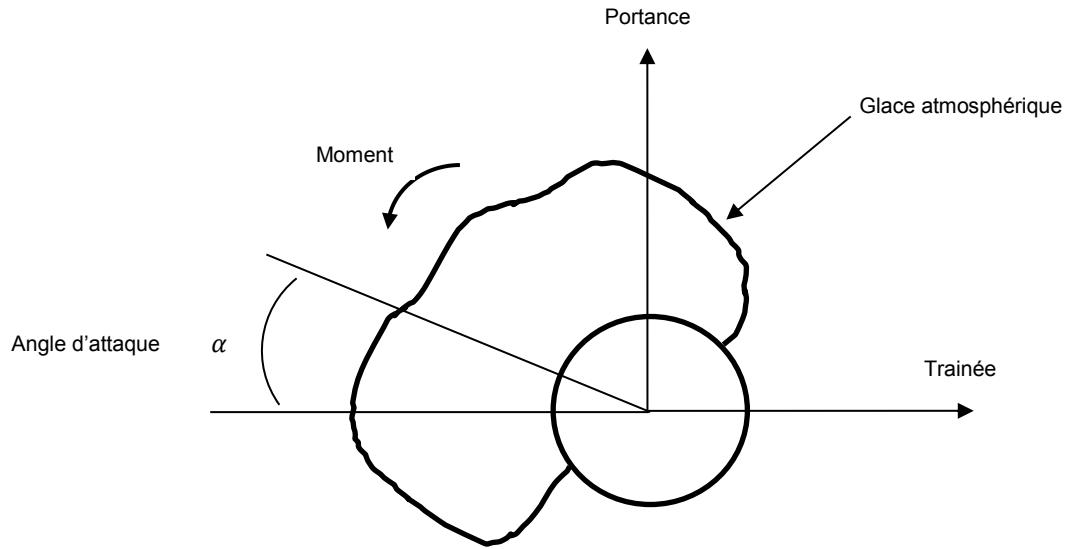


Figure 2-5 : Composantes des forces aérodynamiques

Les forces aérodynamiques et le moment sont proportionnels au carré de la vitesse du vent, et s'expriment en fonction des coefficients aérodynamiques :

$$F_{trainée} = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_{trainée}$$

$$F_{portance} = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_{portance} \quad (2.15)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho V^2 A d C_{moment} \quad (2.16)$$

Où ρ est la densité du vent, V est la vitesse du vent, A est la surface glace-conducteur exposée au vent dans un plan perpendiculaire à l'écoulement, d est le diamètre du conducteur, les coefficients $C_{trainée}$, $C_{portance}$ et C_{moment} sont les coefficients aérodynamique de trainée, portance et moment respectivement.

L'estimation des contraintes accumulées dans la glace atmosphérique à la suite des galops passe par une analyse du comportement vibratoire des câbles électriques, généré par les forces aérodynamiques. Les équations de mouvement d'un câble suspendu présentées par [26] dans la section précédente seront considérées (Équations (2.4), (2.5), et (2.6)).

Kermani et al [20] ont considéré une solution en terme du déplacement vertical et transversal. Puisque le rapport flèche/longueur du câble est souvent inférieur à un huitième, le déplacement horizontal peut être négligé. Le système représentant les équations de mouvement se résume aux équations (2.5) et (2.6). Une solution de ce système peut être obtenue par séparation :

$$V(s, t) = \varphi_1(s)V(t) \quad (2.17)$$

$$W(s, t) = \varphi_2(s)W(t) \quad (2.18)$$

Où φ_1 et φ_2 sont les modes dans les directions transversale et verticale respectivement. Les deux modes peuvent être déterminés comme [26] :

$$\varphi_1(s) = A_n \sin\left(n \frac{\pi s}{L}\right) \quad (2.19)$$

$$\varphi_2(s) = k_0 \left(1 - \tan\left(\frac{\omega\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega\pi s}{L}\right) - \cos\left(\frac{\omega\pi s}{2}\right) \right) \quad (2.20)$$

Où k_0 est une constante choisie pour que $\varphi\left(\frac{L}{2}\right) = 1$ et $\omega = \omega_2/\omega_1$, ω_1 et ω_2 sont les fréquences naturelles dans les directions transversale et verticale respectivement. Ces deux fréquences peuvent être obtenues comme suit :

$$\omega_1 = n\pi\sqrt{H/ml} \quad (2.21)$$

$$\omega_2 = q\sqrt{H/m} \quad (2.22)$$

Où H est la composante horizontale de la tension du câble qui est déterminée en résolvant l'équation suivante :

$$\alpha = H \left[\cosh\left(\frac{mgl}{2H}\right) - 1 \right] / mg \quad (2.23)$$

Où α est la flèche du câble et q peut être calculée à partir de l'équation suivante [20], [27] :

$$\tan\left(\frac{ql}{2}\right) = \left(\frac{ql}{2}\right) - \left(\frac{4}{\lambda^2}\right) \left(\frac{ql}{2}\right)^3 \quad (2.24)$$

Le paramètre λ^2 prend la forme :

$$\lambda^2 = \frac{(8\alpha)^2}{l \left(\frac{HL_e}{E_c A_c} \right)} \quad (2.25)$$

$$L_e = \int_0^l \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 dx \approx l \left(1 + \frac{8d^2}{l^2} \right) \quad (2.26)$$

En substituant les équations (2.17)-(2.26) dans les équations (2.5) et (2.6), et en appliquant la méthode de Galerkin [26], les équations de mouvement du câble peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\ddot{W} + 2\xi_1 \dot{W} + \omega_1^2 W + n_5 WV^2 + n_6 WV^2 + n_7 WV^3 = F_1(t) \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned}
& \ddot{V} + 2\xi_2\omega_2\dot{V} + \omega_2^2V + n_1V^2 + n_2W^2 + n_3V^3 + n_4WV^2 + F_2(t) \\
& = 0
\end{aligned} \tag{2.28}$$

Où ξ_1 et ξ_2 sont des coefficients d'amortissement dans les directions transversale et verticale respectivement. $F_1(t)$ et $F_2(t)$ sont déterminées comme suit :

$$\begin{aligned}
F_1(t) &= d_0 + d_1\dot{W} + d_2\dot{W}^2 + d_3\dot{V} + d_4\dot{W}\dot{V} + d_5\dot{V}^2 \\
&+ \sum_{k=3}^N d_{(2k)}\dot{V}^k + \sum_{k=3}^N d_{(2k+1)}\dot{V}^k\dot{W}^{(k-2)}
\end{aligned} \tag{2.29}$$

$$\begin{aligned}
F_2(t) &= e_0 + e_1\dot{W} + e_2\dot{W}^2 + e_3\dot{V} + e_4\dot{W}\dot{V} + e_5\dot{V}^2 \\
&+ \sum_{k=3}^N e_{(2k)}\dot{V}^k + \sum_{k=3}^N e_{(2k+1)}\dot{V}^k\dot{W}^{(k-2)}
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Les coefficients d_i , e_i et n_i ont été définis par Kermani [10]. Les deux équations (2.29) et (2.30) présentent également les expressions des charges appliquées directement par les forces aérodynamiques. Ces forces, comme mentionnées avant, sont responsables des instabilités structurales et des mouvements vibratoires. Également, elles exercent des charges directes sur la surface de la glace atmosphérique.

Finalement, la combinaison des équations (2.27), (2.28), (2.29) et (2.30) permet d'obtenir les équations générales du galop d'un câble électrique :

$$\begin{aligned}
& \ddot{W} + 2\xi_1\omega_1\dot{W} + \omega_1^2W + n_5WV^2 + n_6WV^2 + n_7WV^3 \\
& = d_0 + d_1\dot{W} + d_2\dot{W}^2 + d_3\dot{V} + d_4\dot{W}\dot{V} + d_5\dot{V}^2 \\
& + \sum_{k=3}^N d_{(2k)}\dot{V}^k + \sum_{k=3}^N d_{(2k+1)}\dot{V}^k\dot{W}^{(k-2)}
\end{aligned} \tag{2.31}$$

$$\begin{aligned}
& \ddot{V} + 2\xi_2\omega_2\dot{V} + \omega_2^2V + n_1V^2 + n_2W^2 + n_3V^3 + n_4WV^2 + e_0 + e_1\dot{W} \\
& + e_2\dot{W}^2 + e_3\dot{V} + e_4\dot{W}\dot{V} + e_5\dot{V}^2 + \sum_{k=3}^N e_{(2k)}\dot{V}^k \\
& + \sum_{k=3}^N e_{(2k+1)}\dot{V}^k\dot{W}^{(k-2)} = 0
\end{aligned} \tag{2.32}$$

- **Oscillations induites par sillage**

Les oscillations induites par sillage sont un phénomène exclusif aux faisceaux de conducteurs (groupe de deux, trois ou quatre conducteurs ; leur écartement est constant et assuré par une entretoise). Ces oscillations sont dues aux détachements tourbillonnaires produits dans le sillage du conducteur amont. Comme montré à la Figure 2-6, le conducteur aval acquiert son énergie d'oscillation lorsqu'il se déplace en bas vers l'écoulement fort dû au sillage du conducteur amont.

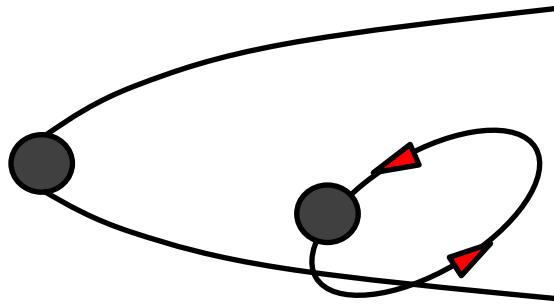


Figure 2-6 : Oscillation induite par sillage dans un double conducteur (figure reproduite à partir de [22])

Le phénomène des oscillations par sillage induit des mouvements de différentes formes sur les lignes de transport électrique. On peut distinguer les mouvements de respiration, de galop vertical, de galop horizontal ou serpent et de torsion. Ces mouvements sont schématisés à la Figure 2-7.

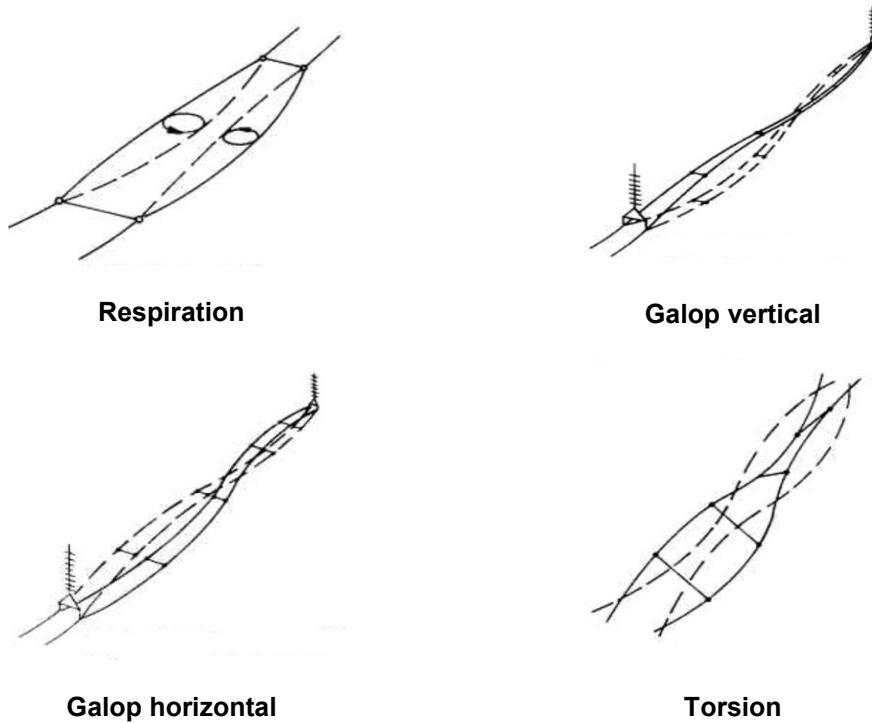


Figure 2-7 : Classification des oscillations induites par sillage [10]

Les sollicitations mécaniques engendrées par les oscillations induites par sillage peuvent être déduites de la même manière présentée dans les sections précédentes, tout en se basant sur les équations de mouvement d'un câble suspendu données par Abdel-Rohman et Spencer [26], et exprimées par les expressions mathématiques (2.4), (2.5) et (2.6).

Les trois phénomènes vibratoires présentés dans les sections précédentes peuvent être résumés dans le Tableau 2-2.

Tableau 2-2 : Comparaison entre les trois types de mouvements vibratoires [28]

	Vibrations éoliennes	Galops	Oscillations induites par sillage
Type de ligne électrique affecté	Tout	Tout	Faisceaux de conducteurs
Gamme de fréquence (Hz)	3 à 150	0.08 à 3	0.15 à 10
Gamme de vibration (par rapport au diamètre du conducteur)	0.01 à 1	5 à 300	0.5 à 80
Vitesse de vent (m/s)	1 à 7	7 à 18	4 à 18
Temps requis pour développer un dommage	3 mois à 20 ans	1 à 48 heures	1 mois à 8 ans
Cas de dommage	Fatigue des métaux due à la flexion cyclique	Grands chargements dynamiques	Choc entre conducteur et phénomènes électriques associés

2.3.1.2 Force de pesanteur

- **Tension due au poids de la glace**

La masse de la glace atmosphérique accumulée sur un câble électrique peut engendrer des charges statiques importantes. Le poids de la glace augmente la tension du câble et réduit par la suite sa capacité d'auto-amortissement. La tension dans un câble givré peut être subdivisée entre la section du câble et la section de glace comme suit :

$$T_{câble} = \frac{TA_{câble}E_{câble}}{(A_{câble}E_{câble} + A_{glace}E_{glace})} \quad (2.33)$$

$$T_{glace} = \frac{TA_{glace}E_{glace}}{(A_{câble}E_{câble} + A_{glace}E_{glace})} \quad (2.34)$$

Où E_{glace} et $E_{câble}$ sont les modules de Young de la glace atmosphérique et du câble respectivement. A_{glace} et $A_{câble}$ sont les deux sections de la glace et du câble. T est la tension du câble entier.

Le poids de la glace atmosphérique accumulée sur un conducteur électrique affecte sa résistance aux charges induites par les différents efforts thermiques et mécaniques. La glace atmosphérique peut tomber sous l'effet de son poids si la force adhésive entre glace-câble est vaincue par l'effet Joule ou la température ambiante. La surcharge en poids de la glace peut contribuer à la propagation des fissures. L'inertie de la glace peut mener à sa rupture à la suite des mouvements du câble, notamment les vibrations.

- **Torsion**

L'accumulation de la glace atmosphérique sur un conducteur n'est pas toujours uniforme [29] (Figure 2-8). Cette non-uniformité dans la distribution de la glace atmosphérique sur la section d'un conducteur décentralise le centre de masse du système câble-glace et induit par la suite un moment de torsion autour de l'axe horizontal, comme illustré à la Figure 2-9 :

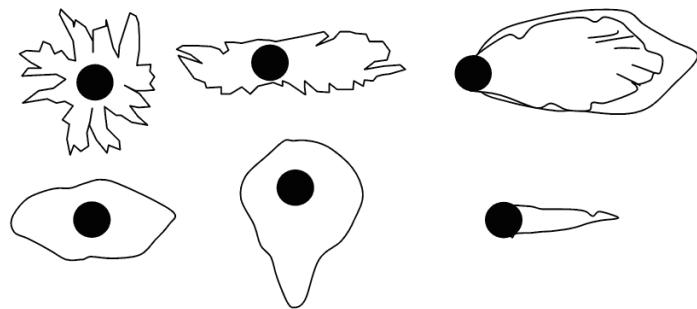


Figure 2-8 : Différentes formes d'accumulation de la glace atmosphérique sur câble

(figure reproduite à partir de [30])

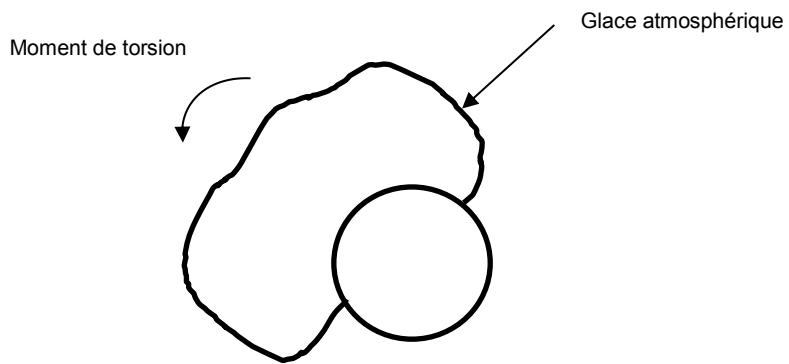


Figure 2-9 : Moment appliqué par le poids de la glace atmosphérique

Le moment de torsion illustré à la Figure 2-9 est engendré par le poids de la glace, il est différent du moment aérodynamique appliqué par les forces aérodynamique schématisé à la Figure 2-5, et explicité dans l'équation (2.16).

L'angle de rotation d'un câble givré dépend de son module de rigidité en torsion et de la quantité de la glace accumulée. La relation entre la rotation du câble θ et le moment de rotation $T_{câble}$ peut s'exprimer comme suit [20] :

$$\theta = \frac{T_{câble}L}{2GJ} \quad (2.35)$$

Où GJ est la rigidité en torsion du câble, L est sa longueur. Une fois qu'on détermine θ , le moment de retour élastique T_{glace} appliqué par le câble sur la glace atmosphérique peut être déterminé comme suit :

$$T_{glace} = \frac{2\theta L_l GJ}{L^2} \quad (2.36)$$

Où L_l est la longueur de la partie du câble concernée. Puisqu'on a toujours $L_l \ll L$, le moment T_{glace} est significativement plus petit que les autres efforts discutés dans les sections en dessus.

2.3.1.3 Autres efforts

La glace sur les lignes électriques peut subir d'autres charges dues à différentes sources, on parle des impacts des objets volants, des impacts soudains à la suite de la rupture d'un câble voisin, contournements électriques [10].

2.3.2 Efforts d'origine thermique

La glace accumulée sur un câble électrique subit généralement deux efforts d'origine thermique, l'effet Joule et les fluctuations de la température ambiante. Zsolt [31] a montré que l'intensité de courant nécessaire pour chauffer la glace par effet Joule peut être exprimée comme suit :

$$I = \sqrt{\frac{T_{câble} - T_{ambiente}}{RK_s} \left(\frac{1}{\frac{1}{2K_i\pi} \ln\left(\frac{r_g}{r_c}\right) + \frac{1}{2r_g\pi h}} \right)} \quad (2.37)$$

R étant la résistance électrique du câble, K_s étant le facteur de l'effet de peau, K_i est la conductivité de la glace, r_g est le rayon de la glace autour du câble (épaisseur de la glace plus rayon du câble), r_c est le rayon du câble, $T_{câble}$ et $T_{ambiente}$ sont la température du câble et la température ambiante respectivement, h est le coefficient d'échange thermique par conduction, qui peut être déterminé par :

$$h = k_a \sqrt{\frac{U}{2\nu_{vent}r_g}} \quad (2.38)$$

Où U est la vitesse du vent, k_a est la conductivité thermique de l'air, ν_{vent} est la viscosité cinétique de l'air.

Kermani [10] a accumulé de la glace atmosphérique sur un câble de type BERSIMIS, avec une vitesse de 10 m/s à une température de -10°C. Après l'accumulation, la température du milieu a été remise à -25°C pour une heure. Un courant électrique d'une intensité de 2150 A a été appliqué sur le câble pour 45 min.

La température de l'ensemble câble-glace a atteint -2°C. La glace atmosphérique a été inspectée et aucune fissuration n'a été détectée. Après avoir enlevé le courant électrique, l'ensemble câble-glace a été laissé en relaxation pendant une heure pour atteindre la température de -25°C. Après, l'ensemble a été exposé à un courant d'air chaud à une température de 20°C ayant une vitesse de 5 m/s pour 10 min. Après inspection, aucune activité de fissuration n'a été observée dans la glace.

Ceci montre que les contraintes d'origine thermique ont peu d'influence sur la résistance de la glace atmosphérique. Ni l'effet Joule, ni les fluctuations de la température ambiante ne peuvent être d'une grande influence sur le délestage de la glace atmosphérique par bris mécanique sur les câbles électriques.

2.4 Problématique du délestage de la glace atmosphérique

L'événement du givrage d'un câble électrique se déroule en trois phases [7], [8], [32]: une phase d'accumulation, une phase d'endurance ou de persistance et une dernière phase de délestage (Figure 2-10).

La première phase, qui est la phase *d'accumulation*, se caractérise par une croissance rapide du dépôt de la glace. La deuxième étant la phase *d'endurance*, cette phase est caractérisée par une stabilité dans le dépôt de glace, généralement accompagnée d'une croissance ou d'une décroissance lente, qui peut persister pendant quelques secondes jusqu'à quelques jours. Quant à la troisième phase, nommée phase de *délestage*, elle est distinguée par une décroissance très rapide, parfois soudaine, du dépôt de glace.

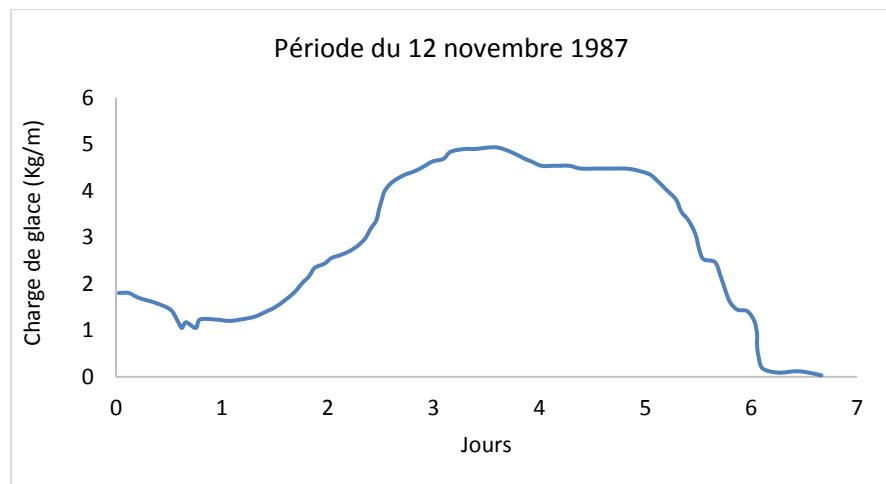


Figure 2-10 : Événement de givrage atmosphérique en trois phases (courbe reproduite d'après de [7])

Le délestage de la glace atmosphérique accumulée sur une structure correspond à la réduction brutale de sa masse. Ce mécanisme génère beaucoup d'instabilités sur le réseau de transport électrique ; la chute soudaine de la glace accumulée sur les câbles génère des sollicitations dynamiques qui peuvent être responsables de la rupture des pylônes, ou même de la rupture en cascade de plusieurs pylônes [1]. Il peut en résulter des contournements électriques lorsqu'un isolateur rebondit et se rapproche de la phase adjacente ou du pylône. Le délestage de la glace peut également constituer un danger sur la vie des individus lorsque de grands morceaux de glace se détachent et tombent.

Les travaux énumérés par la littérature sur l'accrétion de la glace et son comportement sont nombreux; [33]–[35], tandis que les travaux qui traitent le phénomène de délestage demeurent peu abordés par littérature; [36], [37], vu la complexité des processus thermodynamiques et mécaniques associés à ce mécanisme.

Selon le phénomène physique impliqué, trois modes de délestage peuvent être distingués ; par fonte, par sublimation et par bris mécanique. La présence de l'un des modes est fortement reliée aux paramètres météorologiques tels que la température de l'air, la vitesse de vent, l'humidité, la nature de la glace, etc. [7]. Notons que le délestage ne résulte pas d'un seul mécanisme, mais plutôt de l'association de deux ou de tous les mécanismes à la fois [38].

2.4.1 Délestage par fonte

Le délestage par fonte se produit généralement à des températures supérieures à 0°C et il est également influencé par la vitesse du vent. La quantité de la glace délestée est relativement faible [8], puisque juste la partie externe du manchon de glace est exposée à l'air ambiant.

Cependant, dans le cas où plusieurs parties du câble sont libres de la glace, celles-ci se réchauffent rapidement, vu leurs conductivités thermiques, et transmettent le flux de chaleur aux morceaux adjacents du câble, ce qui affaiblit l'adhésion de la glace dans ces morceaux et amorce par la suite le détachement de la glace ; on parle ici d'un délestage mécanique amorcé par la fonte [7].

2.4.2 Délestage par sublimation

Physiquement, la sublimation correspond au passage direct d'un corps donné de l'état solide vers l'état gazeux [39]. L'humidité, la température et la vitesse du vent sont souvent les facteurs cruciaux qui influencent la quantité de la glace sublimée [40].

La sublimation de la glace atteint des valeurs importantes lorsque la vitesse du vent est grande et lorsque l'humidité est relativement faible. La sublimation se produit au niveau de l'interface glace-air et sera donc plus importante lorsque la surface du dépôt est plus grande [7]. Elle est également reliée à la densité du dépôt de glace. Pour une glace de faible densité, des taux de délestage importants sont observés.

2.4.3 Délestage par bris mécanique

Lorsque les limites de résistance de la glace sont dépassées, on assiste à une rupture mécanique du dépôt de la glace sur les composantes du réseau de transport électrique. Ce phénomène est noté délestage par bris mécanique. La rupture est due généralement aux différents types de sollicitations que subit le dépôt de glace ; sollicitations statiques (flexion, torsion, compression), ou dynamiques (fatigue, vibration, galop) [41].

Le taux de délestage par bris mécanique est également influencé par la structure de la glace atmosphérique ; la présence des défauts, des inclusions ou des pores affecte

significativement le comportement rhéologique de la glace et induit une instabilité structurale en affaiblissant sa résistance aux différentes formes de sollicitations. Notons que sur les sites naturels, des taux de délestage par bris mécanique de 100% ont été observés.

2.5 Rupture fragile de la glace

Le délestage de la glace par bris mécanique est à la fois le mode de délestage le moins documenté, et le plus critique. L'analyse de ce phénomène requiert une connaissance approfondie du comportement mécanique et rhéologique de la glace, ainsi que les différents paramètres influençant ce comportement tels que la température, le Taux de déformation, la porosité, la structure cristalline, etc.

En plus de la température, de la structure cristalline ou de la porosité, la glace présente également un comportement fortement dépendant du taux de déformation ; c'est-à-dire que la glace montre un comportement ductile pour des faibles taux de déformation, et un comportement fragile pour des taux de déformation plus grands, avec une zone de transition ductile-fragile.

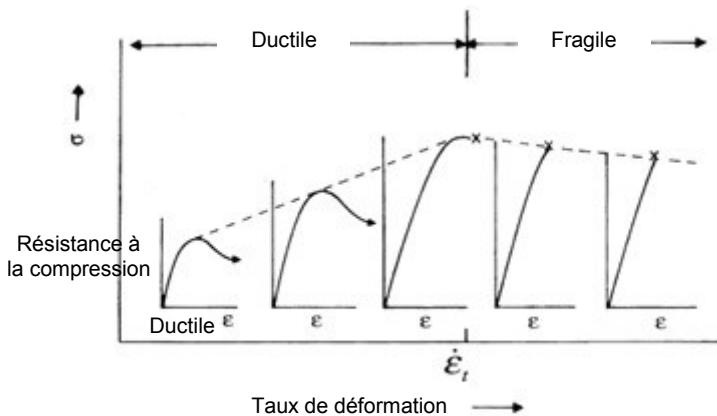


Figure 2-11 : Dépendance entre taux de déformation et transition ductile-fragile de la glace [42]

Le délestage par bris mécanique de la glace prend naissance lorsque le matériau atteint ses limites de résistance [7], [38]. Une description dudit phénomène passe par l'appréhension des mécanismes de rupture de la glace atmosphérique, par la définition de ses limites et des critères de rupture, ainsi que par la caractérisation structurale de la morphologie de fissuration sous contraintes.

Les courbes illustrées à la Figure 2-11 montrent l'évolution de la contrainte en fonction des déformations pour différents taux de déformation. Le comportement fragile de la glace atmosphérique est caractérisé par une déformation élastique suivie par une rupture soudaine (Figure 2-11). La déformation élastique est induite par la variation de la distance intermoléculaire sous les contraintes appliquées [10], les dislocations n'ont pas le temps de bouger le long du plan basal et il n'y aura donc pas de déformation plastique.

La rupture purement brutale de la glace est liée à la libération de l'énergie de déformation emmagasinée et concentrée dans une région. Cette énergie fait initier et propager la rupture dans tout le matériau [42]. Avant la rupture de la glace, deux stades peuvent être définis, soit l'amorçage des fissures et la propagation des fissures.

2.5.1 Amorçage des fissures

Pour qu'une fissure s'amorce dans la glace sans précurseur (inclusion, pore ou discontinuité géométrique), il faut que les contraintes soient localement concentrées à un niveau supérieur ou équivalent à la résistance du matériau [43].

Généralement, l'énergie élastique emmagasinée dans la glace au cours de la sollicitation statique se présente sous forme de deux composantes, une énergie liée à la déformation par cisaillement et une énergie liée à la déformation par contrainte normale (traction ou compression), et peut être exprimée comme suit [15]:

$$W_e = \int_0^V \int_0^\tau \tau d\gamma dV + \int_0^V \int_0^\sigma \sigma d\varepsilon dV \quad (2.39)$$

Où γ étant la déformation par cisaillement induite par la contrainte de cisaillement τ , ε étant la déformation en traction ou en compression induite par la contrainte normale σ , et V est le volume du monocristal de la glace.

Pour qu'une fissure se forme, il faut que l'énergie élastique emmagasinée dans la glace soit supérieure à l'énergie de création de surface, une telle condition se résume à:

$$W_\tau + W_\sigma \geq W_s \quad (2.40)$$

Les deux composantes W_τ et W_σ définissent l'énergie élastique de cisaillement et l'énergie élastique de traction (ou compression) respectivement, les deux composantes sont définies dans l'équation (2.39).

Dans la présente étude, nous nous intéressons davantage aux sollicitations par compression, contrairement aux sollicitations par tension, dans lesquelles les contraintes normales de traction contribuent significativement à l'ouverture d'une fissure et favorisent sa propagation une fois qu'elle est initiée. Sous contraintes de compression, la formation de la fissure ne libère aucune énergie liée aux contraintes normales. En effet, les contraintes compressives, normales au plan de la fissure, vont être transmises le long du spécimen, elles vont même induire une résistance supplémentaire à la propagation de la fissure sous forme des forces cohésives qui résistent à la formation des nouvelles surfaces de fissuration [15].

Pour cela, seule l'énergie emmagasinée par cisaillement aura une influence sur l'initiation d'une fissure sous compression, l'expression de l'équation (2.40) se résume à :

$$W_\tau \geq W_s \quad (2.41)$$

2.5.2 Propagation des fissures

La fissuration de la glace sous contraintes est un phénomène directement observable, d'une part parce que le matériau est transparent, et d'autre part à cause de la taille des grains relativement grande [43]. La compréhension d'un tel phénomène passe d'une part par l'observation des fissures, leur morphologie, leur distribution, leur orientation, etc. et d'autre part par l'évaluation des différentes variables expérimentales telles que la température, les conditions de chargement, la microstructure de la glace, etc.

Une fissure se propage lorsque certains mécanismes concentrent localement les contraintes au-delà du niveau de la cohésion intercristalline du matériau. Une panoplie de mécanismes microstructuraux peuvent être cités à cet égard tel que la concentration élastique des contraintes dans les défauts internes, la concentration des contraintes due à l'anisotropie élastique, l'empilement des dislocations, ou encore le glissement des joints des grains.

Cependant, il n'y a pas encore un consensus sur le mécanisme responsable de la fissuration dans la glace polycristalline, vu la sensibilité du phénomène de fissuration aux différents paramètres structuraux et environnementaux. Les trois derniers mécanismes seront abordés dans les sections suivantes.

2.5.2.1 L'anisotropie élastique

Les propriétés élastiques du monocristal de la glace sont anisotropes, i.e. lorsque deux cristaux adjacents subissent une contrainte uniforme, ils démontrent des déformations différentes. Chaque grain a une orientation privilégiée de raideur et de complaisance et une combinaison d'orientations selon la contrainte appliquée (Figure 2-12). Ceci induit une concentration des déformations dans la région jointe entre les deux grains, menant à une concentration locale des contraintes de cisaillement [43].

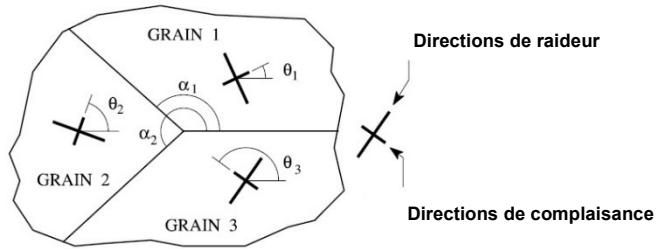


Figure 2-12 : Orientation des raideurs et des complaisances dans un microcristal de glace [43]

L'ampleur de la concentration de contrainte de cisaillement dépend essentiellement de trois paramètres : le degré d'anisotropie du monocristal vis-à-vis la contrainte nominale appliquée, la magnitude de la contrainte appliquée, ainsi que la taille du joint de grains partagé entre les deux grains (Figure 2-13).

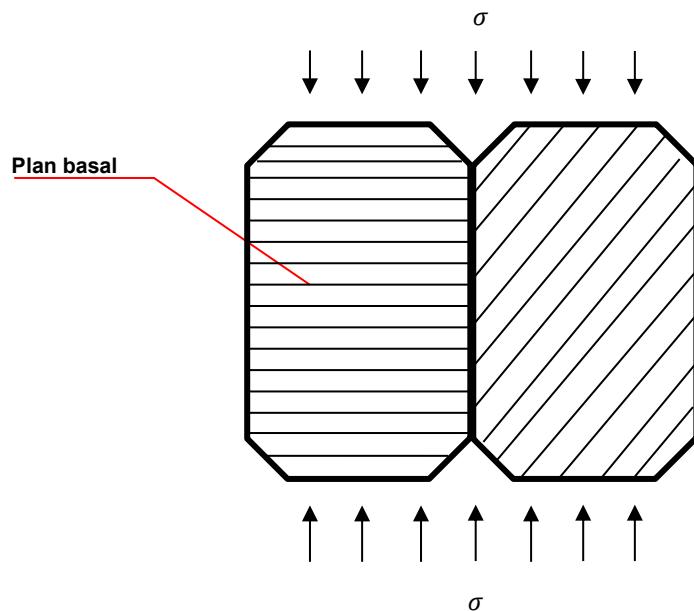


Figure 2-13 : Représentation de deux grains adjacents dans un polycristal (Figure reproduite à partir de [44])

Cole [44] s'est basé sur une formulation énergétique pour établir un critère de propagation de fissure intergranulaire en terme de la contrainte nominale appliquée, des propriétés élastiques et de la taille des grains.

Sous la contrainte appliquée, la densité d'énergie de déformation de chaque grain varie selon son orientation par rapport à l'axe de l'application de cette contrainte. Supposons que la différence en énergie de déformation des deux grains peut initier et orienter la propagation d'une fissure, cette différence doit être égale à l'énergie libre de création de surface.

Considérons les deux grains illustrés à la Figure 2-13. Selon la direction d'application de la contrainte, les deux grains ont deux modules élastiques E_1 et E_2 , deux déformations ε_1 et ε_2 et deux énergies de déformations U_{01} et U_{02} . L'énergie de déformation élastique est reliée à la déformation et au module élastique par :

$$U_{01} = \frac{1}{2} \varepsilon_1^2 E_1 \quad (2.42)$$

$$U_{02} = \frac{1}{2} \varepsilon_2^2 E_2 \quad (2.43)$$

La variation de la densité d'énergie de déformation, notée ΔU_v , peut être exprimée alors comme :

$$\Delta U_v = U_{01} - U_{02} = \frac{1}{2} [\varepsilon_1^2 E_1 - \varepsilon_2^2 E_2] \quad (2.44)$$

Puisque $\varepsilon = \sigma/E$, l'équation (2.44) peut être réarrangée sous la forme :

$$\Delta U_v = \frac{\sigma^2}{2} \left[\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right] \quad (2.45)$$

Notons que l'équation (2.45) représente la variation de l'énergie spécifique pour les deux grains. L'énergie de déformation ΔU est obtenue en intégrant sur le volume :

$$\Delta U = \int \Delta U_v d\nu \quad (2.46)$$

En utilisant une approximation sphérique du grain, en considérant que les grains ont un diamètre d , l'équation (2.46) se réduit à :

$$\Delta U = \frac{1}{12} \pi d^3 \sigma^2 \left[\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right] \quad (2.47)$$

On peut constater que la variation de l'énergie de déformation élastique dépend de la taille des grains, de la contrainte nominale appliquée, ainsi que des modules élastiques.

Lorsque la déformation atteint un seuil, la concentration des contraintes au niveau du joint entre les deux grains devient suffisante pour initier et propager une fissure, en supposant que l'énergie de déformation élastique contribue entièrement à la formation de nouvelles surfaces associées à la fissuration. Une condition de propagation peut être établie en supposant que l'énergie de déformation élastique égale à l'énergie de création de surface. L'énergie totale pour la formation d'une surface A est donnée par :

$$U_s = 2\gamma A \quad (2.48)$$

Où γ est l'énergie de surface. Si l'aire de la facette entre les deux grains est considéré circulaire de diamètre d_f , la surface formée peut être exprimée sous la forme :

$$A = \pi \frac{d_f^2}{4} \quad (2.49)$$

En substituant cette expression dans l'équation (2.48), on obtient :

$$U_s = \gamma \pi \frac{d_f^2}{2} \quad (2.50)$$

En égalant l'équation (2.47) avec l'équation (2.50), on obtient :

$$\Delta U = U_s \quad (2.51)$$

$$\frac{1}{12} \pi d^3 \sigma^2 \left[\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right] = \gamma \pi \frac{d_f^2}{2} \quad (2.52)$$

On peut en déduire l'expression suivante :

$$\sigma = \sqrt{\frac{6 \gamma d_f^2}{d^3 \left[\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right]}} \quad (2.53)$$

Supposons que le diamètre des grains d est linéairement relié au diamètre des facettes par le biais d'un facteur géométrique α :

$$d_f = \alpha d \quad (2.54)$$

L'équation (2.53) peut reprendre la forme suivante :

$$\sigma = \sqrt{\frac{6 \gamma \alpha^2}{d \left[\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right]}} \quad (2.55)$$

Cette équation définit la condition de propagation d'une fissure intergranulaire entre deux grains de diamètre d , ayant deux modules d'élasticité E_1 et E_2 dans la direction de la contrainte nominale σ .

2.5.2.2 L'empilement des dislocations

Le mécanisme d'amorçage des fissures dû aux contraintes concentrées aux extrémités des empilements des dislocations est un mécanisme bien documenté en métallurgie [45]. En ce qui concerne la glace, ce mécanisme a été adopté par Schulson [46] et Cole [47] pour expliquer la fissuration sous traction et compression respectivement.

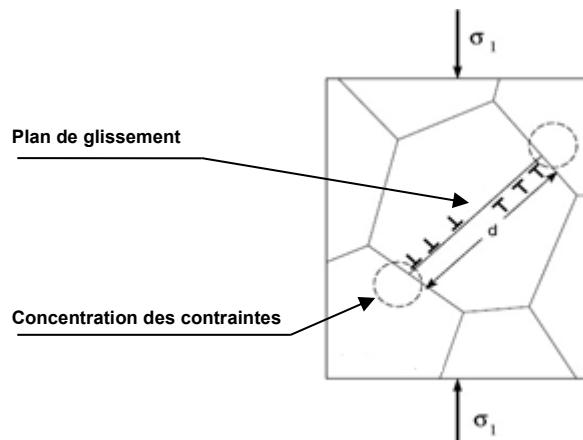


Figure 2-14 : Concentration des contraintes à la suite d'un empilement des dislocations [43]

La Figure 2-14 montre la concentration des contraintes à la suite d'un empilement des dislocations avec un plan de glissement privilégié. Les composantes du champ des contraintes au fond de la fissure de cisaillement ou l'empilement des dislocations sont donnés en termes de la contrainte effective de cisaillement agissant sur la fissure ou sur le plan de glissement, notée τ_e , de la taille de la fissure ou du plan de glissement d , et de la

distance du point de fissure r (Figure 2-15) [45]. Les contraintes normales et de cisaillement sur le plan de glissement sont déterminées par l'équation 2.56 et 2.57.

$$\sigma_{\theta\theta} = \tau_e \left[\frac{d}{2r} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{3}{2} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.56)$$

$$\sigma_{r\theta} = \tau_e \left[\frac{d}{2r} \right]^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - 3 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.57)$$

Où la coordonnée polaire θ est mesurée à partir du point de fissure, $\sigma_{\theta\theta}$ étant la contrainte normale dans la direction θ , $\sigma_{r\theta}$ étant la contrainte de cisaillement.

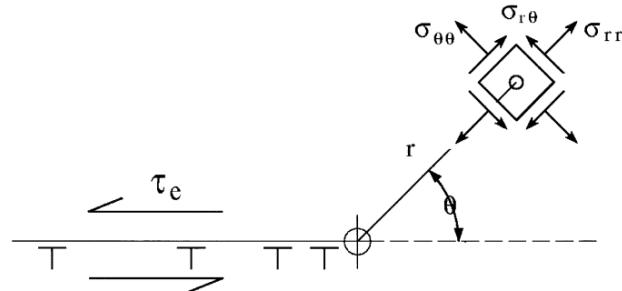


Figure 2-15 : Orientation du champ des contraintes à la pointe d'un empilement d'une dislocation (figure reproduite à partir de [43])

En se basant sur le modèle de Zener, Smith et Barnby [48] ont développé une expression générale pour la propagation des fissures en dislocations :

$$\tau_e = \left[\frac{\pi \gamma \mu}{2(1-\nu)d} \right]^{\frac{1}{2}} [F(\theta)]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.58)$$

Où

$$F(\theta) = \frac{1}{4}(5 + 2\cos\theta - 3\cos^2\theta) \quad (2.59)$$

γ étant l'énergie de surface, μ est le module de cisaillement, et ν est le coefficient de poisson.

2.5.2.3 Le glissement des joints des grains

Durant des tests de fluage par compression sur la glace colonnaire, Sinha [49] n'a pas trouvé d'empilement des dislocations autour des microfissures dans les grains inspectés. Il a conclu que la concentration des contraintes résultant de l'empilement des dislocations ne peut pas être le mécanisme responsable de l'amorçage des fissures. Sinha [49]–[51] a déduit que le glissement des joints des grains est à la source des concentrations des contraintes aux points triples, et que ces concentrations des contraintes sont responsables de la fissuration.

Le mécanisme de glissement des joints de grains a été proposé par Weertman [52]. La contrainte minimale requise pour produire une fissure à l'extrémité d'une interface glissante d'une longueur L vaut :

$$\tau_m = \left[\frac{12\gamma\mu}{\pi L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.60)$$

Où γ est l'énergie libre de surface et μ est le module de cisaillement.

Selon Sinha [53], γ doit être l'énergie de surface de rupture effective. L'énergie adéquate pour des fissures initiées dans les joints des grains d'une manière brutale est la

différence entre l'énergie libre de surface de vapeur, notée γ_{vs} , et le demi de l'énergie libre des joints de grains, notée γ_{gb} , ce qui donne :

$$\tau_m = \left[\frac{12(\gamma_{vs} - \frac{\gamma_{gb}}{2})\mu}{\pi L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.61)$$

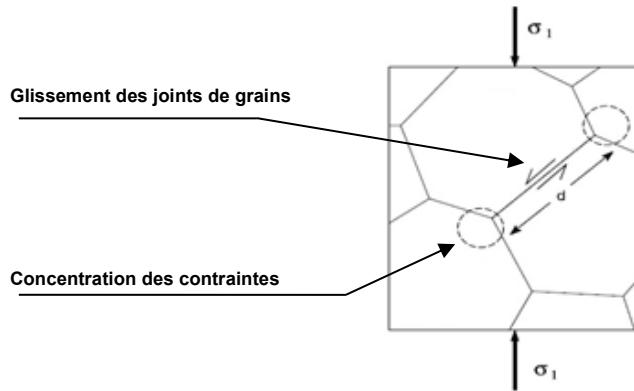


Figure 2-16 : Concentration des contraintes à la suite d'un glissement des joints des grains [43]

La Figure 2-16 schématise le mécanisme de glissement des joints des grains lors d'un essai de compression simple. Les régions encerclées montrent les points triples, qui sont des zones susceptibles à la concentration des contraintes due aux efforts de cisaillement.

2.6 Critères de rupture de la glace

Une fonction d'écoulement plastique (ou critère de rupture) est une équation qui définit une limite pour la contrainte subite par un matériau donné. Une fois que cette limite est atteinte, le matériau peut se rompre ou se déformer plastiquement, dépendamment de plusieurs paramètres physiques [54].

Pour plus de clarté, il convient de souligner que, dans la théorie classique de la plasticité [55], la surface d'écoulement n'est pas une surface de rupture. Une surface d'écoulement est le critère du début de la déformation permanente (écoulement plastique), tandis qu'une surface de rupture définit le critère pour les contraintes maximales qui peuvent être endurées par le matériau (résistance du matériau) avant sa rupture.

Pour les matériaux fragiles où les déformations plastiques sont négligeables (comme dans le cas du comportement de la glace à des vitesses de déformation élevées), la surface d'écoulement coïncide avec la surface de rupture. À des taux de déformation élevés, dans la glace, une fois l'écoulement atteint, la glace se rompt (par fissuration, cisaillement, scission, écaillage, etc.).

Une classification des critères de rupture présentés dans la littérature scientifique peut se baser sur plusieurs aspects. Les critères de rupture peuvent être regroupés selon le type de la rupture et sa morphologie ; ductile ou fragile, selon les bases théoriques ; critère empirique ou physique, ou selon la nature des chargements associés à la rupture ; chargements uniaxiaux ou triaxiaux. Dans la présente étude, on propose plutôt une classification qui se base sur la nature des chargements et le comportement typique investigué par les critères de rupture proposés.

2.6.1 Critères de rupture en chargement uniaxial

La glace est généralement considérée comme matériau viscoplastique [33], [56], [57]. Si un critère de plasticité est considéré, ce dernier doit être une approximation des critères de Tresca ou de Von Mises, c'est-à-dire contrainte de cisaillement maximale ou deuxième invariant des contraintes constant [58]. Les critères de rupture proposés pour la glace depuis plusieurs décennies s'inspirent des critères de rupture des matériaux fragiles. On peut

énumérer le critère de la contrainte normale maximale, le critère de la déformation maximale ou le critère d'énergie de déformation [42], [59], [60].

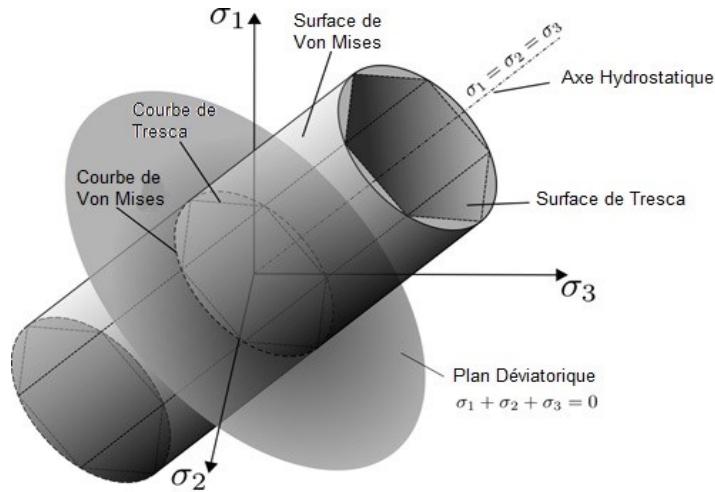


Figure 2-17 : Critères de Von Mises et de Tresca dans l'espace des contraintes principales [61]

Cependant, pour des problèmes qui font intervenir des chargements rapides et une rupture fragile, la glace suit une loi de comportement quasi élastique (Figure 2-18), et le critère associé à sa rupture est présumé être le critère de la contrainte principale maximale [58].

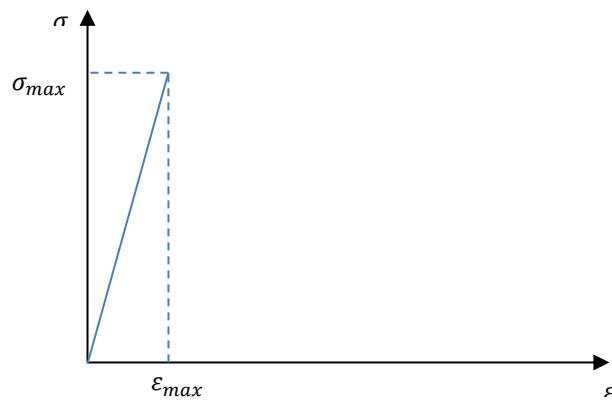


Figure 2-18 : Courbe typique de contrainte-déformation d'une rupture fragile de la glace et illustration du critère de la contrainte maximale

D'autres présentations de la rupture sous chargement uniaxial de la glace peuvent se baser sur une approche énergétique. Cole [60] a proposé un critère de rupture qui se base sur la quantification de l'énergie liée à la création de nouvelles surfaces. Son critère de rupture prend la forme suivante :

$$\sigma = \sqrt{\frac{3\pi E\gamma}{4(1-\nu^2)d} + f(N_b)} \quad (2.62)$$

Où E est le module de Young, γ est l'énergie de surface, d est la taille des grains, le terme $f(N_b)$ est un terme correctif qui prend en considération les pertes d'énergie dues au seuil d'amorçage des fissures.

2.6.2 Critères de rupture en chargement triaxial

Dans le domaine de la rupture fragile de la glace, la présence d'une pression de confinement affecte considérablement le mode de rupture. La présence d'une surface de cisaillement orientée de $\pm 45^\circ$ par rapport à la surface de chargement axial est souvent observée. Une approche moins primitive est de considérer un critère qui prédit une augmentation de la résistance au cisaillement avec l'augmentation de la contrainte volumique. Le critère le plus évident est celui de Mohr-Coulomb [42], [62], qui stipule que la contrainte de cisaillement, $|\tau|$, agissant tout au long du plan du futur défaut est résistée par la cohésion du matériau, notée C , et par la friction, qui est définie comme étant le produit de la friction interne μ avec la contrainte normale à travers le plan σ .

$$|\tau| = C + \mu\sigma \quad (2.63)$$

D'autres critères de rupture peuvent être retrouvés dans la littérature relative à la mécanique des roches [63]. Le critère de Hoek-Brown [64], [65] peut être cité dans ce cadre. Ce critère exprime l'évolution de la contrainte axiale σ_1 en fonction de la contrainte de confinement σ_3 comme :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{1/2} \quad (2.64)$$

Où σ_c est la résistance à la compression uniaxiale, m est un paramètre qui dépend de la structure microscopique et des types de matériaux, et s est une constante matérielle à déterminer qui dépend de la présence de fissuration dans les matériaux.

Derradji-Aouat [66] a modifié la théorie classique de la plasticité de Hill [55] pour inclure les effets du temps et de la température sur le flux de plastique d'endommagement dans la rupture de la glace colonnaire. Cependant, son critère s'applique seulement pour des déformations ductiles.

Mellor [58] a suggéré que les caractéristiques suivantes doivent être prises en considération dans la présentation d'un critère de rupture spécifique à la glace :

- Pour des déformations ductiles à faibles taux de déformation, la résistance à la compression est égale à la résistance à la traction, et la contrainte volumique a peu d'effet sur la résistance au cisaillement ;
- Avec l'augmentation des taux de déformation et le développement des fissures internes, le rapport résistance à la compression à la résistance à la traction augmente. Les valeurs absolues des résistances à la compression et à la traction augmentent également ;

- À des taux de déformation légèrement élevés, la résistance au cisaillement croît avec l'augmentation du confinement jusqu'à une certaine limite, puis commence à décroître en augmentant davantage la pression ;
- Sous des chargements quasi-statiques et à des températures au-dessus de -20°C, la pression hydrostatique seule peut détruire la résistance au cisaillement en raison du changement de phase de l'eau.

Le dernier point est unique à la glace, bien que la plupart des critères de rupture prédisent une résistance au cisaillement infinie sous pression extrême. La glace perd sa résistance au cisaillement sous des pressions de confinement proches du point de changement de phase [58].

Cette spécificité a été prise en considération par quelques auteurs lors de la présentation des critères de rupture appropriés à la glace. Fish [67], après avoir analysé les données de Jones [68], a remarqué que la résistance à la compression triaxiale atteint un maximum pour certains niveaux de pression de confinement associés à la pression de fusion de la glace. Il a proposé par la suite une surface de rupture parabolique en développant la série de Von Mises jusqu'à l'ordre deux. Selon Fish [67], la résistance de la glace dans un état de contraintes multiaxiales peut être exprimée avec la forme parabolique suivante :

$$\tau = c + b\sigma_m - \frac{b}{2\sigma_{max}}\sigma_m^2 \quad (2.65)$$

Où c est la résistance au cisaillement pure associée avec la cohésion de la glace dans le plan octaédrique, $b = \tan\phi$ et ϕ est l'angle de frottement interne dans le plan octaédrique, σ_{max} est la pression de fusion de la glace, σ_m est la contrainte moyenne exprimée comme :

$$\sigma_m = \frac{I_1}{3} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.66)$$

Nadreau et Michel [69] ont développé la série généralisée de Von Mises jusqu'à l'ordre trois pour présenter leur critère de rupture pour la glace. La surface de rupture associée à leur critère de rupture prend la forme suivante :

$$f(\sigma) = \sigma_1(1 - \sin\phi) - \sigma_3(1 + \sin\phi) - 2c(\cos\phi) \quad (2.67)$$

Où ϕ et c sont l'angle de frottement et la cohésion de la glace respectivement.

En ce qui concerne les critères d'écoulement plastique de la glace atmosphérique, seul le travail d'Eskandarian [9] peut être cité à cet égard. Eskandarian a proposé une enveloppe de rupture pour la glace atmosphérique en se basant sur le modèle de Fish [70]. Il a modifié les formulations des constantes matérielles pour améliorer ledit modèle. L'effet de la porosité a été pris en considération par le modèle Cap.

2.7 Conclusions

La glace est considérée comme un matériau polycristallin élastoviscoplastique et présente un caractère anisotrope, fragile et fortement dépendant de la température et du taux de déformation. Toutes ces caractéristiques ont été prises en considération dans les différentes lois de comportement proposées dans la littérature.

Cependant, les travaux abordant la glace atmosphérique restent comptés au bout des doigts [9], [10], et rares encore sont les modèles de comportement qui présentent le comportement de ce type de glace. D'autre part, les investigations sur le comportement fragile de la glace restent limitées, vu la complexité des mécanismes de la rupture et leur

sensibilité vis-à-vis des différents paramètres. Des travaux de recherche multiples ont traité l'effet de fissuration et les mécanismes d'endommagement de la glace [71], [72]. Or, ces travaux s'intéressent plus à l'évolution de la fissuration qu'à la quantification de son degré de sévérité par la proposition des critères de ruptures adéquats. Schulson [42] a proposé que la rupture brutale de la glace peut être présentée par un critère de cisaillement de Coulomb, ou un critère d'écaillage de Hertz. Cependant, les deux critères ne décrivent pas les modes de rupture de la glace.

L'analyse des efforts et des contraintes sur un morceau de glace atmosphérique accumulé sur un conducteur nous a permis de révéler plusieurs points saillants. On peut citer :

- Le délestage de la glace atmosphérique est un phénomène complexe qui fait intervenir plusieurs champs interdisciplinaires ;
- Le délestage par bris mécanique est fortement influencé par les contraintes environnementales ;
- Un critère de rupture empirique est nécessaire pour modéliser la rupture fragile uniaxiale en compression et en traction de la glace atmosphérique ;
- Le critère de rupture doit prendre en considération l'effet de la température, du taux de déformation et de la porosité ;
- Des essais de compression triaxiale sur la glace atmosphérique doivent être réalisés dans le but de proposer un critère de rupture adéquat qui considère les effets des contraintes de confinement sur la rupture de la glace atmosphérique.

Chapitre 3

MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

3.1 Introduction

Le présent chapitre sera consacré au développement de la méthodologie expérimentale adoptée durant l'étude. Cette méthodologie a comme but d'évaluer le comportement mécanique de la glace atmosphérique ainsi que d'élucider l'influence de plusieurs paramètres sur son comportement structural. Dans ce chapitre, les méthodes développées pour préparer la glace seront présentées, suivies d'une étude de sa microstructure, ainsi qu'une évaluation de sa porosité.

La préparation des échantillons pour les tests mécaniques fera l'objet des sections qui suivent. Le chapitre abordera également une présentation exhaustive sur la réalisation des tests de compression uniaxiale et triaxiale. Le but est de bien situer le lecteur dans le cadre de la présente étude et de donner une présentation générale des différentes méthodes et pratiques utilisées.

3.2 Préparation de la glace

La glace a été préparée selon deux différentes méthodologies : une glace atmosphérique poreuse et granulaire a été préparée dans la soufflerie de la CIGELE, afin de reproduire le processus d'accumulation de la glace atmosphérique dans la nature, et une glace d'eau douce désaérée et granulaire, dans le but de caractériser la porosité et

l'anisotropie de la glace. Les détails sur les étapes de préparation de chaque type de glace ainsi que la différence entre les deux microstructures feront l'objet des sections qui suivent.

3.2.1 Préparation de la glace atmosphérique poreuse

La glace atmosphérique a été préparée dans des conditions spécifiques créées dans la soufflerie de la CIGELE (La Chaire industrielle sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques). Cette technique a été utilisée pour simuler le processus naturel de givrage atmosphérique.

L'eau chaude a été injectée dans une veine d'air froid à travers des buses situées au bord de fuite d'une barre de pulvérisation. Trois lignes d'alimentation indépendantes fournissent de l'air et de l'eau aux buses. Le flux et la vitesse à l'intérieur du tunnel sont contrôlés via un ordinateur de contrôle, la vitesse de l'air est ajustée à 20 m/s afin d'avoir un MVD (mean volume droplet diameter) de 40 μ m et une teneur en eau liquide (LWC) de 2,5 g/m³.

La glace atmosphérique a été accumulée sur un cylindre rotatif d'aluminium (de 78 mm de diamètre et de 590 mm de longueur). Le cylindre a été soigneusement nettoyé avec de l'eau chaude et du savon avant chaque série d'expérience, puis placé dans le milieu de la section d'essai de la soufflerie et fixé par chaque bord contre un rotor tournant à 1rpm.

La rotation du cylindre permet d'avoir une distribution uniforme de la glace, comme illustré à la Figure 3-1 [73]. La distance entre les buses de pulvérisation et le cylindre est suffisamment grande pour que les gouttelettes d'eau atteignent l'équilibre thermodynamique et cinématique.

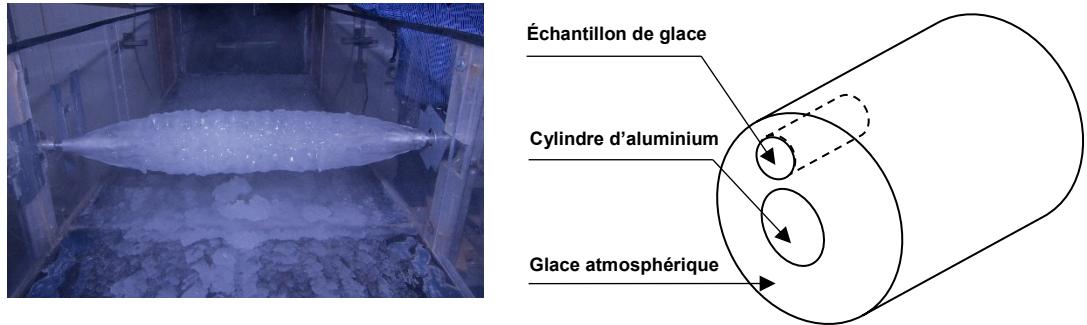


Figure 3-1 : Accumulation de la glace atmosphérique sur le cylindre et coupe de l'échantillon

Selon les conditions d'accumulation telles que la vitesse de l'air et la teneur en eau liquide, le temps nécessaire pour avoir une épaisseur suffisante de glace sur le cylindre varie entre 2 et 4 heures, allant parfois jusqu'à 8 heures. La Figure 3-1 montre également l'orientation de l'échantillon en fonction de la glace accumulée. Une fois l'épaisseur de 60 mm obtenue, des blocs prismatiques ont été coupés en utilisant une lame d'aluminium chaude afin d'éviter toute contrainte mécanique, puis usinés dans une forme cylindrique avec un diamètre de 40 mm et une longueur de 100 mm.

3.2.2 Préparation de la glace désaérée

D'abord, l'eau est mise dans une enceinte de 25% de volume, l'enceinte est montée avec une pompe à vide, l'ensemble est déclenché pendant une période minimale de 7 jours. Ensuite, la dépression dans l'enceinte a comme effet de séparer les bulles d'air de l'eau, en permettant par la suite d'obtenir de l'eau désaérée.

La glace S2 se distingue par l'orientation de ces grains qui ont une forme colonnaire, ainsi que l'orientation de ces colonnes vis-à-vis l'axe cristallin c de la maille hexagonale des monocristaux de la glace, comme discuté dans la section 2.1.

La présence d'un gradient de température unidirectionnel favorise la croissance unidirectionnelle des grains en prenant une forme colonnaire. Ainsi, l'absence des courants dynamiques dans l'eau pendant la congélation promouvoit une dispersion aléatoire de l'axe c et donne par la suite naissance à un matériau isotrope transverse baptisé glace S2.

Pour arriver à obtenir ce type de glace, l'eau désaérée est mise dans une boîte en bois. La boîte est faite en bois dans le but de favoriser le gradient unidirectionnel de la température. Avec la présence de cinq faces isolantes, elle est dotée également d'une couche de styrémousse pour éliminer les contraintes internes induites par la glace durant la congélation (Figure 3-2), sinon ces contraintes induisent des microfissures dans l'absence des parois compressibles.



Figure 3-2 : Glace pendant la congélation dans une boîte en bois et Styromousse

Lors du processus de congélation, l'ajout des agrégats de glace permet la perturbation de la formation des grains colonnaires et donne une structure plutôt granulaire, avec une porosité très négligeable. Le dernier type de glace a été utilisé pour révéler l'effet de la porosité sur le comportement mécanique de la glace atmosphérique.

3.3 Étude de la microstructure cristalline de la glace

La glace est un matériau biréfringent caractérisé par deux indices de réfraction. En conséquence, pour une lumière monochromatique incidente donnée, il y a deux différentes directions de propagation de la lumière dans la glace (les cristaux ayant la même orientation vont apparaître sous la même couleur). La méthode classique pour étudier la structure cristalline de la glace est l'utilisation d'un microscope optique avec un filtre polarisé [10], [74].

Dans le cadre de la présente étude, un microscope à rayon X, de type SkyScan, disponible à la CIGELE, a été utilisé pour caractériser la microstructure de la glace avec une grande précision (Figure 3-3). 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.

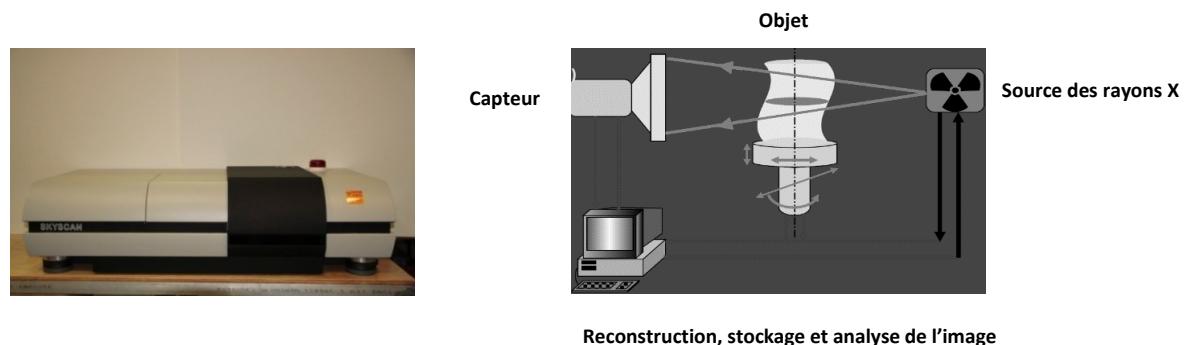


Figure 3-3 : Micro-tomographe rayon X (SkyScan)

Le système donne également une quantification rigoureuse de la porosité et de la taille des grains de la glace en question, en se basant sur le principe de l'imagerie binaire.

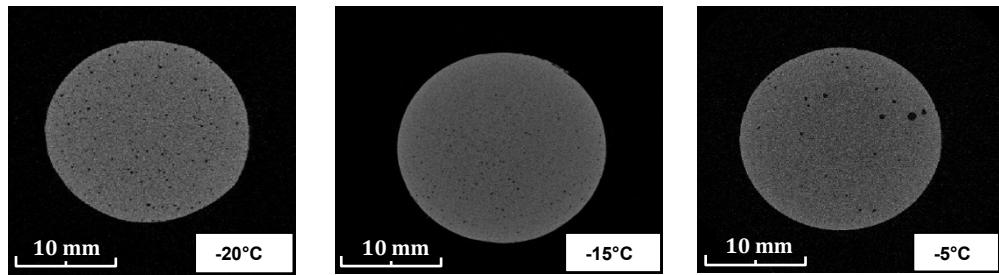


Figure 3-4 : Image binaire d'une coupe transversale de la glace poreuse à différentes températures

La Figure 3-4 montre des images binaires des coupes transversales de la glace atmosphérique poreuse, prise à différentes températures (-20°C, -15°C et -5°C). Les trous noirs représentent les bulles d'air ou les pores. La taille des pores ainsi que leur densité est proportionnelle à la température d'accumulation [73]. Une comparaison entre la glace atmosphérique poreuse et la glace désaérée est illustrée à la Figure 3-5.

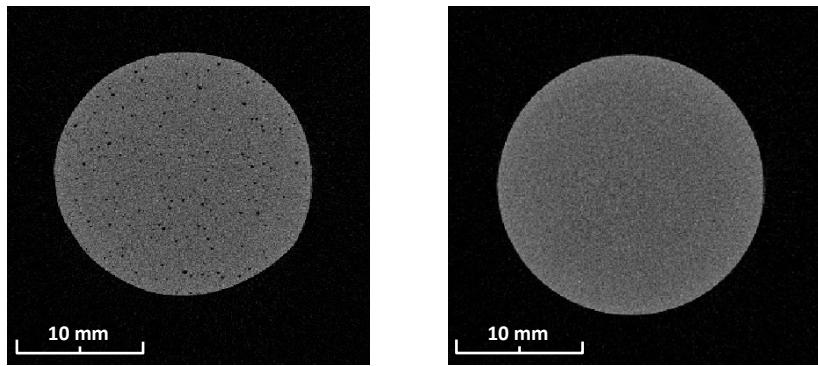


Figure 3-5 : Images binaires d'une coupe transversale de la glace à -20°C: À gauche, glace atmosphérique poreuse, à droite, glace désaérée

La Figure 3-5 montre une comparaison entre une coupe transversale de la glace granulaire poreuse (à gauche) et une coupe transversale de la glace désaérée (à droite) à -20°C. La grande présence des pores est observée dans la glace poreuse, tandis qu'une absence totale de ces pores est remarquée dans la texture de la glace désaérée. Ceci est

directement dû à la différence entre les méthodes utilisées pour la préparation des deux types de glace.

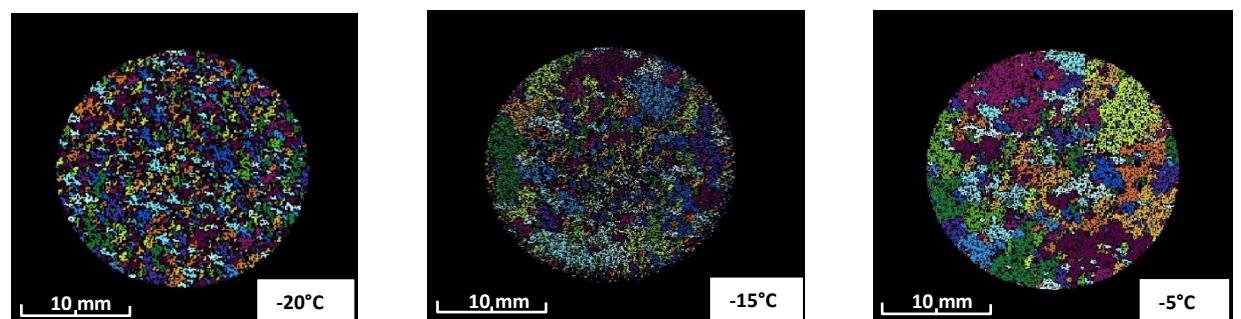


Figure 3-6 : Orientation cristalline d'une coupe transversale de la glace poreuse à différentes températures

La Figure 3-6 illustre l'orientation cristalline des grains dans des coupes transversales de la glace atmosphérique poreuse en fonction de la température. La taille des grains diminue avec la décroissance de la température d'accumulation de la glace.

Le diamètre moyen des grains est d'environ 0.137 mm pour les échantillons de glace accumulées à -20°C, 1.249 mm à -15°C, et de 4.511 mm à -5°C. À une température relativement élevée de -5°C, les gouttelettes d'eau super-froide se congèlent lentement après être arrivées à la surface, chaque gouttelette d'eau a le temps suffisant pour s'agglomérer avec les gouttelettes adjacentes et former par la suite une goutte plus grande donnant naissance à un grain de plus grande taille. À une température plus basse, -20°C, les gouttelettes d'eau se congèlent immédiatement après leur arrivée sur la surface, ce qui donne naissance à des grains de taille plus petite.

3.4 Préparation des échantillons

Les dimensions de l'échantillon choisi sont adaptées afin d'éviter toute influence de la taille des grains sur le comportement à la compression de la glace [75]. Les échantillons de la glace ont été préparés à trois températures différentes : -20°C, -15°C et -5°C, tout en suivant les directives prescrites par les normes ASTM ; D 4543-01 [76], D 2664-95 [77], D 2938-95 [78]. Ce qui impose une dimension des éprouvettes de 100 mm de longueur et de 40 mm de diamètre.



Figure 3-7 : Découpage du grand bloc de glace et préparation des échantillons cylindriques

Des blocs prismatiques d'une longueur de 150 mm et d'un côté de 55 mm ont été extraits à partir du grand bloc de la glace déjà préparé à l'aide d'une scie à ruban. Pour obtenir des échantillons parfaitement cylindriques, une tour à fer a été utilisée pour machiner des cylindres en glace ayant les dimensions déjà présentées à la Figure 3-7.

Également, un outil de tournage spécifique a été fabriqué pour machiner la glace afin de ne pas induire des précontraintes ou des déformations résiduelles lors de la fabrication des éprouvettes cylindriques.

3.5 Réalisation des essais de compression uniaxiale

Les éprouvettes cylindriques de la glace sont fixées contre les plaques de la machine de compression MTS 810. Un capteur de position incorporé dans la traverse mobile de la machine permet la tracée instantanée de déplacement et l'obtention des déformations par la suite, la Figure 3-8 montre les différentes composantes de la machine de test à boucle fermée MTS 810.



Figure 3-8 : Différentes composantes de la machine de test à boucle fermée MTS 810

La section d'essai de la machine MTS est située à l'intérieur d'une chambre froide isolée. La température de la chambre est ajustée par l'intermédiaire d'un contrôleur ayant une certitude de 1°C.

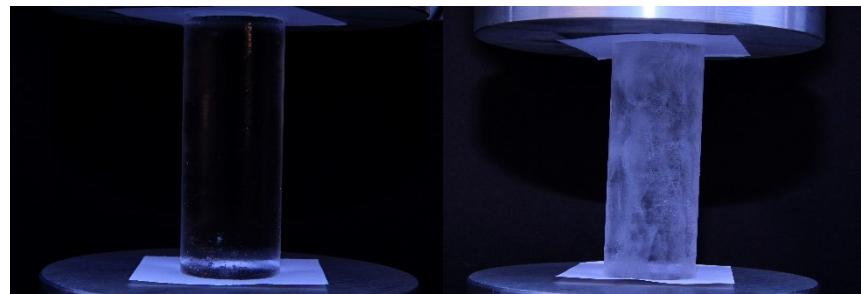


Figure 3-9: Éprouvettes cylindriques en glace montées entre les plaques de la machine de compression à - 5°C (à gauche glace désaérée, à droite glace atmosphérique)

La Figure 3-9 illustre deux échantillons de la glace formée à - 5°C. À gauche, la figure présente un échantillon de la glace désaérée, l'échantillon est parfaitement transparent et ne contient aucune bulle d'air, tandis que l'échantillon de la glace atmosphérique poreuse présenté à droite de la figure montre une opacité avec une grande présence des bulles d'air.



Figure 3-10 : Rupture d'une éprouvette cylindrique après essai de compression uniaxiale (taux de déformation de 10^{-2} s^{-1})

La Figure 3-10 présente une éprouvette de la glace désaérée après un test de compression à haut taux de déformation. La rupture s'est manifestée par un flambage et le plan de glissement est incliné à 45° avec le plan d'application de la contrainte. Il s'agit du plan de cisaillement maximal.

3.6 Réalisation des essais de compression triaxiale

Lorsqu'on considère un état de contrainte tridimensionnel dans un matériau, il est plus commode de distinguer trois directions mutuellement perpendiculaires dans lesquelles les contraintes de cisaillement disparaissent. Ces trois directions définissent également les contraintes normales principales σ_1 , σ_2 et σ_3 . La convention adoptée dans la présente étude est que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, et que les contraintes de compression sont considérées positives.

Les contraintes appliquées sur un échantillon de glace lors d'un essai de compression triaxial sont exposées à la Figure 3-11. La contrainte de confinement σ_{conf} est appliquée en imposant une pression au fluide entourant l'échantillon; on l'appelle également contrainte principale mineure σ_3 . La contrainte déviatorique ($\Delta\sigma$) est obtenue en appliquant un déplacement axial à l'échantillon. Cette contrainte agit avec la contrainte de confinement dans la direction axiale. Ces deux contraintes combinées sont égales à la contrainte axiale σ_a ou la contrainte principale majeure σ_1 .

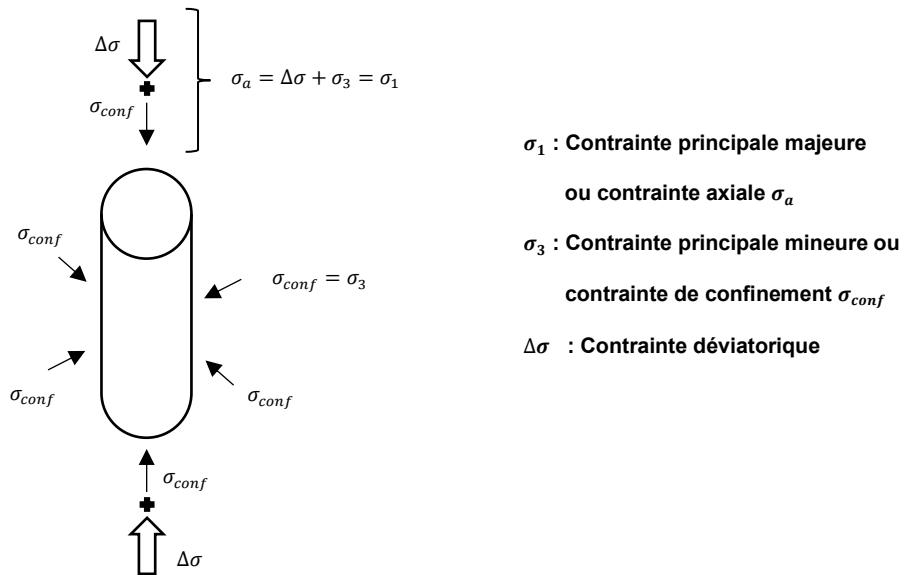
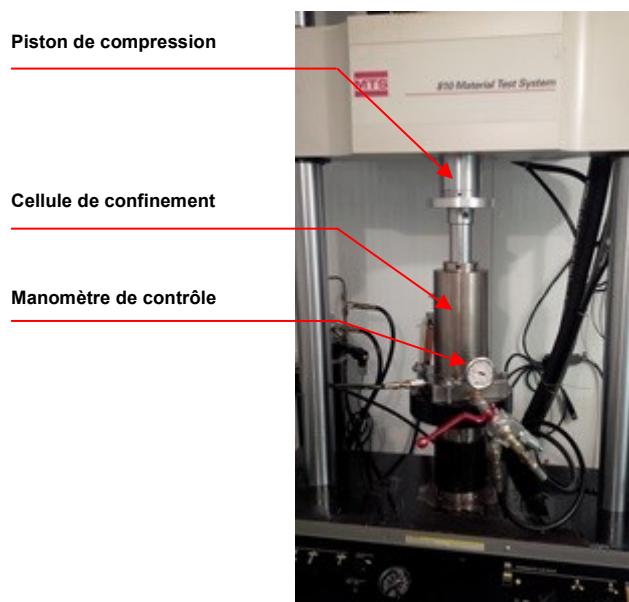


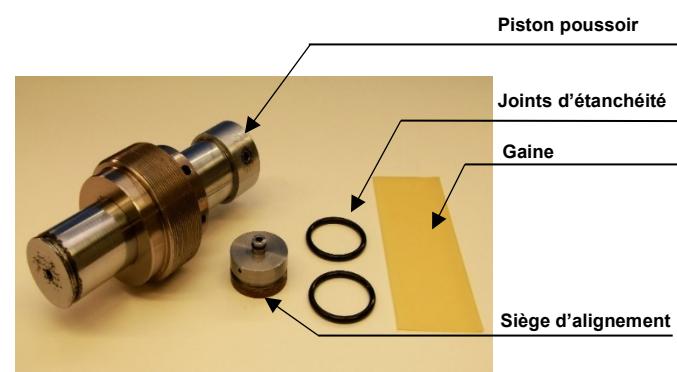
Figure 3-11 : État de contrainte triaxiale

Les essais de compression triaxiale ont été réalisés sous des pressions de confinement graduelles de $\frac{\sigma_c}{4}$, $\frac{\sigma_c}{2}$ et σ_c , où σ_c est la résistance à la compression uniaxiale.

Sous des températures contrôlées de -5, -10 et -15°C. La Figure 3-12-(a) illustre la cellule de confinement installée sur la section d'essai de la machine de compression MTS 810. La cellule est alimentée en pression hydraulique par une unité d'alimentation en pression ayant une capacité maximale de 20 Mpa.



(a) Installation de la chambre de confinement



(b) Composantes d'alignement d'un test

triaxial

Figure 3-12 : Composantes du système de test triaxial

L'échantillon est enrobé par une gaine de latex, puis fixé contre le piston pousoir et le siège d'alignement par l'intermédiaire des deux joints d'étanchéité. La Figure 3-12-(b) montre ces différentes composantes. Le but de cette manipulation est d'assurer l'alignement de l'échantillon sans introduire des contraintes résiduelles.

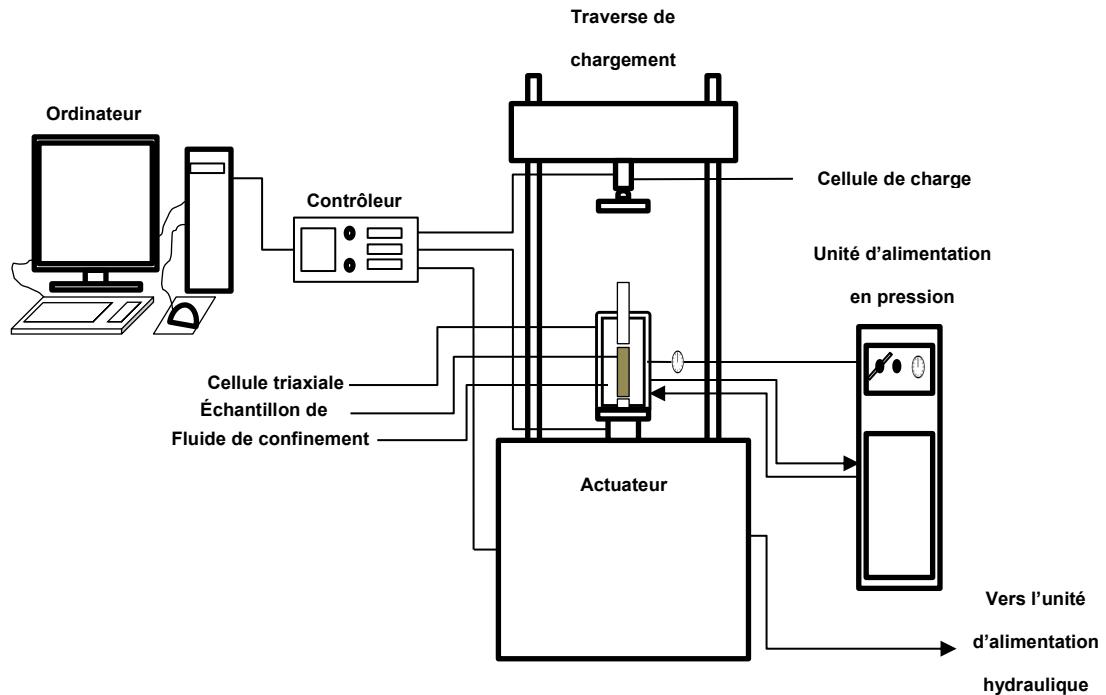


Figure 3-13 : Montage expérimental pour test triaxial

L'échantillon est introduit dans la chambre sans présence de fluide compressif. Une fois que l'ensemble « échantillon avec piston » est aligné et bien scellé, la pression hydraulique est augmentée graduellement jusqu'à atteindre la valeur désirée. Un temps de relaxation est nécessaire pour établir un équilibre en pression avant de commencer le test triaxial.

Chapitre 4

UN CRITÈRE EMPIRIQUE UNIAXIAL POUR LA GLACE ATMOSPHÉRIQUE

4.1 Introduction

La glace atmosphérique sur les lignes de transport subit des charges mécaniques de différentes natures. On peut citer les efforts de compression, traction, flexion, torsion, fluage, fatigue, etc. Ces chargements sont souvent influencés par plusieurs paramètres environnementaux et structuraux.

Le délestage par bris mécanique de la glace atmosphérique prend naissance lorsque le matériau atteint ses limites de résistance. Présenter un critère de rupture associé à ce type de glace sera d'une très grande aide pour les problèmes d'ingénierie liés au givrage atmosphérique des structures.

Notons que le comportement mécanique de la glace atmosphérique est affecté par de nombreux paramètres environnementaux et structuraux tels que la porosité, le Taux de déformation et la température. Par conséquent, une bonne présentation d'un critère de rupture devrait tenir en compte l'influence de ces paramètres.

4.2 Analyse des données expérimentales en compression uniaxiale

La détermination de la transition ductile-fragile est d'une grande importance dans l'étude du comportement mécanique de la glace. Batto et Schulson [79] ont étudié expérimentalement cette transition pour la glace colonnaire sous compression et ont trouvé qu'elle se situe entre un taux de déformation de 10^{-4}s^{-1} et 3.10^{-4}s^{-1} .

Sinha [80], d'autre part, a montré que cette transition est fortement influencée par le taux de déformation et a proposé le concept du module de rupture (module sécant au point de la rupture) pour examiner cette transition.

Le délestage de la glace atmosphérique par bris mécanique se produit au-delà de la transition ductile-fragile. En outre, au cours d'un événement de délestage naturel, le taux de déformation est d'environ 10^{-2} s^{-1} [81], d'où la nécessité de caractériser le comportement de la glace atmosphérique dans cette gamme de taux de déformation.

Le Tableau 4-1 montre les résultats des tests de compression uniaxiale de la glace préparés à -5, -15 et -20°C. Les rangs D désignent la glace désaérée (la glace de l'eau douce) tandis que les rangs P représentent la glace poreuse (atmosphérique). Dans les mêmes conditions expérimentales (la vitesse de déformation, la température et la porosité), chaque test a été répété cinq fois afin de produire des valeurs statistiquement fiables et exploitables, la valeur moyenne ainsi que l'écart type sous chaque condition expérimentale sont présentés également dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1 : Résultats de compression uniaxiale de la glace préparée et testée à la même température

Rang	Taux de déformation (s ⁻¹)	T = -20 °C				T = -15 °C				T = -5 °C			
		Résistance à la compression (MPa)		Résistance à la compression (MPa)		Résistance à la compression (MPa)		Résistance à la compression (MPa)		Résistance à la compression (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
		Av.	S.D.	Av.	S.D.	Av.	S.D.	Av.	S.D.	Av.	S.D.	Av.	S.D.
D1	1E-1	2.8	0.13	0.005	0.001	2.54	0.8	0.005	0.001	1.64	0.9	0.001	0.0006
D2	1E-2	4.31	0.11	0.005	0.001	3.46	0.3	0.005	0.001	2.48	0.21	0.001	0.0006
D3	1E-3	6.77	0.02	0.005	0.001	5.6	0.43	0.005	0.001	4.44	0.8	0.001	0.0006
D4	1E-4	14.16	1.2	0.005	0.001	6.61	0.97	0.005	0.001	3.5	0.83	0.001	0.0006
P1	1E-1	1.95	0.04	2.253	0.089	4.55	0.5	1.062	0.082	1.64	0.7	0.288	0.079
P2	1E-2	5.8	0.01	2.253	0.089	7.63	0.3	1.062	0.082	3.25	0.3	0.288	0.079
P3	1E-3	5.91	0.2	2.253	0.089	7.98	0.57	1.062	0.082	4.55	0.7	0.288	0.079
P4	1E-4	5.45	0.3	2.253	0.089	4.84	0.25	1.062	0.082	3.05	0.89	0.288	0.079

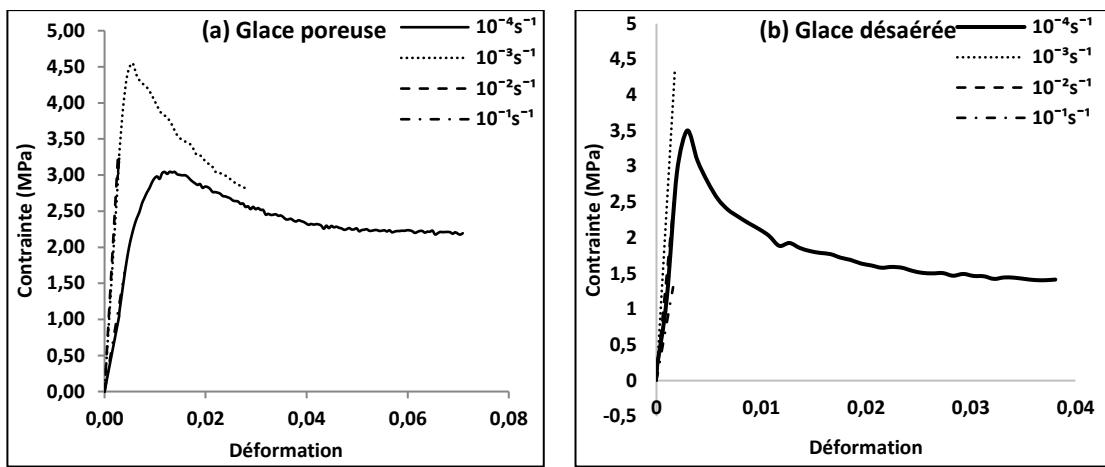


Figure 4-1 : Courbe Contraintes-Déformations à -5°C pour un échantillon typique : (a) de la glace poreuse, (b) de la glace désaérée

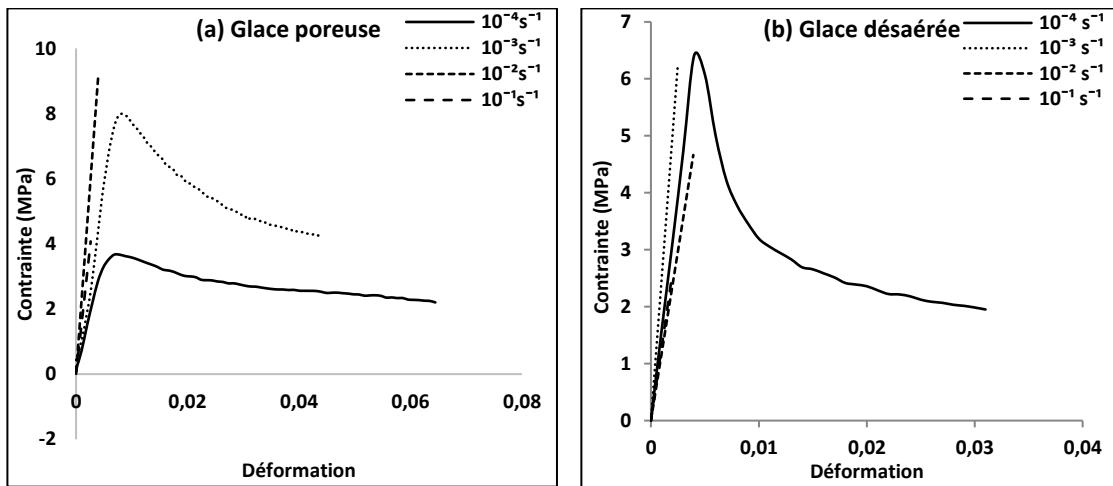


Figure 4-2 : Courbe Contraintes-Déformations à -15°C pour un échantillon typique : (a) de la glace poreuse, (b) de la glace désaérée

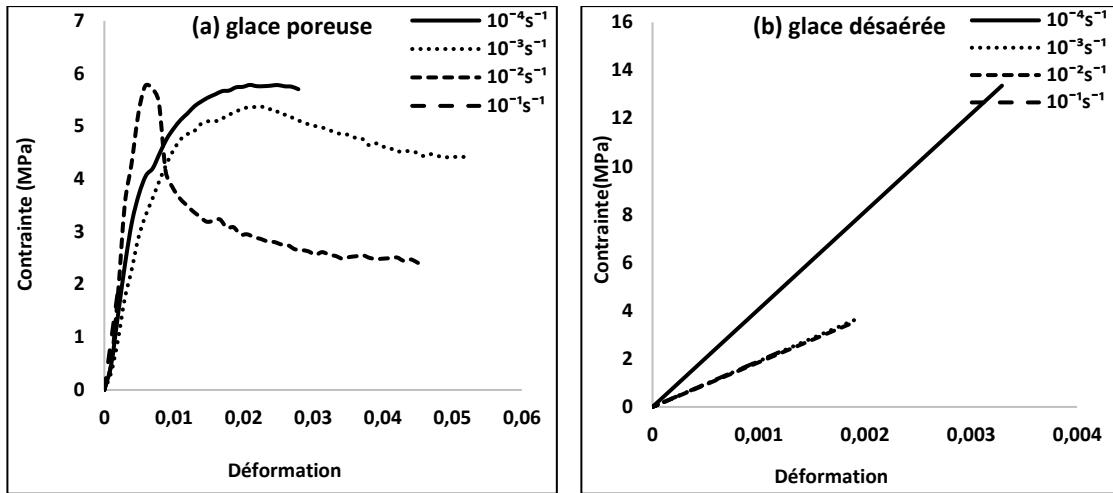


Figure 4-3 : Courbe Contraintes-Déformations à -20°C pour un échantillon typique : (a) de la glace poreuse, (b) de la glace désaérée

Les allures des courbes contraintes-déformations illustrées aux Figure 4-1, Figure 4-2 et Figure 4-3 montrent l'influence de plusieurs paramètres tels que la température, le taux de déformation ainsi que la porosité sur le comportement mécanique de la glace. Les sections qui suivent présentent une analyse plus détaillée des différentes observations expérimentales ainsi qu'une interprétation des différents mécanismes et phénomènes physiques y associés.

4.2.1 Effet du Taux de déformation

Les essais de compression uniaxiale ont été effectués sous des taux de déformation allant de 10^{-7}s^{-1} jusqu'à 10^{-1}s^{-1} . Ce grand intervalle a été choisi afin de caractériser la transition ductile-fragile. Une fois cette transition déterminée, le programme d'essais s'est restreint au régime fragile afin de caractériser la rupture fragile de la glace atmosphérique.

Par conséquent, le programme d'essai s'est limité à des taux de déformation compris entre 10^{-4}s^{-1} et 10^{-1}s^{-1} . Le Tableau 4-2 résume l'ensemble des résultats de tests de compression uniaxial pour la glace colonnaire et granulaire préparée et testée dans la même température.

Tableau 4-2 : Résultats de compression uniaxiale de la glace colonnaire et granulaire préparée et testée à la même température

Taux de déformation (s^{-1})	Résistance à la compression		
	Glace S2 chargée dans la direction axiale	Glace S2 chargée dans la direction transversale	Glace granulaire
1.00E-07	0.95	X	0.54
1.00E-06	2.79	1.62	1.18
1.00E-05	3.27	2.84	2.88
1.00E-04	10.49	5.76	6.61
1.00E-03	5.03	7.74	5.6
1.00E-02	5.14	4.87	3.46
1.00E-01	X	X	2.54

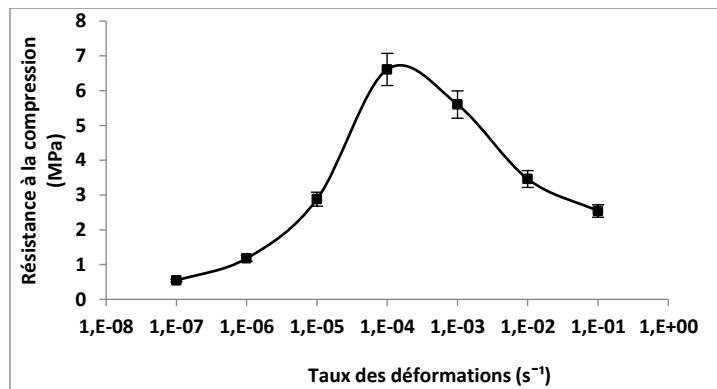


Figure 4-4 : L'évolution de la résistance à la compression de la glace granulaire désaérée à -15°C

D'après la Figure 4-4, on remarque que la résistance à la compression de la glace évolue d'une façon significative avec la croissance du taux de déformation en passant par un maximum. Cette valeur maximale caractérise la zone de transition ductile-fragile de la glace et elle est généralement située entre 10^{-4} et 10^{-3} s^{-1} . Ceci rejoint les résultats obtenus par Arakawa [82] et Schulson [83]. La dispersion des résultats est plus grande aux alentours de cette zone, comme montré par les barres d'erreur illustrées à la Figure 4-5. Selon Batto et Schulson [79], la transition prend naissance lorsque les fissures, amorcées durant le chargement, commencent à se propager.

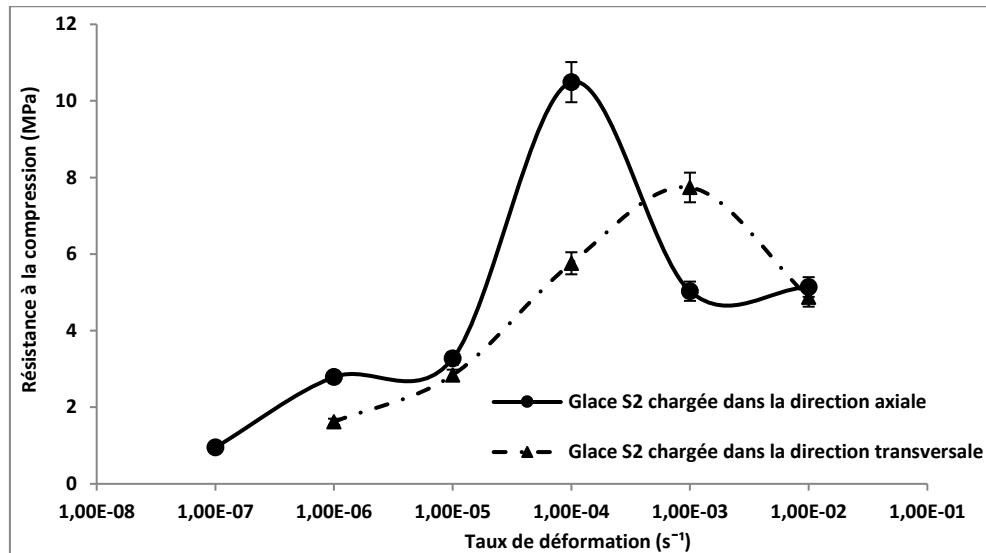


Figure 4-5 : L'évolution de la résistance à la compression de la glace colonnaire S2 désaérée à -15°C

Selon Schulson [42], les tendances montrées aux Figure 4-4 et Figure 4-5 peuvent être caractérisées par un facteur de sensibilité à la vitesse de déformation, m , qui dépend principalement de l'état des contraintes et de la texture de la glace, et par l'énergie d'activation Q . À des hauts taux de déformation, les dislocations et les mouvements des joints des grains ont moins de temps pour déclencher le processus de plasticité. De ce fait, le vide engendré par ces mouvements constitue des sites préférentiels d'amorçage des fissures

et le matériau se rompt juste après une petite période d'élasticité, induisant ainsi un amorçage et une propagation instantanée des fissures.

Toutefois, le délestage par bris mécanique de la glace atmosphérique survient au-delà de la transition ductile-fragile [84]. Par ailleurs, lors d'un délestage naturel, le Taux de déformation est aux alentours de 10^{-2} s^{-1} , d'où la nécessité de caractériser le comportement de la glace atmosphérique au voisinage de ce point. La suite de l'étude s'intéresse uniquement aux essais basés sur des taux de déformation compris entre 10^{-4} s^{-1} et 10^{-1} s^{-1} , pour différentes températures et porosités.

La Figure 4-6 montre une comparaison entre les résultats obtenus lors de la présente étude avec ceux obtenus par d'autres auteurs. On remarque une très bonne concordance entre la présente étude et les résultats de la littérature. Cependant, il faut noter la grande dispersion de nos résultats dans la zone de transition ductile-fragile. La grande valeur de la résistance à la compression, observée pour un taux de déformation de 10^{-4} s^{-1} , est obtenue pour des échantillons de la glace colonnaire S2 sollicités parallèlement à l'axe des colonnes. Ceci montre clairement le caractère anisotrope de ce type de glace.

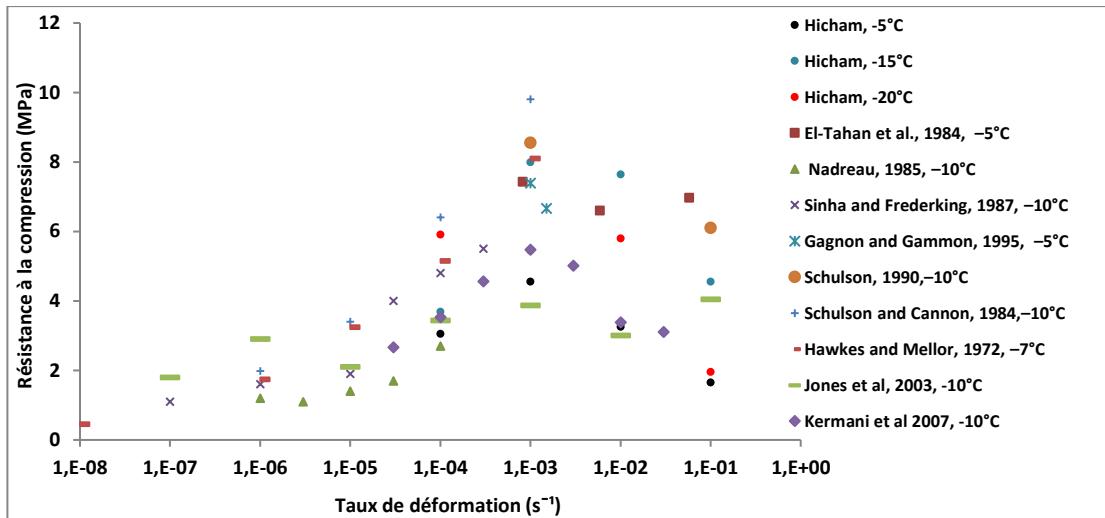


Figure 4-6 : Comparaison des résultats obtenus de la présente étude avec d'autres résultats de la littérature

Malgré la dispersion des différents résultats illustrés à la Figure 4-6, la tendance croissante de la résistance à la compression en fonction du Taux de déformation jusqu' à l'intervalle 10^{-4} s^{-1} à 10^{-3} s^{-1} est évidente dans toutes les données expérimentales.

Le tracé de la résistance à la compression en fonction de la température pour plusieurs taux de déformation, comme illustré aux Figure 4-7 et Figure 4-8, montre la grande sensibilité de la glace à la vitesse des déformations. Il faut noter également que la glace désaérée présente une résistance maximale à un taux de déformation de 10^{-4} s^{-1} et que sa résistance décroît au-delà de cette valeur, tandis que la glace poreuse présente une résistance maximale aux alentours de 10^{-3} s^{-1} , ceci étant fortement dû à la présence des pores et cavités dans ce type de glace.

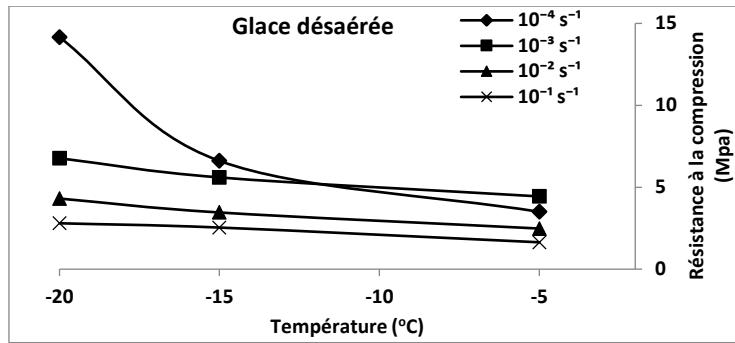


Figure 4-7 : Évolution de la résistance à la compression de la glace désaérée en fonction de la température pour différents taux de déformation

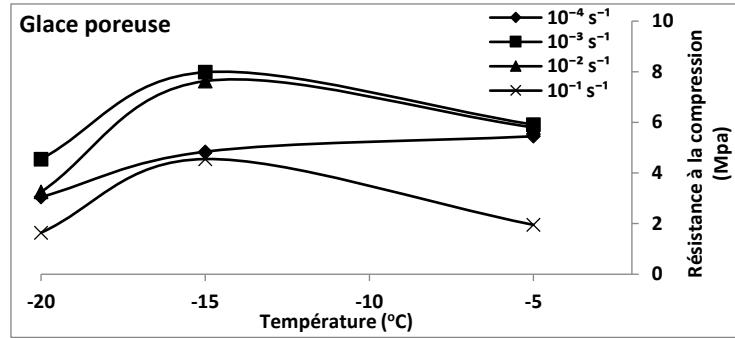


Figure 4-8 : Évolution de la résistance à la compression de la glace poreuse en fonction de la température pour différents taux de déformation

4.2.2 Effet de la température

Comme évoqué dans les sections précédentes, trois températures ont été prises en compte dans les séries d'essais, soit -5°C , -15°C et -20°C . Le choix d'une température de -15°C est basé sur les conditions de délestage de glace dans le Nord du Québec (température hivernale de $-16,1^{\circ}\text{C}$ en moyenne [85]), le choix d'une température de -5°C est justifiée par la caractérisation de la glace atmosphérique à une température proche de son

point de fusion (0°C), tandis que la température de -20°C est choisi comme état extrême à des fins comparatives.

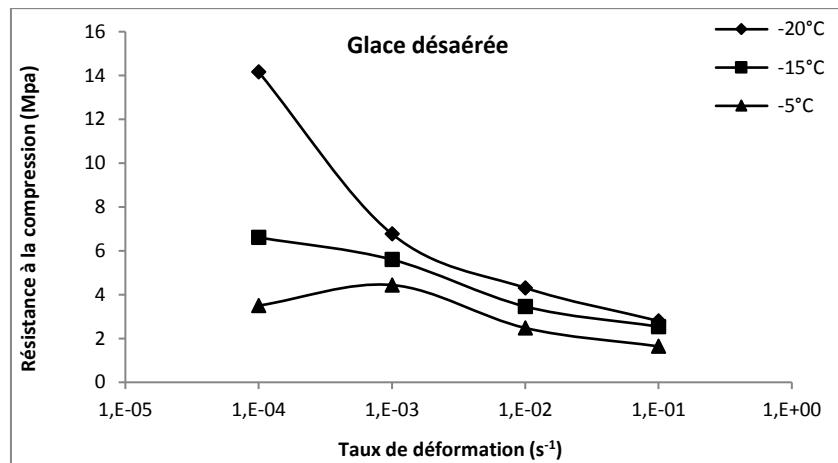


Figure 4-9 : Résistance à la compression de la glace désaérée à différentes températures

Comme le montre la Figure 4-9, pour un taux de déformation donné, la résistance à la compression de glace désaérée augmente lorsque la température diminue. Ceci rejoint les observations expérimentales de nombreux auteurs [82], [83], et est compatible avec les conclusions de Haynes [86], qui a noté que la résistance à la compression de la glace granulaire préparée à -23°C et testée dans une large gamme de température de -0.1°C à -54°C a augmenté d'environ un ordre de grandeur pour une vitesse de déformation de $1.5 \ 10^{-1}\text{s}^{-1}$.

La Figure 4-9 montre également que la résistance à la compression de la glace désaérée est moins affectée par la température pour des vitesses de déformation élevées.

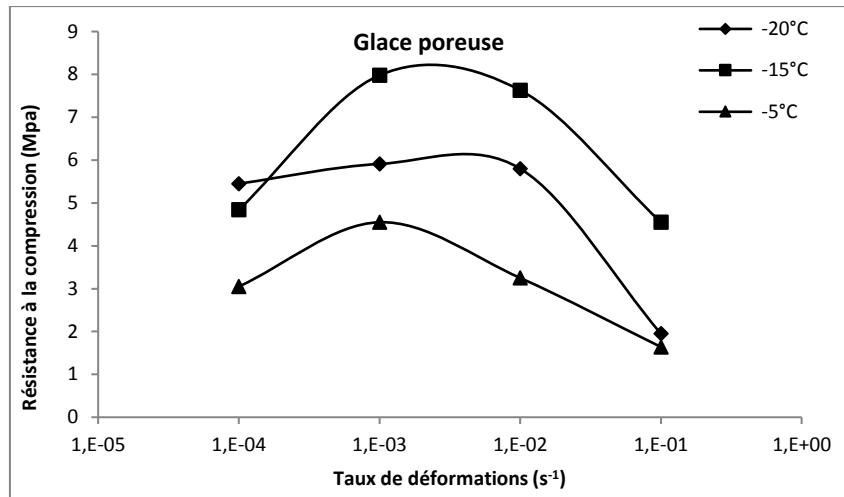


Figure 4-10 Résistance à la compression de la glace poreuse à différentes températures

D'après la Figure 4-10, la résistance à la compression de la glace poreuse augmente lorsque la température diminue, ceci jusqu'à -15°C, puis elle diminue avec la diminution de la température à -20°C. Cette conclusion contredit les observations sur la glace de l'eau douce désaérée illustrées à la Figure 4-9 et discutées dans le paragraphe qui précède. Ceci est fortement relié à la présence des pores et des cavités dans la glace atmosphérique. Comme illustré déjà à la Figure 3-4, la densité et la distribution des pores sont fortement dépendantes de la température. La présence des pores, jusqu'à une certaine limite, augmente la résistance à la compression du matériau. Ceci revient au fait que l'effort appliqué agit d'abord pour la fermeture de ces pores, ce qui aide à l'augmentation apparente de l'élasticité du matériau même à des taux de déformation relativement élevés. À des températures plus basse, par exemple à -20°C, la densité des pores ainsi que leur distribution dans le matériau est plus importante. L'effort appliqué rend facile l'interliaison de ces pores et cavités, ce qui les rend des sites préférentiels de concentration de contraintes et des microfissures. L'évolution de la porosité en fonction de la température pour les deux types de glace est montrée à la Figure 4-11. Pour les deux types de glace, la porosité décroît avec

l'augmentation de la température ; pour la glace atmosphérique poreuse, cette décroissance est significative, tandis qu'elle prend une allure assez lente pour la glace désaérée.

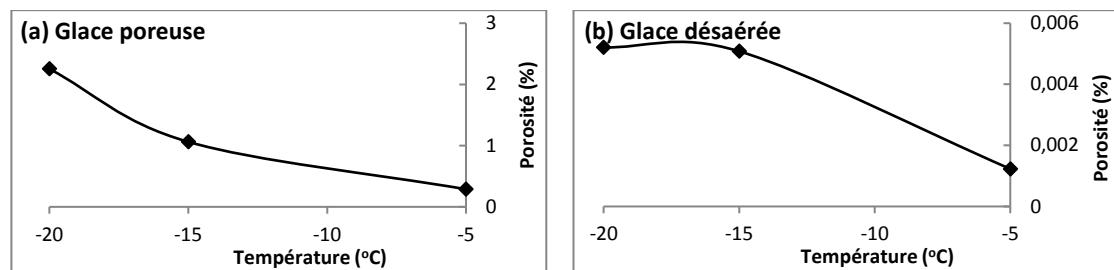


Figure 4-11 : Évolution de la porosité en fonction de la température pour : (a) la glace poreuse, (b) la glace désaérée

4.2.3 Effet de la porosité

La présence des pores et des cavités dans la glace présente des sites préférentiels pour les concentrations des contraintes et par la suite l'initiation des fissurations. L'influence de la porosité sur le comportement de la glace est révélée et les résultats seront discutés dans les paragraphes qui suivent.

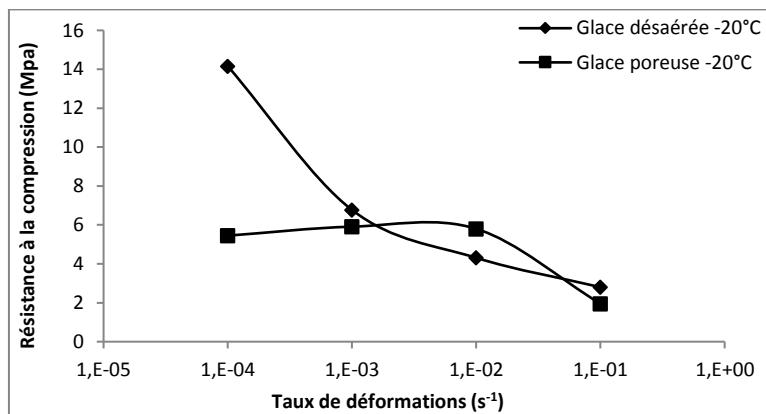


Figure 4-12 : Résistance à la compression de la glace poreuse et de la glace désaérée à -20°C

Les figures 4-12 et 4-13, montre que la glace poreuse présente un comportement partiellement ductile, même à des taux de déformation relativement élevés. Ceci est dû à la présence des pores. La contrainte appliquée agit premièrement pour fermer ces pores. Cette fermeture relaxe la concentration des contraintes et conduit à une plasticité locale autour des pores, ce qui donne plus de ductilité au matériau. Le comportement fragile dans la glace est généralement observé lorsqu'une fissure s'amorce, puis se propage, tandis que le comportement ductile est davantage lié à la nucléation et à l'amorçage des fissures.

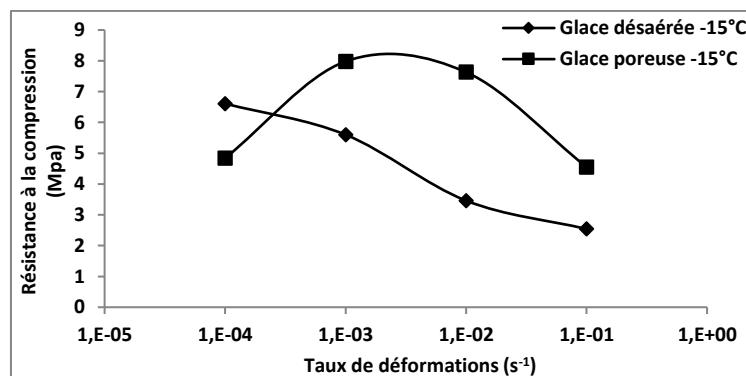


Figure 4-13 : Résistance à la compression à -15°C de la glace poreuse et de la glace désaérée

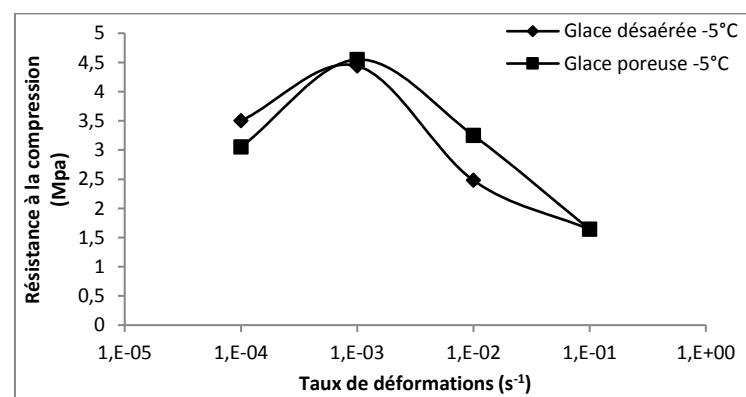


Figure 4-14 : Résistance à la compression à -5°C de la glace poreuse et de la glace désaérée

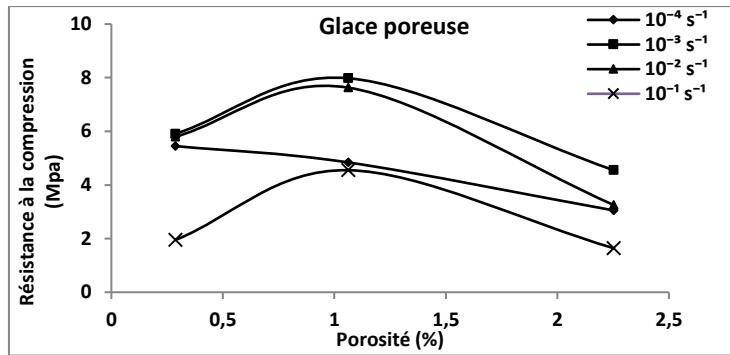


Figure 4-15 : Évolution de la résistance à la compression en fonction de la porosité pour la glace poreuse

Pour la glace atmosphérique poreuse, la résistance à la compression croît avec la croissance de la porosité jusqu'à atteindre une valeur critique, au-delà de laquelle une décroissance est observée. En dessous d'une porosité de 1%, l'effort appliqué agit d'abord pour fermer les pores, la plasticité locale écrouit le matériau en lui permettant de résister davantage à l'effort appliqué. Au-delà de cette valeur, la densité des pores est plus importante, les sites interstitiels (ou l'inter-vide) existant entre les pores adjacents sont plus petits et les concentrations des contraintes locales sur les pointes des pores promeuvent la propagation instantanée des fissures amorcées et réduisent, par ailleurs, la résistance du matériau.

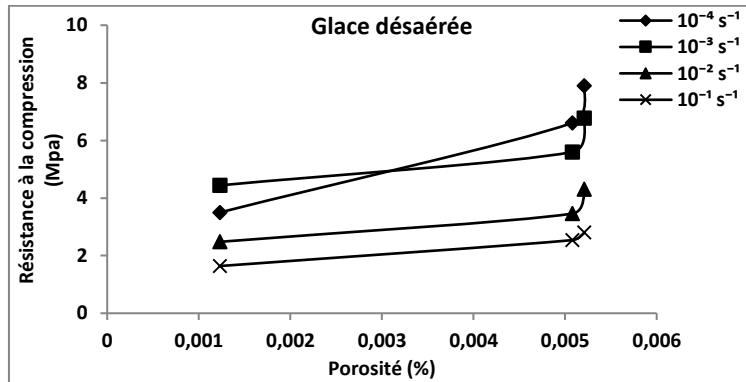


Figure 4-16 : Évolution de la résistance à la compression en fonction de la porosité pour la glace désaérée

La résistance à la compression de la glace désaérée est moins affectée par la présence des pores, vu la faible valeur de la porosité (Figure 4-16). Cependant, il faut noter la légère augmentation de la résistance pour des valeurs de porosité supérieures à 0.005%, ceci étant dû aux effets énumérés dans les paragraphes précédents.

4.2.4 Effet de l'anisotropie

Une série d'expériences a été menée sur des éprouvettes en glace granulaire et colonnaire de type S2, selon les conditions expérimentales déjà spécifiées. La courbe contrainte-déformation a été tracée pour chaque condition et la valeur de la résistance a été notée et illustrée à la Figure 4-17.

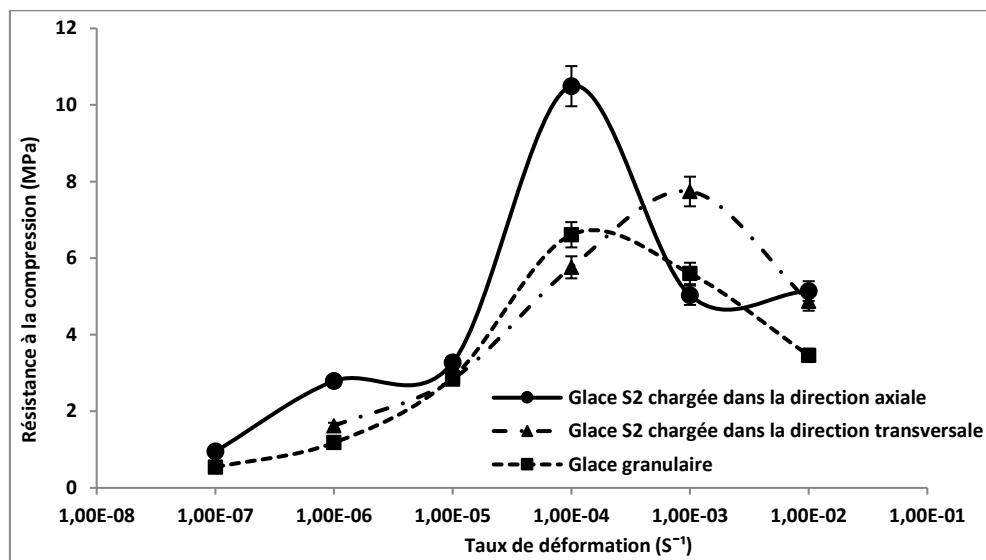


Figure 4-17 : Évolution de la résistance à la compression des deux types de la glace en fonction du taux de déformation à -15°C

La résistance à la compression de la glace augmente avec la croissance du taux de déformation, jusqu'à atteindre une valeur maximale après laquelle une décroissance de cette limite est observée. Cette zone caractérise la transition ductile-fragile de la glace et elle est

généralement située entre 10^{-4} et 10^{-3} s⁻¹ pour les deux types de glace investigués. Les valeurs les plus importantes de la résistance à la compression sont observées pour la glace S2 sollicitée selon la direction parallèle des grains.

Les mécanismes responsables des fissurations déjà évoqués dans le cas de la glace granulaire peuvent être considérés ; à des hauts taux de déformation, les dislocations et les mouvements des joints des grains ont moins de temps pour déclencher le processus de plasticité. De ce fait, le vide engendré par ces mouvements constitue des sites préférentiels d'amorçage des fissures et le matériau se rompt juste après une petite période d'élasticité, donnant comme conclusion que les fissures amorcées se propagent instantanément.

On note également les valeurs importantes de la résistance à la compression enregistrées pour la glace S2 sollicitée dans la direction parallèle à l'axe des colonnes. Dans le cas de ce type de glace, les joints des grains sont orientés parallèlement avec l'axe du chargement. Ceci induit la réduction, voire l'élimination des effets de cisaillement, qui permet par la suite à la résistance à la compression uniaxiale d'augmenter davantage.

4.3 Développement du critère de rupture empirique en compression uniaxiale

4.3.1 Proposition d'un critère de rupture basé sur les résultats expérimentaux

Comme déjà énoncé dans les sections précédentes, la rupture fragile de la glace est influencée par plusieurs paramètres environnementaux et structuraux tels que la température, la porosité et le taux de déformation qui reste le paramètre le plus influent. Ceci donne un point de départ pour une présentation analytique d'un critère empirique qui quantifie la résistance de la glace atmosphérique et désaérée dans la zone de la rupture fragile.

L'allure de la courbe représentant la résistance à la compression en fonction du taux de déformation (courbe illustrée à la Figure 4-4) peut être approchée par une courbe exponentielle représentée par une équation de la forme :

$$\sigma_c = \frac{c}{b * \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(\dot{\varepsilon}) - a}{b}\right)^2\right) \quad (4.1)$$

La proposition d'une loi de cette forme se base sur les observations phénoménologiques établies à travers les résultats expérimentaux. Les constantes a , b et c sont des constantes empiriques à identifier. Ces constantes doivent refléter l'état physique du matériau à travers la dépendance de certaines variables telles que la température et la porosité. Les trois constantes a , b , et c dans l'expression (4.1) sont substituées par n , $f(\eta)$ et α , où n est un facteur sensible aux taux de déformation, $f(\eta)$ est une fonction linéaire de la porosité η , et α est une constante qui dépend de la température et de l'énergie d'activation. L'équation (4.1) peut être réécrite sous la forme :

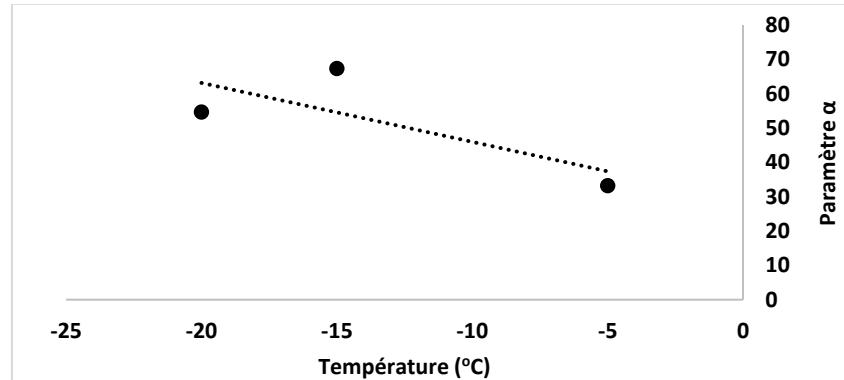
$$\sigma_c = \frac{\alpha}{f(\eta) * \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(\dot{\varepsilon}) - n}{f(\eta)}\right)^2\right) \quad (4.2)$$

La détermination de ces constantes a été réalisée en utilisant un algorithme d'optimisation non linéaire. Le Tableau 4-3 présente les valeurs de ces constantes en fonction de la température :

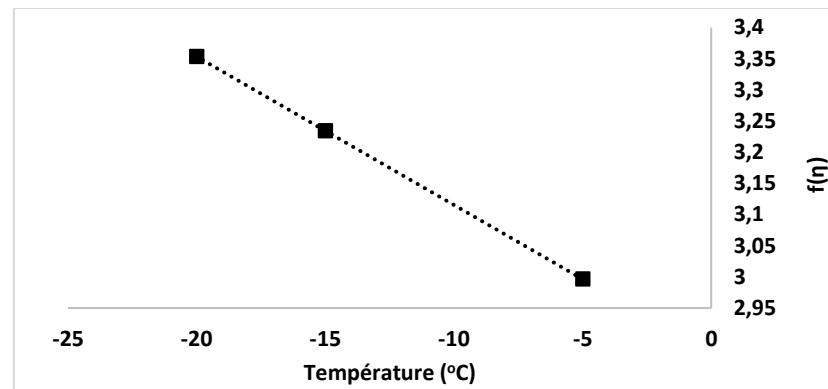
Tableau 4-3 : Différents paramètres présentés dans le critère de rupture en fonction de la température

PARAMÈTRES	n	$f(\eta)$	α
TEMPÉRATURE			
-5°C	-6.71	2.99	33.14
-15°C	-5.87	3.22	67.31
-20°C	-6.98	3.35	54.65

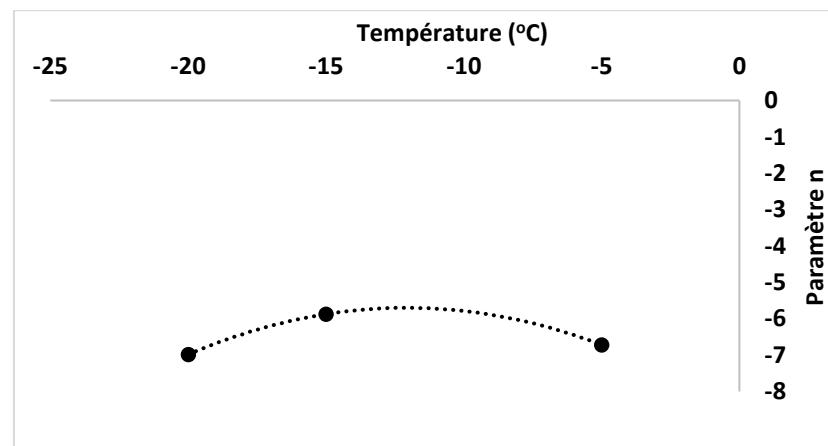
Le tracé de l'évolution des trois paramètres α , $f(\eta)$ et n en fonction de la température permet d'avoir une idée sur leurs valeurs dans d'autres gammes de température comprise entre -5 et -20°C, comme illustré sur la Figure 4-18.



(a) Évolution du paramètre α en fonction de la température



(b) Évolution du paramètre $f(\eta)$ en fonction de la température



(c) Évolution du paramètre n en fonction de la température

Figure 4-18 : Évolution des paramètres α , $f(\eta)$ et n en fonction de la température

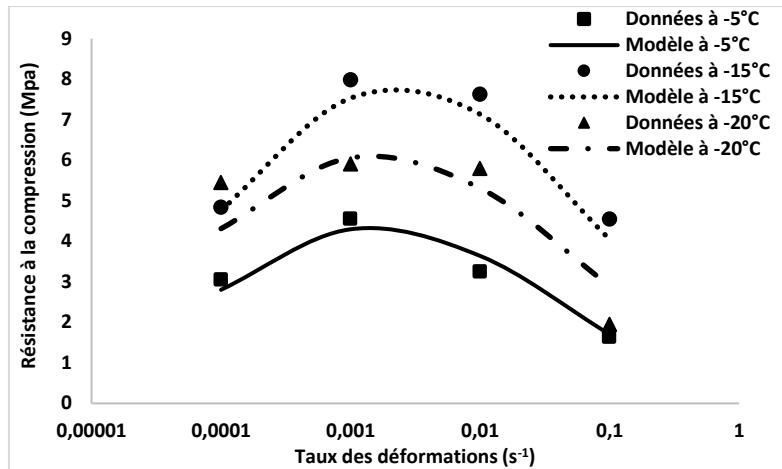


Figure 4-19 : Évolution du critère de rupture et comparaison avec l'expérimentale pour les trois températures, glace atmosphérique poreuse

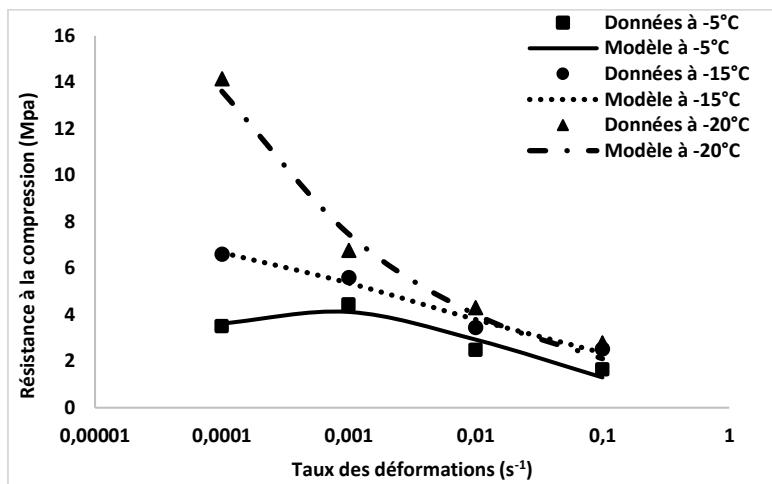


Figure 4-20 : Évolution de la courbe normale et comparaison avec l'expérimentale pour les trois températures, glace désaérée

La reproduction des courbes expérimentales en utilisant l'équation (4.2) montre une bonne concordance entre le modèle proposé et les résultats expérimentaux. Il faut noter que le critère de rupture proposé reste valide pour la zone de rupture fragile ; sa validité dans la zone de comportement ductile reste à vérifier.

4.3.2 Intégration de l'effet de la température sur le critère de rupture

D'après les mesures expérimentales, la température influence significativement le comportement mécanique de la glace. L'influence de la température peut être décelée en utilisant une fonction *shift*. En se basant sur une température de référence, les mesures expérimentales peuvent être ramenées ou extrapolées vers d'autres valeurs de température.

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)} \quad (4.3)$$

L'équation (4.3) montre la forme analytique de la loi WLF [87], les constantes C_1 et C_2 sont des constantes empiriques à déterminer, T est la température et T_r est la température de référence choisie pour établir la courbe maîtresse.

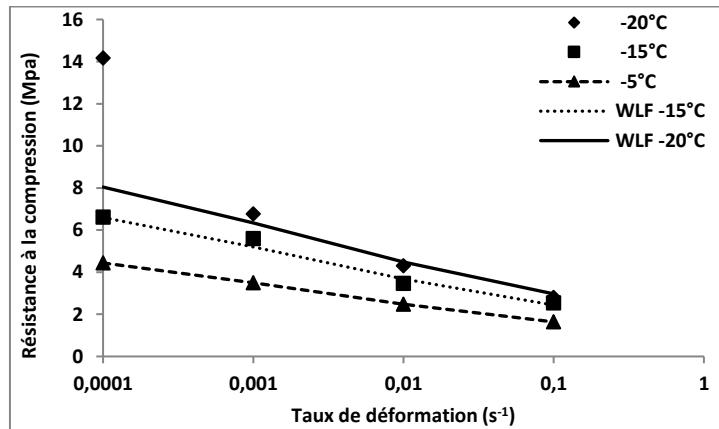


Figure 4-21 : Évolution de la fonction shift et comparaison avec les valeurs expérimentales, glace désaérée

La température -5°C a été choisie pour cette fin. Les résultats obtenus pour la glace désaérée sont illustrés à la Figure 4-21. Les résultats montrent une bonne fiabilité de l'approche proposée.

4.4 Validation expérimentale

4.4.1 Tests de compression uniaxiale

Le critère de rupture a été développé sur la base des résultats des essais réalisés à des températures de -5, -15 et -20°C. Afin de valider ce critère, un ensemble distinct de tests de compression uniaxiale a été effectué à une température de -10°C, sous des taux de déformation de 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} et $10^{-1}s^{-1}$. Le but de cette étape est de valider le critère de rupture empirique et de vérifier sa capacité de prédiction dans d'autres valeurs de température.

La Figure 4-22 illustre une comparaison entre les données expérimentales et le critère de rupture à -10°C. Le Tableau 4-4 présente les valeurs des paramètres de critère de rupture dans la même température, qui ont été déterminés par interpolation.

Tableau 4-4 : Différents paramètres présentés dans le critère de rupture à -10°C

PARAMÈTRES	n	$f(\eta)$	α
TEMPÉRATURE			
-10°C	-6.52	3.11	46.83

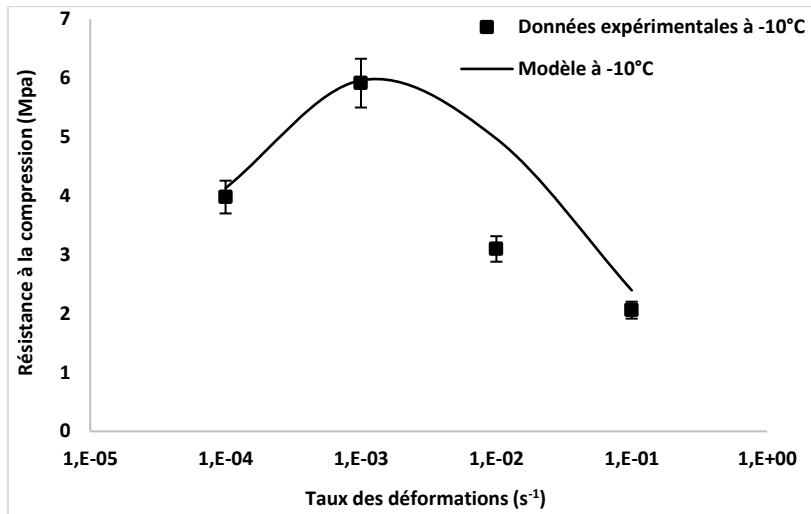


Figure 4-22 : Comparaison entre critère de rupture et données expérimentales à -10°C.

La Figure 4-22 montre une bonne concordance entre le critère de rupture et les données expérimentales. L'erreur relative moyenne est de 14,52%.

4.4.2 Tests de traction uniaxiale

En traction, la glace montre un comportement fragile à des taux de déformation relativement faibles [88]. Le critère de rupture proposé, présenté par l'équation (4.2), a été vérifié dans le cas d'un état de contrainte de traction dans la zone du comportement fragile (des taux de déformation supérieurs à $10^{-4}s^{-1}$) en utilisant les données expérimentales de Mohamed et Farzaneh [88].

Mohamed et Farzaneh ont étudié la résistance à la traction de la glace atmosphérique sous différents taux de déformation, températures et vitesses du vent. Certains de ces résultats ont été utilisés pour le développement du critère de rupture proposé, tandis que d'autres ont été utilisés pour la validation. Les paramètres α , n et $f(\eta)$ du critère de rupture en traction sont déterminés en se basant sur ces résultats et sont présentés dans le Tableau 4-5.

Tableau 4-5 : Différents paramètres présentés dans le critère de rupture en fonction de la température pour les données de traction

PARAMÈTRES TEMPÉRATURE	n	$f(\eta)$	α
-5°C	-314.66	76.79	731708
-10°C	-303.33	94.86	41366.9
-15°C	-309.91	91.93	70932.8

Les données qui étaient exclues dans le processus de développement du critère de rupture sont utilisées pour la validation de critère de rupture à des températures de -5, -10 et -15°C. La Figure 4-23 présente une comparaison entre le critère de rupture et les données expérimentales à -5, -10 et -15°C. Le critère de rupture reproduit la résistance à la traction avec fidélité. Le critère de rupture prédit la résistance à la traction de la glace atmosphérique avec une bonne précision, l'erreur relative moyenne est de 1,48, 1,19 et 0,72% pour les températures à -5, -10 et -15°C respectivement.

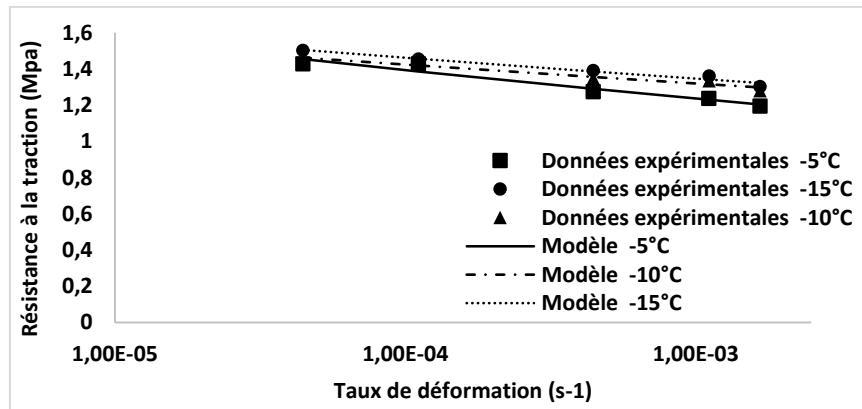


Figure 4-23 : Évolution du critère de rupture et comparaison avec les données expérimentales de traction uniaxiale de la glace atmosphérique poreuse

4.5 Réseaux de neurones et prédition de la rupture fragile de la glace atmosphérique

Afin de caractériser la rupture fragile de la glace sous différents types de chargements, de nombreux auteurs ont proposé différents critères de rupture [15], [42], [62], [69]. Cependant, les expressions explicites de ces critères sont complexes, et la plupart du temps ne n'incluent pas les différents paramètres environnementaux et structuraux qui reflètent le comportement de la glace, ce qui rend la conception des structures dans les climats froids une tâche compliquée.

Parmi les méthodes qui semblent être prometteuse, pour caractériser la rupture de la glace, on peut citer l'approche neuronale. Effectivement, à l'aide d'un algorithme approprié, basé sur les réseaux de neurones, on peut faire une corrélation entre des données expérimentales et théoriques ; ce qui peut à priori, caractériser un modèle théorique de rupture d'un matériau donné. C'est dans cette perspective que cette section est orientée et elle consiste, dans un premier temps, à établir une corrélation via des données d'entrées (températures et taux de déformations) et des données de sorties (résistances à la rupture mesurées). Plus de détails sur l'approche neuronale sont illustrés dans l'Annexe.

4.5.1 Architecture du réseau de neurones utilisé

Dans la présente étude, le réseau neuronal de type perceptron multicouches avec rétro-propagation d'erreur (*Backpropagation*) [89] est utilisé pour prédire la résistance à la compression de la glace atmosphérique en fonction du taux de déformation et de la température. Les données expérimentales ont été utilisées pour former et tester le réseau de neurones. Une comparaison avec d'autres ensembles de données expérimentales montre la bonne prédition du modèle proposé.

Le réseau de neurones utilisé est composé d'une couche d'entrée, des couches cachées, et d'une couche de sortie. La couche d'entrée contient deux neurones (température et vitesse de déformation), la couche de sortie contient un seul neurone, tandis que le nombre de couches cachées varie en fonction de l'ensemble expérimental et de la précision recherchée.

La Figure 4-24 illustre l'architecture du réseau de neurones utilisé. 60% des données expérimentales sont utilisées pour la formation et l'apprentissage du réseau, 20% est utilisé pour la validation et 20% est conservé à des fins de test et comparaison. Afin de minimiser l'erreur entre la valeur de consigne et la sortie du réseau, un algorithme d'apprentissage de rétropropagation est utilisé, combiné avec un algorithme d'optimisation de Levenberg-Marquardt. En outre, la fonction sigmoïde est sélectionnée comme fonction d'activation pour les couches cachées.

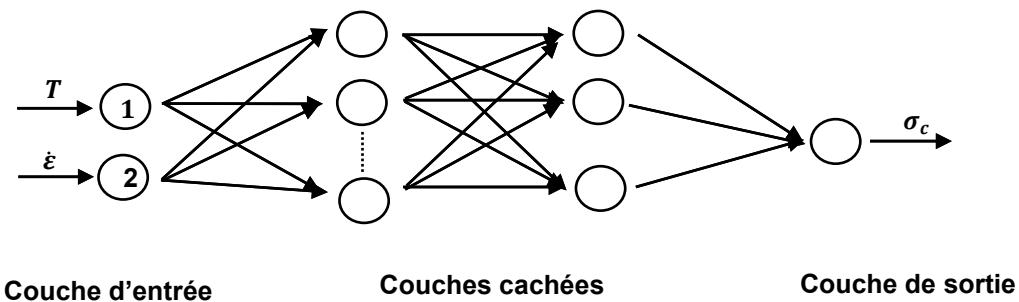


Figure 4-24 : L'architecture du modèle neuronal

4.5.2 Prédiction de la résistance à la compression de la glace atmosphérique avec les réseaux de neurones

L'algorithme proposé pour prédire la résistance à la compression de la glace atmosphérique en utilisant les réseaux de neurones est implémenté sur le langage Matlab. Cet algorithme est illustré à la Figure 4-25 :

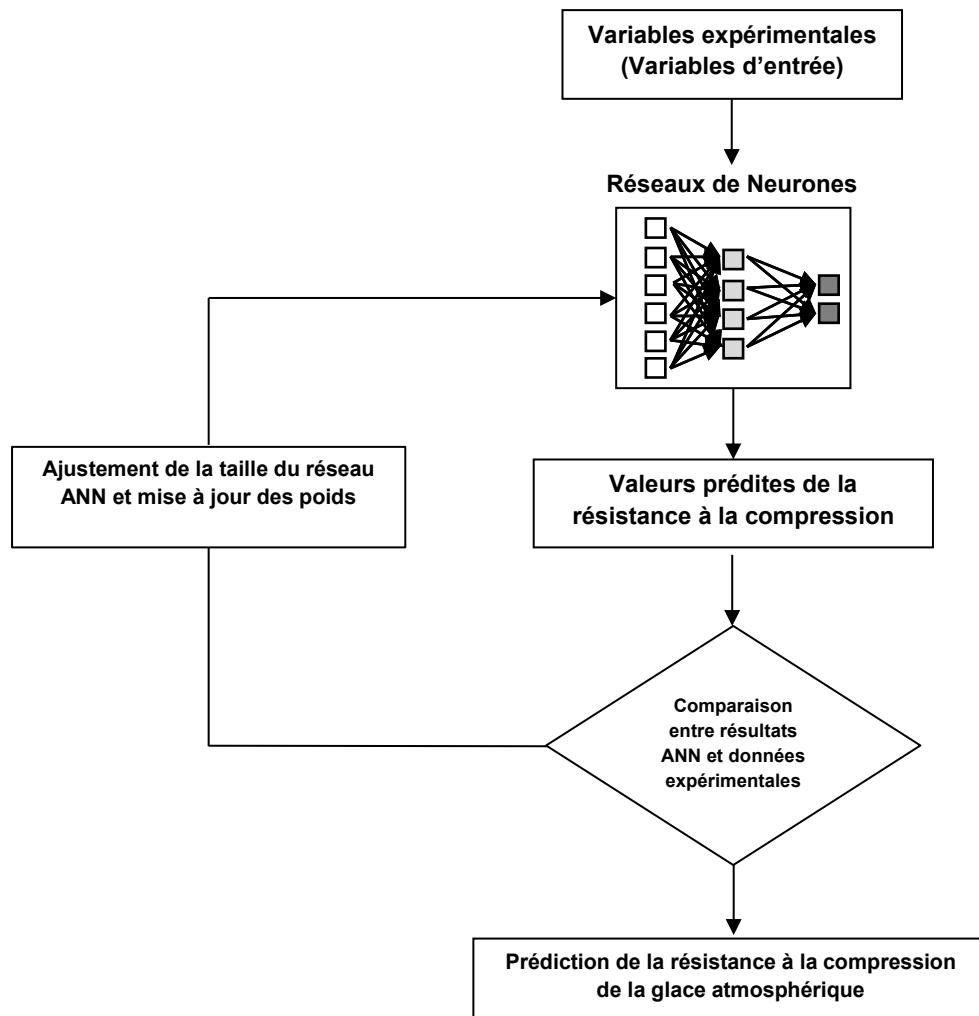


Figure 4-25 : Algorithme de modélisation par réseaux de neurones

Les valeurs de résistance à la compression estimées par le modèle neuronal sont reportées dans le Tableau 4-6, ces mêmes valeurs sont présentés aux Figure 4-26, Figure 4-27 et Figure 4-28.

Tableau 4-6 : Valeurs de la résistance à la compression expérimentales comparées aux valeurs estimées par le modèle neuronal

Taux de déformation (s^{-1})	T = -20 °C			T = -15 °C			T = -5 °C		
	Résistance à la compression (MPa)	Model neuronal (MPa)	Résistance à la compression (MPa)	Model neuronal (MPa)	Résistance à la compression (MPa)	Model neuronal (MPa)			
	Av.	S.D.	Av.	S.D.	Av.	S.D.			
1E-1	1.95	0.04	1.9092	4.55	0.5	-0.8075	1.64	0.7	2.5703
1E-2	5.8	0.01	5.811	7.63	0.3	7.63	3.25	0.3	3.2409
1E-3	5.91	0.2	5.9197	7.98	0.57	7.98	4.55	0.7	4.5514
1E-4	5.45	0.3	5.4971	4.84	0.25	8.922	3.05	0.89	2.1553

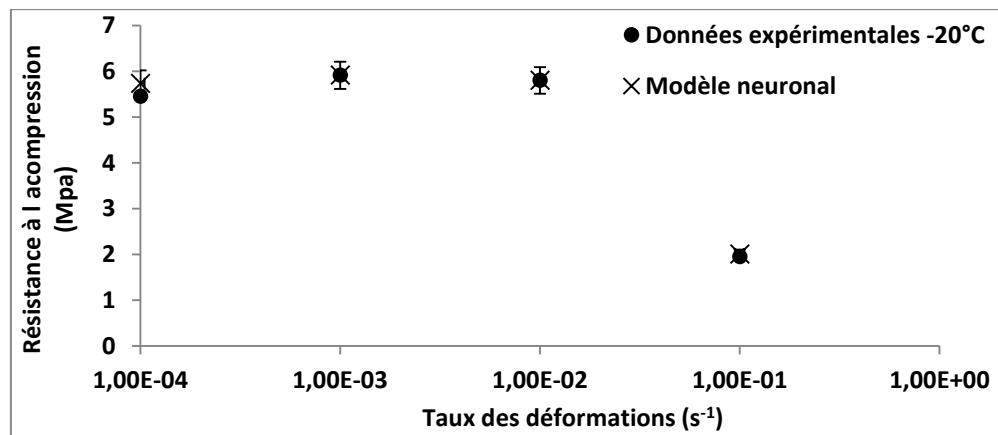


Figure 4-26 : Résistance à la compression prédictive à -20°C

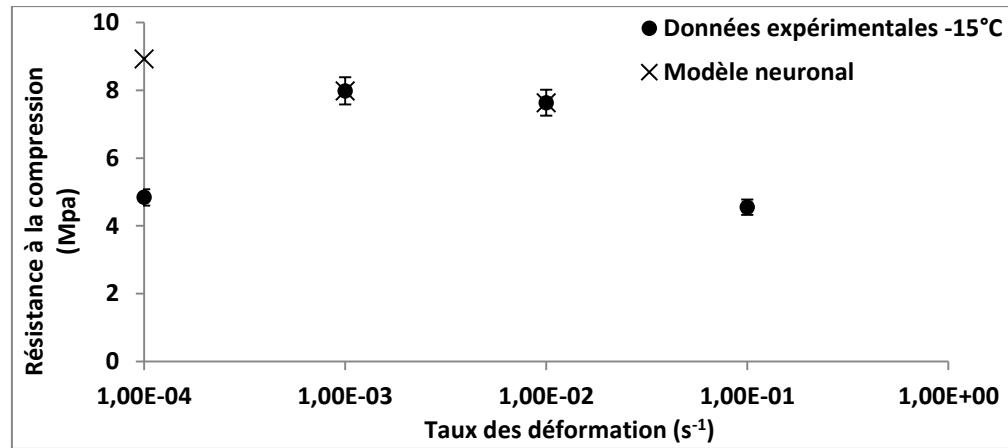


Figure 4-27 : Résistance à la compression prédite à -15°C

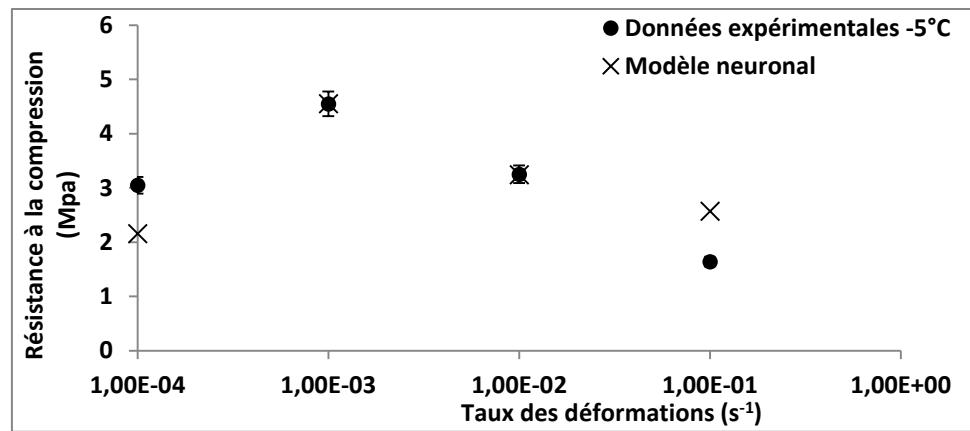


Figure 4-28 : Résistance à la compression prédite à -5°C

Le traçage de l'ensemble des résultats obtenus par le modèle sous les différentes conditions expérimentales (température et taux de déformation) contre les données expérimentales permet de mieux présenter son pouvoir de prédiction, ces résultats sont illustrées sur la Figure 4-29.

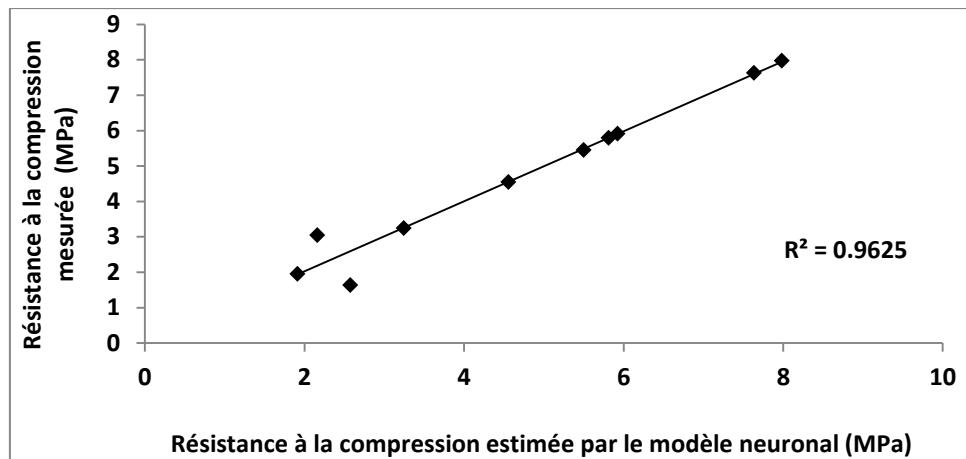


Figure 4-29 : Comparaison entre les valeurs mesurées et celles prédites par le modèle neuronal

Les valeurs estimées par le modèle neuronal montrent une bonne concordance avec l'expérimental, avec un coefficient de corrélation de $R^2 = 0,9625$. L'erreur relative est de 1,71, 5,37 et 0,22% pour les températures -20, -15, et -5°C respectivement [90].

L'approche neuronale introduite dans la présente étude a comme but d'initier l'utilisation des algorithmes de type neuronale pour la caractérisation de la glace et le traitement de givrage atmosphérique, comme elle a été réalisée pour la caractérisation des matériaux viscoélastiques [91].

Chapitre 5

ANALYSE DES RÉSULTATS ET CRITÈRES DE RUPTURE DE LA GLACE ATMOSPHÉRIQUE SOUS CHARGEMENT TRIAXIAL

5.1 Introduction

La présentation d'une surface de rupture pour la glace atmosphérique permet de révéler l'effet de la pression hydrostatique sur son comportement triaxial. Notons que la glace présente un comportement fortement dépendant du confinement [68], [92], [93]. À notre connaissance, la littérature scientifique ne présente pas encore une étude sur le comportement triaxial de la glace atmosphérique, ce qui rend la proposition d'une surface de rupture adéquate quasiment impossible, sachant que l'association d'une surface de rupture avec le comportement triaxial de la glace atmosphérique est primordiale dans la compréhension du phénomène de délestage.

À cet effet, dans le présent chapitre, une présentation des résultats expérimentaux relatifs aux tests de compression triaxiale sera élaborée, l'analyse de ces résultats permettra la proposition des critères de rupture appropriés.

5.2 Analyse des résultats expérimentaux en compression triaxiale

Afin d'assurer la répétitivité des résultats, un minimum de cinq essais ont été réalisés. Pour chaque test, la courbe contrainte diviatorique ($\sigma_1 - \sigma_3$) en fonction de la déformation est tracée, la valeur maximale atteinte de la contrainte avant l'écoulement plastique est notée. La valeur moyenne ainsi que l'écart type sous chaque condition expérimentale sont présentés dans les Tableau 5-1, Tableau 5-2 et Tableau 5-3.

Tableau 5-1 : Résultats de la compression triaxiale de la glace atmosphérique préparée et testée à -5°C

Taux de déformation $\dot{\varepsilon}$ (s^{-1})	Contraintes de confinement (σ_3) (MPa)	Contrainte différentielle ($\sigma_1 - \sigma_3$) (MPa)	
		Av.	S.D.
10^{-4}	0	3	0.89
	0.75	3.97	0.57
	1.5	7.94	0.69
	3	4.69	0.14
10^{-3}	0	4.5	0.7
	1.125	13.42	2.38
	2.25	19.07	1.69
	4.5	9.24	1.06
10^{-2}	0	3.25	0.3
	0.81	7.85	1.15
	1.62	8.33	1.44
	3.25	12.52	0.75

Tableau 5-2 : Résultats de la compression triaxiale de la glace atmosphérique préparée et testée à -10°C

Taux de déformation $\dot{\varepsilon}$ (s^{-1})	Contraintes de confinement (σ_3) (Mpa)	Contrainte différentielle ($\sigma_1 - \sigma_3$) (Mpa)	
		Av.	S.D.
10^{-4}	0	3.97	0.73
	0.99	4.13	0.91
	1.98	4.34	0.85
	3.97	5.36	0.34
10^{-3}	0	5.91	1.03
	1.47	6.87	1.53
	2.95	8.04	1.86
	5.91	8.99	0.97
10^{-2}	0	3.09	0.35
	0.79	13.39	2.10
	1.58	15.76	1.76
	3.16	19	2.32

Tableau 5-3 : Résultats de la compression triaxiale de la glace atmosphérique préparée et testée à -15°C

Taux de déformation $\dot{\varepsilon}$ (s $^{-1}$)	Contraintes de confinement (σ_3) (MPa)	Contrainte différentielle ($\sigma_1 - \sigma_3$) (MPa)	
		Av.	S.D.
10^{-4}	0	4.84	0.25
	1.21	4.98	0.66
	2.42	5.11	0.87
	4.84	5.97	1.01
10^{-3}	0	7.98	0.57
	1.99	8.16	1.45
	3.99	7.78	1.87
	7.98	8.30	0.95
10^{-2}	0	7.63	0.3
	1.91	11.79	1.13
	3.82	16.10	2.34
	7.63	16.62	2.12

5.2.1 Effet du confinement sur le comportement de la glace atmosphérique

L'application d'une pression de confinement affecte significativement le comportement de la glace atmosphérique, et entraîne par la suite une augmentation de sa résistance à la rupture uniaxiale. L'analyse des résultats obtenus permet la compréhension des effets du confinement ainsi que les différents phénomènes physiques associés.

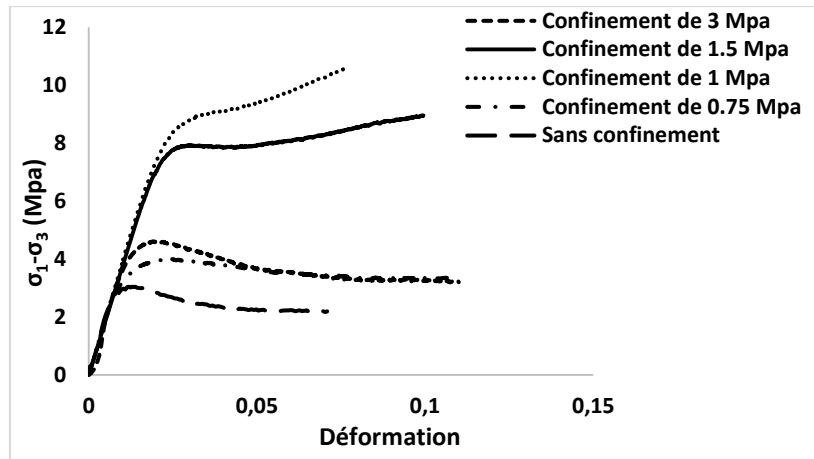


Figure 5-1 : Courbe contrainte-déformation pour différentes pressions de confinement
à un taux de déformation de 10^{-4}s^{-1} à -5°C

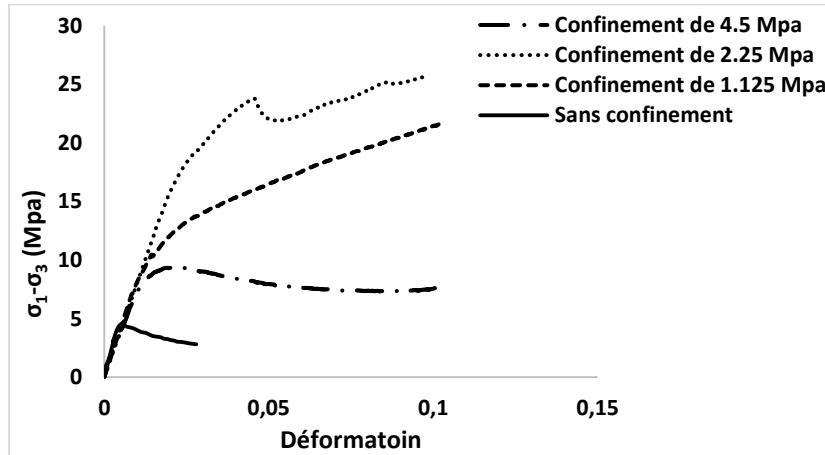


Figure 5-2 : Courbe contrainte-déformation pour différentes pressions de confinement
à un taux de déformation de 10^{-3}s^{-1} à -5°C

Comme illustré aux Figure 5-1 et Figure 5-2, pour le domaine des déformations ductiles (taux de déformation de 10^{-4} à 10^{-3}s^{-1}), l'application d'une légère pression de confinement a comme effet d'augmenter la résistance à la compression maximale de la glace atmosphérique [94]. La valeur de résistance ($\sigma_1-\sigma_3$) est atteinte pour des déformations de plus en plus grandes avec l'augmentation du confinement. Notons que la pression de confinement n'a aucune influence sur le module d'élasticité de la glace.

La rupture fragile de glace atmosphérique est fortement influencée par le confinement hydrostatique [92]. À un taux de déformation de 10^{-2}s^{-1} , le test de compression sans confinement de la glace atmosphérique donne une déformation élastique suivie par une rupture brusque et fragile, comme illustré à la Figure 5-3. L'application d'une pression de confinement de 0.81 MPa supprime cette rupture fragile ainsi que la fissuration associée. Cela permet à la contrainte d'augmenter au-delà de la résistance à la compression uniaxiale, menant à une déformation plastique et à un écoulement par la suite.

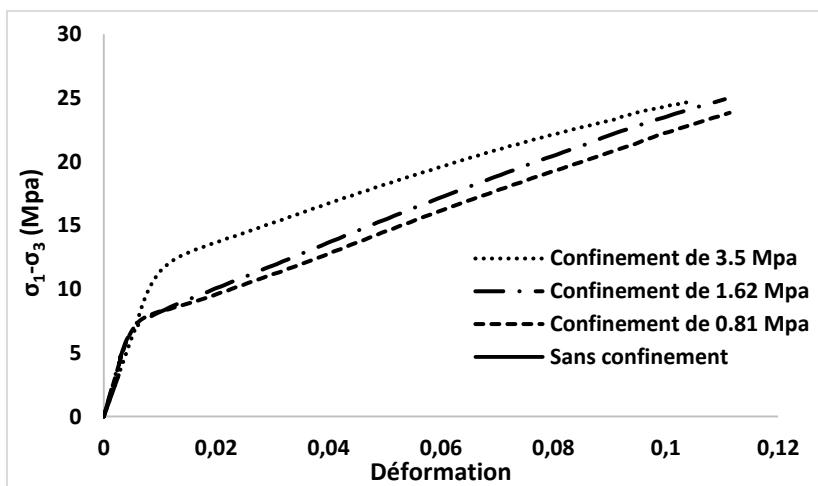


Figure 5-3 : Courbe contrainte-déformation pour différentes pressions de confinement à un taux de déformation de 10^{-2}s^{-1} à -5°C

La résistance maximale ($\sigma_1 - \sigma_3$) définie comme la contrainte maximale juste avant l'écoulement plastique croît avec l'augmentation du confinement. Pour un confinement égal à 1.62 MPa, ceci rejoint les observations expérimentales de Jones [94] et de Parameswaran [95]. Cependant, pour des confinements plus grands, cette valeur de résistance chute d'une façon considérable, tel qu'illustré à la Figure 5-4. Ceci rejoint les mesures expérimentales de Gamon et Gagnon [93], sur la glace des icebergs dans des températures proches du point de fusion. Ce phénomène a été attribué à la dépression du point de gel due au confinement (avec une pression de confinement qui se rapproche de la pression de changement de phase solide-liquide de la glace à 200 MPa, le point de fusion de la glace qui est de 0°C est

recalé vers des températures plus négatives) qui a un effet non négligeable sur la glace pour des températures proches du point de fusion (température de -5°C).

Cependant, les pressions de confinement examinées dans la présente étude sont de beaucoup plus faibles que la pression de changement de phase de l'eau. Nous croyons que la tendance observée illustrée à la Figure 5-4 peut être interprétée en termes de plasticité et de dommage induit par confinement, puisque les contraintes de confinement sont plus grandes que la limite élastique observée dans des tests de compression uniaxiale. Une autre interprétation peut se dire en termes de recristallisation dynamique due aux contraintes de confinement. Melanson et al [96] et Meglis et al [97] ont étudié le mécanisme de recristallisation dynamique dans la glace granulaire dans des conditions expérimentales similaires à cette étude. Dans les deux études, la taille moyenne des grains a fortement diminué avec l'augmentation de la déformation et du confinement. Ce phénomène a été attribué à la microfissuration à des taux de déformation élevés, bien qu'il y ait peu de preuve de la microfissuration à des taux de déformation plus faibles, ce qui suggère que le mécanisme de réduction de la taille des grains est une recristallisation dynamique. Des études similaires par Jacka [98], [99] sur la taille des cristaux de glace et de l'orientation sous flUAGE ont mené aux mêmes conclusions.

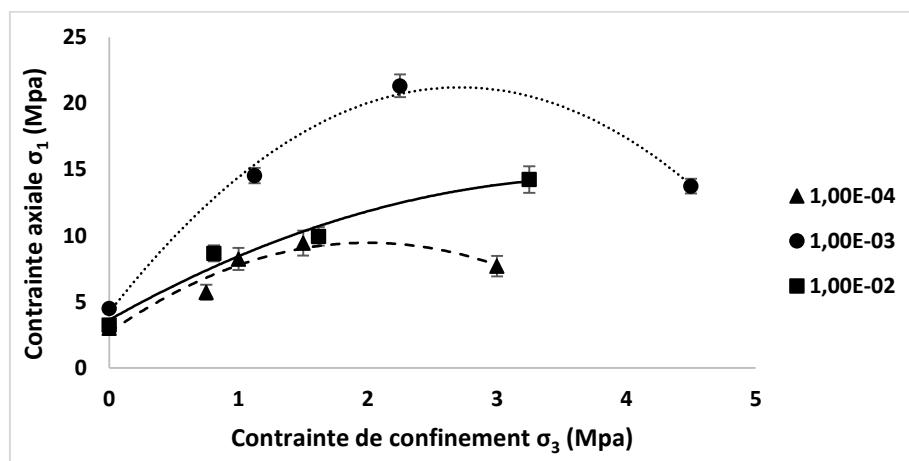


Figure 5-4 : Contrainte axiale en fonction du confinement à -5°C

La résistance maximale σ_1 obtenue pour chaque taux de déformation à partir des Figure 5-1, Figure 5-2 et Figure 5-3 est tracée en fonction de la contrainte de confinement, comme illustré aux Figure 5-4 et Figure 5-5. La résistance confinée est toujours plus grande que la résistance uniaxiale pour les trois taux de déformation investigués.

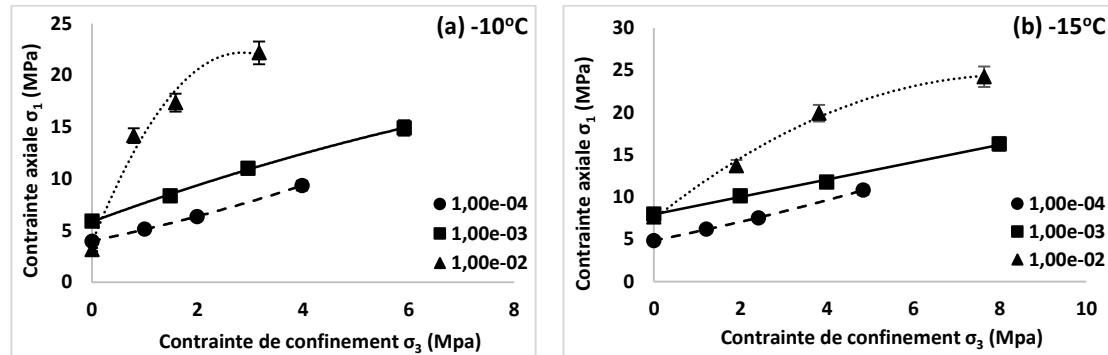


Figure 5-5 : Contrainte axiale en fonction de la contrainte de confinement pour des températures de (a) -10 et (b) -15°C

5.2.2 Effet du taux de déformation sur la résistance triaxiale de la glace atmosphérique

Afin d'étudier l'effet du taux de déformation sur la résistance maximale de la glace atmosphérique, les valeurs de la contrainte axiale en fonction du taux de déformation sous plusieurs contraintes de confinement sont présentées aux Figure 5-6 et Figure 5-7. Comme le montre ces figures, même sous pression de confinement, le comportement triaxial de la glace atmosphérique à -5°C est fortement influencé par le taux de déformation. La transition ductile-fragile est toujours observée à 10^{-3} s^{-1} , sauf pour un confinement égal à la résistance à la compression σ_c , où la contrainte axiale continue à croître avec une tendance stable.

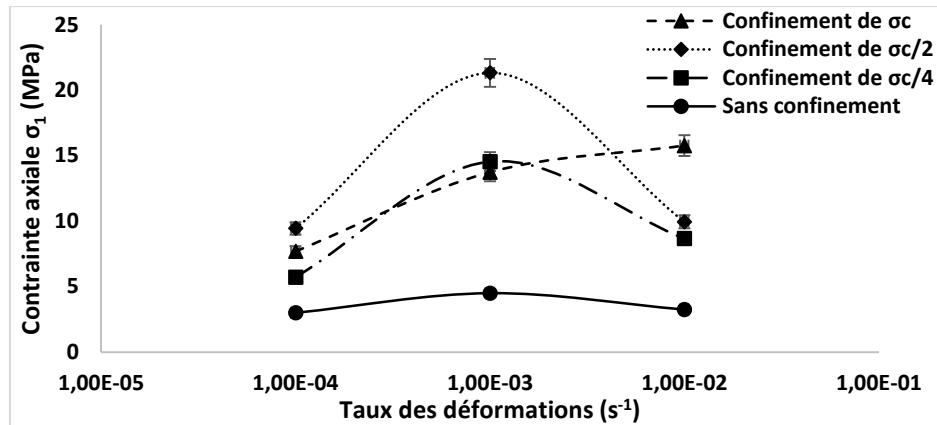


Figure 5-6 : Contrainte axiale en fonction des taux de déformation pour différentes pressions de confinement à -5°C

La résistance à la compression σ_1 de la glace atmosphérique continue à évoluer avec l'augmentation du taux de déformation à -10 °C et -15°C. Celle-ci augmente avec la croissance du confinement appliqué. Comme illustré à la Figure 5-7, la zone de transition ductile-fragile n'est pas visible dans ces résultats.

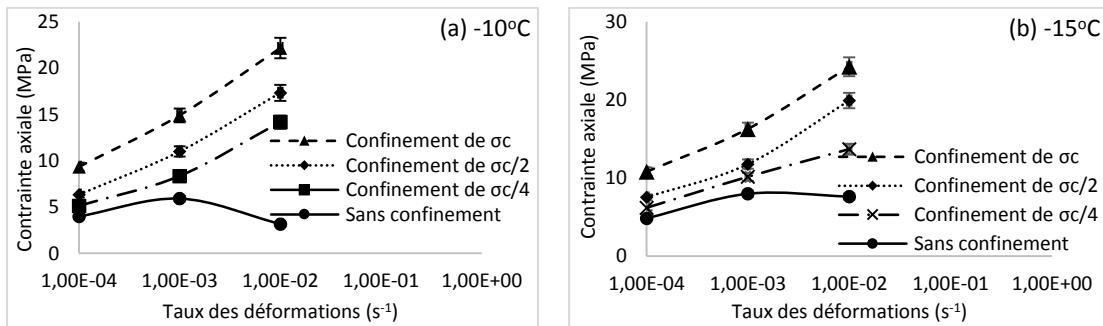


Figure 5-7 : Contrainte axiale en fonction des taux de déformation pour différentes pression de confinement à (a) -10 et (b) -15°C

À -10°C et -15°C, on n'observe plus de transition ductile-fragile, la résistance de la glace atmosphérique continue à évoluer d'une façon significative avec augmentation du taux de déformation. Jones [94] a relié cette observation à deux causes majeures, la première étant l'état de surface des plaques de la machine de compression, car un simple

désalignement ou la présence d'irrégularités dans la surface de contact peut conduire à une concentration des contraintes dans les échantillons. La deuxième cause est la raideur de la machine de test, c'est-à-dire que lorsque la machine se rapproche de sa limite de résistance, l'énergie emmagasinée dans le système se libère, ce qui mène à une accélération brusque des plaques de compression en induisant la rupture prématuée de l'échantillon. Cependant, les deux causes ne s'avèrent pas plausibles pour la présente étude, car la machine de tests MTS 810 utilisée est considérée infiniment rigide jusqu'à sa capacité maximale (qui est de 250 KN). De plus, pour relaxer les concentrations des contraintes à la surface de contact entre les plaques de compression et l'échantillon, des morceaux de papier ont été introduits. Une interprétation à cette observation doit émaner d'une étude approfondie des micro-mécanismes de déformation de la glace atmosphérique.

5.2.3 Effet de la température sur la résistance triaxiale de la glace atmosphérique

La résistance à la compression de la glace atmosphérique est fortement influencée par les changements de température. L'interférence de ce paramètre avec la pression de confinement permet d'expliquer plusieurs observations expérimentales.

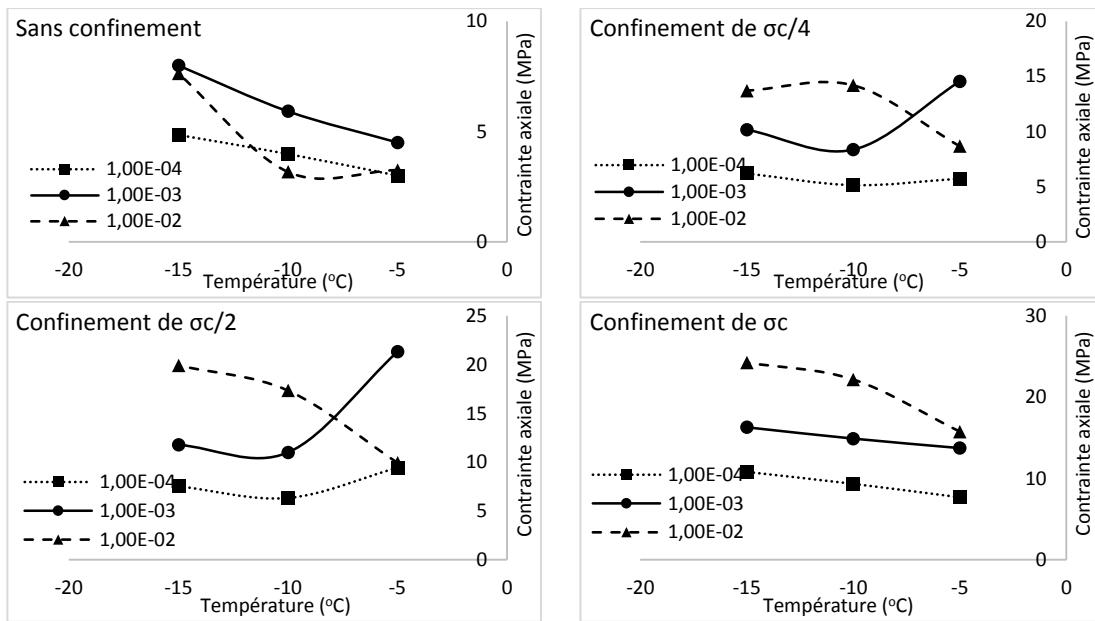


Figure 5-8 : Contrainte axiale en fonction de la température pour différents taux de déformation sous différentes pression de confinement

D'après les résultats expérimentaux illustrés à la Figure 5-8, on peut dire que, pour un taux de déformation donnée, la résistance de la glace atmosphérique tend à augmenter avec la diminution de la température. Cependant, on peut constater que certains résultats contredisent cette remarque, surtout pour des confinements intermédiaires de $\sigma_c/2$ et $\sigma_c/4$ et des taux de déformation de 10^{-3}s^{-1} . Ceci peut être relié aux mécanismes de fissuration et leur influence par la température. Une étude plus approfondie est nécessaire pour interpréter ce phénomène.

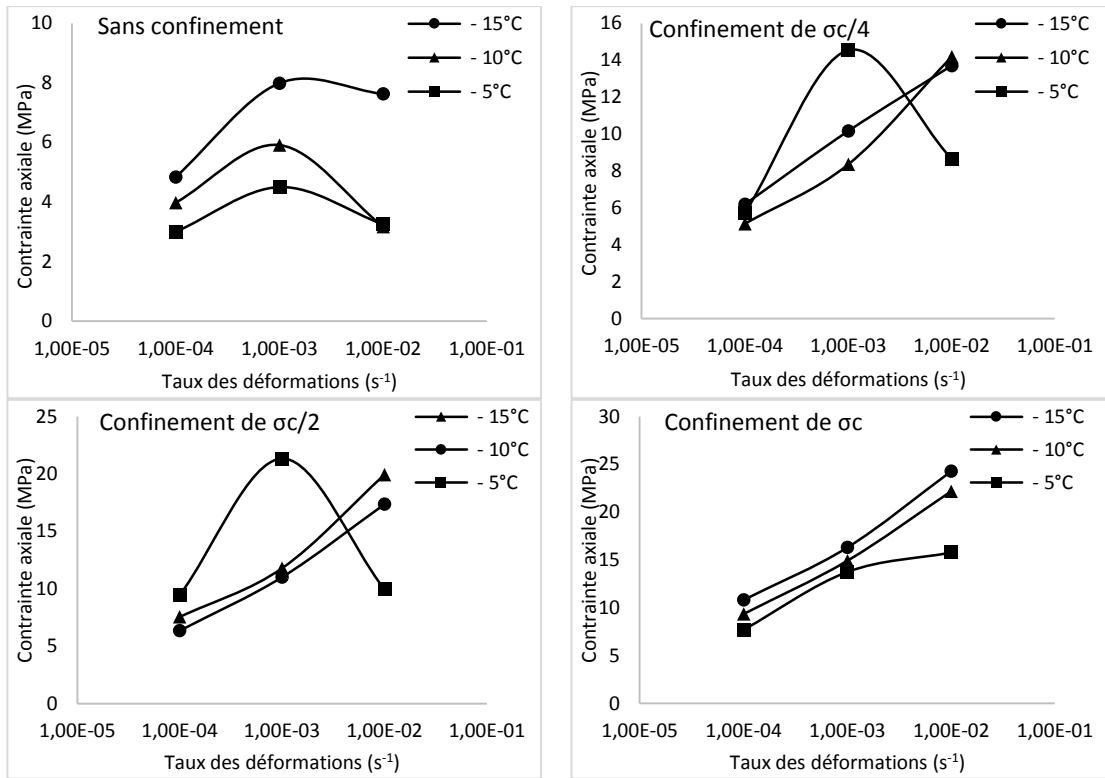


Figure 5-9 : Contrainte axiale en fonction des taux de déformation pour différentes températures sous différentes pressions de confinement

La Figure 5-9 met en avant une autre illustration de l'influence de la température sur le comportement triaxial de la glace atmosphérique. Sans présence de confinement, la résistance à la compression de la glace augmente avec la diminution de la température. Ceci est également valide pour un confinement égal à la résistance à la compression uniaxiale σ_c de la glace atmosphérique. Toutefois, pour des confinements de $\sigma_c/2$ et $\sigma_c/4$, il faut noter l'influence du taux de déformation sur la résistance de la glace. Ceci peut être relié à la structure granulaire de la glace atmosphérique et son influence par la température d'accumulation [73]. La taille des grains diminue avec la décroissance de la température, alors que la porosité augmente avec la diminution de la température.

Il faut noter également que la densité, la taille et la distribution des pores sont fortement influencées par la température d'accumulation de la glace atmosphérique. Cela paraît évident à la Figure 3-4 déjà présentée au chapitre 3. Gagnon et Gammon [100] ont stipulé que les grains peuvent être durcis par la présence des pores, ceci peut réduire la concentration des contraintes inter-granulaires qui conduisent normalement à l'amorçage des fissures dans les joints des grains. Par conséquent, la présence des pores, jusqu'à une certaine limite, augmente la résistance à la compression de la glace.

5.3 Critères de rupture de la glace atmosphérique

À de faibles taux de déformation, la glace est souvent considérée comme matériau ductile. Son comportement mécanique est représenté par une loi visqueuse non linéaire, et le seuil de plasticité peut être approché par un critère de Tresca ou de Von Mises [42]. Ainsi, pour une glace isotrope, l'enveloppe de rupture dans l'espace tridimensionnel des contraintes va être soit un cylindre, soit un tube hexagonal ayant un axe de révolution qui coïncide avec l'axe hydrostatique comme le montre la Figure 5-10.

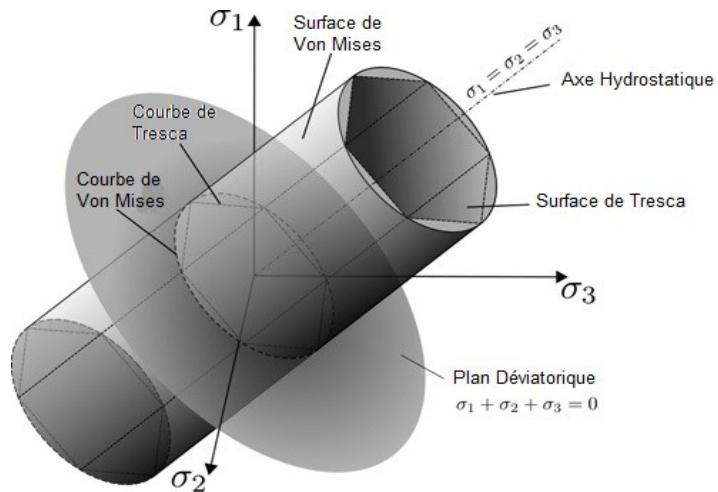


Figure 5-10 : Critères de Von Mises et de Tresca dans l'espace des contraintes principales [61]

À des taux de déformation relativement élevés, la glace fait apparaître un comportement fragile, sa rupture est souvent présentée par le critère de Mohr-Coulomb [42], [59], [60]. Cependant, ce critère se restreint à des conditions de chargement bien spécifiques. Ce critère va être pris en considération dans la présente étude étant donné la nature des résultats obtenus et illustrés à la Figure 5-5. Les résultats exposés à la Figure 5-4 sont plutôt suggestifs. À cet égard, les deux critères de Hoek-Brown et Larme vont être considérés également.

5.3.1 Critère de Mohr-Coulomb

Le critère de Mohr-Coulomb stipule que la contrainte de cisaillement $|\tau|$, agissant tout au long du plan du futur défaut, est résistée par la cohésion du matériau, notée C , et par la friction, qui est définie comme étant le produit du coefficient de la friction interne μ avec la contrainte normale à travers le plan σ .

$$|\tau| = C + \mu\sigma \quad (5.1)$$

Le critère stipule que la résistance axiale de la glace évolue d'une façon linéaire et croissante avec l'augmentation du confinement. Pour la glace atmosphérique, ceci est valide jusqu'à une certaine limite. La justification derrière le choix de ce critère se base sur le fait que les contraintes de confinement dans la glace atmosphérique sont largement inférieures à sa résistance à la compression uniaxiale [101]. Le critère de Mohr-Coulomb peut être également présenté en fonction des contraintes principales minimale et maximale (équation 5.2). Les deux constantes C et φ sont à déterminer à partir des tests triaxiaux.

$$\sigma_1 = \tan^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2}\right)\sigma_3 + 2C \tan\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (5.2)$$

Où φ est l'angle de frottement et C est la cohésion.

5.3.2 Critère de Hoek-Brown

La résistance axiale croît avec le confinement, puis elle tend à se stabiliser, surtout pour des taux de déformation de 10^{-2}s^{-1} , comme illustré à la Figure 5-5. Cela peut être approché par le critère de Hoek-Brown [64], [65]. Ce critère exprime la relation entre la contrainte axiale σ_1 en fonction de la contrainte de confinement σ_3 au moment de la rupture comme :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{1/2} \quad (5.3)$$

Avec σ_c étant la résistance à la compression uniaxiale, m est un paramètre qui dépend de la structure microscopique et du type de la glace, et s est une constante matérielle à déterminer.

La Figure 5-11 illustre les deux critères de Mohr-Coulomb et Hoek-Brown dans l'espace des contraintes principales :

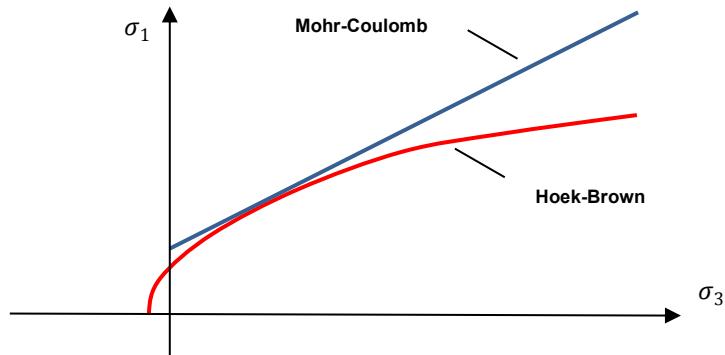


Figure 5-11 : Critères de Mohr-Coulomb et de Hoek-Brown dans l'espace des contraintes principales

5.3.3 Critère de Larme

La résistance triaxiale de la glace atmosphérique croît avec augmentation du confinement jusqu'à un certain point, puis elle chute d'une manière considérable pour des

températures proches du point de fusion. Les critères cités ci-dessus ne permettent pas de représenter cette spécificité puisque d'après eux, la résistance axiale évolue d'une façon croissante avec la pression hydrostatique. Un critère de rupture convenable doit prendre en considération ce caractère.

L'application d'une pression de confinement égale à la résistance uniaxiale de compression de la glace atmosphérique a comme effet de plastifier l'échantillon, en affectant par la suite sa résistance triaxiale. L'analyse des résultats obtenus et illustrés à la Figure 5-4 permet d'établir une réflexion sur la forme de l'enveloppe de rupture qui peut représenter le comportement de la glace atmosphérique.

Après avoir analysé les résultats de Jones [94], Fish [102] a proposé un développement d'ordre deux de la série de Von Mises, afin de présenter un critère de rupture parabolique pour modéliser la rupture de la glace sous des contraintes triaxiales [67]. Ce critère modélise convenablement la décroissance de la résistance triaxiale de la glace pour des taux de confinement élevés. Cependant, il présume que l'espace des contraintes principales admet une symétrie parabolique, ce qui n'est pas toujours le cas.

En analysant nos données expérimentales et en développant le critère de Von Mises sous forme d'une série ayant la forme :

$$\sqrt{J_2} = d + d_1 I_1 + d_2 I_1^2 + d_3 I_1^3 + d_4 I_1^4 \dots \quad (5.4)$$

Où J_2 est le second invariant du tenseur déviateur des contraintes, I_1 est le premier invariant du tenseur des contraintes, d et d_i sont des paramètres à déterminer.

En s'arrêtant à l'ordre trois, l'équation (5.4) donne une forme exprimée par l'équation (5.5) dans l'espace des contraintes principales :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \tan\theta(a - \sigma_3)(1 + (\sigma_3 - a)/a - b)^{1/2} \quad (5.5)$$

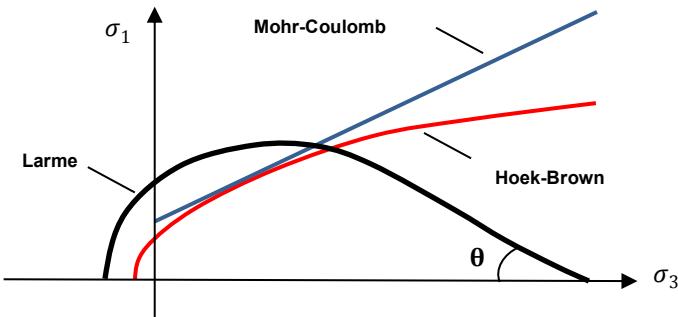


Figure 5-12 : Comparaison entre le critère de Larme et les critères de Mohr-Coulomb et de Hoek-Brown dans l'espace des contraintes principales

La représentation de ce critère dans l'espace des contraintes principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) donne une surface ayant la forme d'une larme, d'où vient le nom du critère Larme. Nadreau et Michel [69] ont identifié les constantes a et b dans l'équation (5.5) comme étant la pression de changement de phase C de la glace et la limite de plasticité en traction biaxiale T :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \tan\theta(C - \sigma_3)(1 + (\sigma_3 - C)/C - T)^{1/2} \quad (5.6)$$

Cependant, l'interprétation physique des deux constantes matérielles incorporées dans ce modèle reste le point faible de cette solution. De plus, le modèle prédit une évolution linéaire du demi-angle θ en fonction du taux de déformation, ce qui n'est pas le cas pour des taux de déformation assez élevés où la rupture fragile est dominante. Également, le critère a été développé pour des contraintes de confinement proches de la pression de changement de phase de la glace, ce qui n'est pas le cas dans la présente étude.

Les trois critères de rupture, à savoir Mohr-Coulomb, Hoek-Brown et le critère de Larme, sont adoptés à une échelle comparative comme des critères de rupture pour la glace atmosphérique.

5.4 Identification et validation par les résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux ont servi comme données d'entrées, afin d'identifier les constantes matérielles incorporées dans les critères de rupture exposés dans la section précédente.

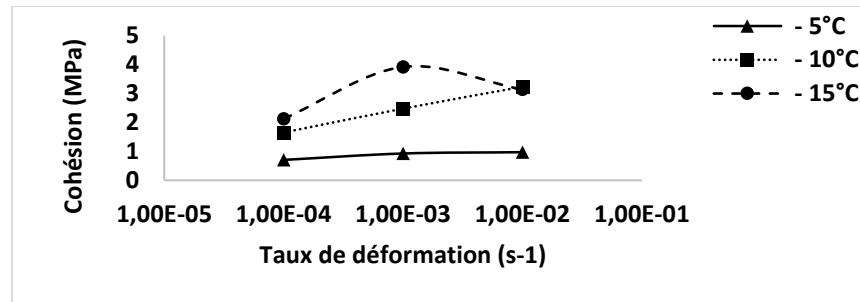
5.4.1 Critère de Mohr-Coulomb

Les paramètres C et φ du critère de Mohr-Coulomb ont été identifiés en utilisant les résultats expérimentaux et en appliquant la régression non-linéaire. La cohésion C et l'angle de frottement φ ont été identifiés pour chaque taux de déformation, leurs valeurs sont présentées au Tableau 5-4.

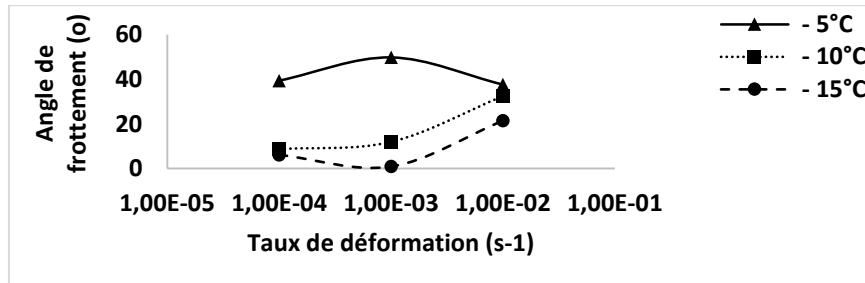
Tableau 5-4 : La cohésion C et l'angle de frottement φ pour chaque taux de déformation à -5°, -10° et -15°C

Taux de déformation	- 5°C		- 10°C		- 15°C	
	$C(Mpa)$	$\varphi(^{\circ})$	$C(Mpa)$	$\varphi(^{\circ})$	$C(Mpa)$	$\varphi(^{\circ})$
1,00E-04	0,70	39,38	1,64	8,65	2,12	6,07
1,00E-03	0,92	49,82	2,47	11,92	3,91	0,86
1,00E-02	0,96	37,63	3,23	32,45	3,13	21,41

La Figure 5-13 illustre l'évolution de ces deux paramètres en fonction du taux de déformation.



(a) Évolution de la cohésion en fonction de la température



(b) Évolution de l'angle de frottement en fonction de la température

Figure 5-13 : Évolution de la cohésion C et de l'angle de frottement φ en fonction des taux de déformation pour les trois températures -5, -10 et -15°C

La glace atmosphérique devient de plus en plus cohésive avec la diminution de la température et l'augmentation du taux de déformation, tout comme montré à la Figure 5-13(a). Tandis que l'angle de frottement décroît avec la diminution de la température, ceci est dû à la nature des grains de la glace atmosphérique, qui dépend fortement de la température de l'accumulation. Le Tableau 5-5 résume l'ensemble des résultats obtenus par le critère de Mohr-Coulomb. Une comparaison entre les résultats expérimentaux et le critère de Mohr-Coulomb est illustrée à la Figure 5-14. Le critère reproduit bien l'évolution de la contrainte axiale en fonction de la contrainte de confinement. Cependant, à -5°C, le critère reste incapable de reproduire la diminution de la résistance de la glace avec l'augmentation du confinement. Ceci est dû à sa nature linéaire qui stipule que la résistance axiale évolue linéairement avec l'augmentation du confinement (équation 5.2).

Tableau 5-5 : Valeurs de la résistance à la compression prédites par le critère de Mohr-

Coulomb

Taux de déformation (s ⁻¹)	-5°C		-10°C		-15°C	
	Résistance (MPa)	erreur (%)	Résistance (MPa)	erreur (%)	Résistance (MPa)	erreur (%)
10⁻⁴	2.96	1.32	3.82	4.07	4.71	2.61
	6.31	27.04	5.16	24.73	6.21	24.70
	9.67	21.76	6.51	49.74	7.71	50.73
	16.37	249.14	9.20	71.63	10.70	79.18
	Erreurs moyenne	74.81	Erreurs moyenne	37.54	Erreurs moyenne	39.30
10⁻³	5.03	11.79	6.09	3.01	7.94	0.64
	13.44	0.15	8.34	21.31	10.00	22.45
	21.85	14.58	10.59	31.61	12.05	54.83
	38.67	318.50	15.08	67.73	16.17	94.67
	Erreurs moyenne	86.26	Erreurs moyenne	30.91	Erreurs moyenne	43.15
10⁻²	3.90	20.14	6.61	108.55	9.18	20.30
	7.25	7.59	10.95	18.20	13.28	12.63
	10.60	27.30	15.30	2.93	17.39	7.98
	17.35	38.54	23.99	26.28	25.60	53.99
	Erreurs moyenne	23.39	Erreurs moyenne	38.99	Erreurs moyenne	23.72

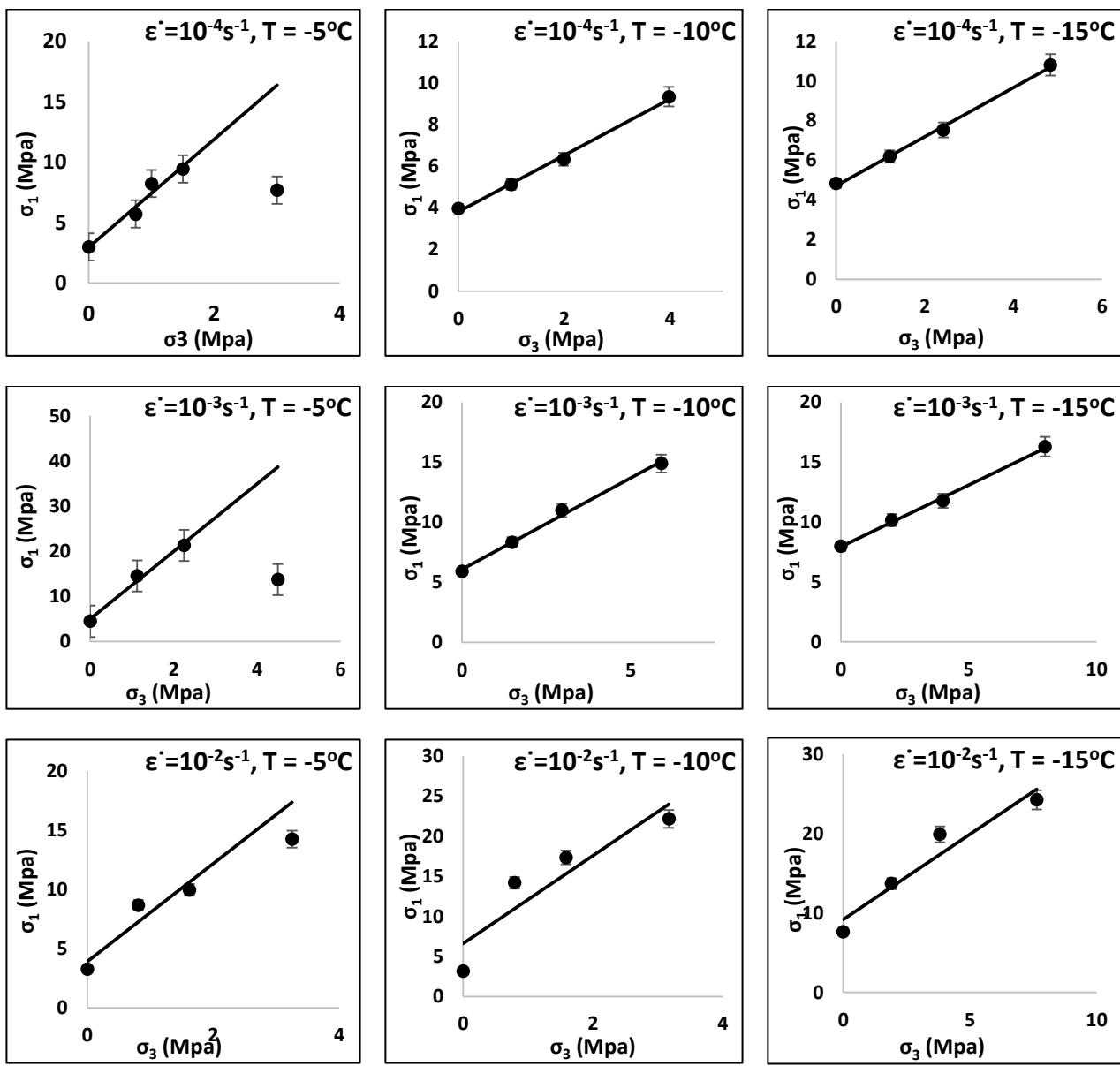


Figure 5-14 : Comparaison entre le critère de rupture de Mohr-Coulomb et les données expérimentales pour différentes conditions expérimentales

5.4.2 Critère de Hoek-Brown

De la même manière, les constantes m , s et σ_c sont identifiées à partir des données expérimentales. Les valeurs obtenues des constantes m , s et σ_c sont montrées au Tableau 5-6. La Figure 5-16 montre les courbes définissant le critère de Hoek-Brown avec les résultats expérimentaux.

Tableau 5-6 : Paramètres du critère de Hoek-Brown en fonction du taux de déformation à -5, -10 et -15°C

Taux de déformation	- 5°C			- 10°C			- 15°C		
	σ_c	m	s	σ_c	m	s	σ_c	m	s
1,00E-04	3,17	11,15	0,81	4,22	0,74	0,82	5,20	0,47	0,82
1,00E-03	4,89	30,52	0,82	6,61	1,22	0,82	8,48	0,05	0,87
1,00E-02	3,88	10,91	0,81	4,34	30,14	0,82	9,23	3,61	0,82

Le paramètre σ_c présente la résistance à la compression uniaxiale. Son évolution est fortement influencée par le taux de déformation. Le paramètre s ne varie pratiquement pas avec les taux de déformation, puisqu'il est dépendant de l'existence des fissures dans la glace, ce qui n'est pas le cas pour la présente étude (doit généralement être proche de 1). La Figure 5-15 illustre l'évolution des trois constantes en fonction des taux de déformation pour différentes températures.

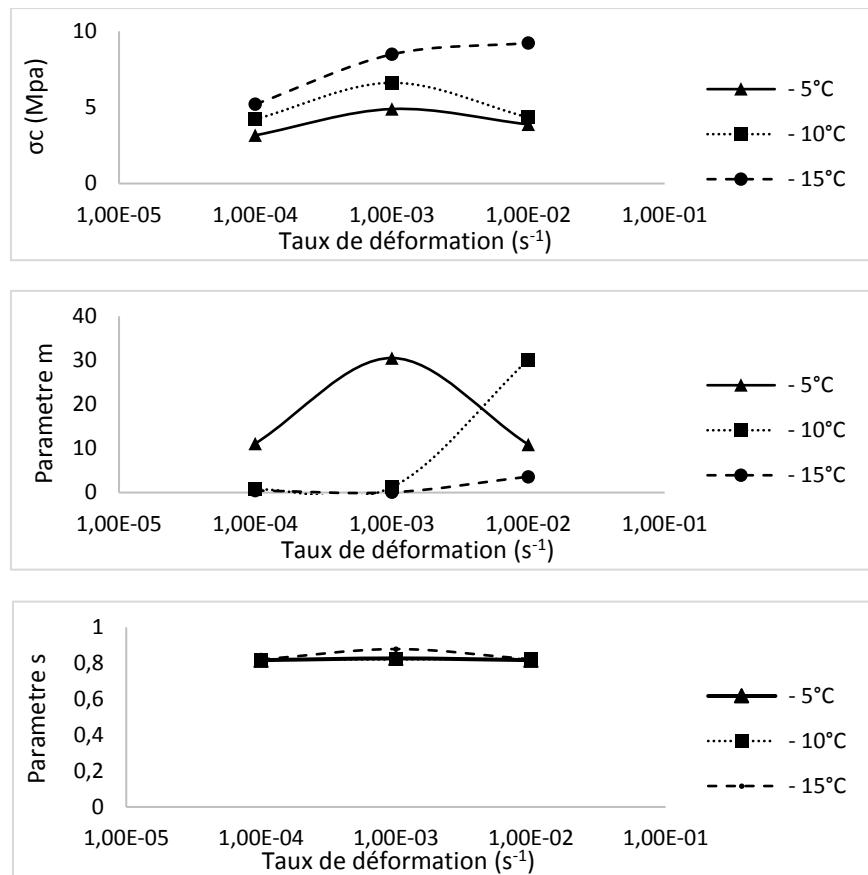


Figure 5-15 : Évolution des constantes σ_c , *m* et *s* en fonction des taux de déformation pour les trois températures -5, -10 et -15°C

L'influence de la température et du taux de déformation sur les constantes matérielles de Hoek-Brown est apparente. La constante σ_c , qui correspond à la résistance à la compression uniaxiale, croît avec la diminution de la température et fait apparaître la transition ductile fragile qui est observée à un taux de déformation de $10^{-3}s^{-1}$. Ceci rejoint les observations expérimentales illustrées à la Figure 5-9. Le paramètre *m* évolue d'une façon instable et non uniforme en fonction de la température et du taux de déformation. Quant au paramètre *s*, il reste quasiment constant et inchangé sous les différentes conditions expérimentales.

Le Tableau 5-7 résume l'ensemble des résultats obtenus par le critère de Hoek-Brown. Une comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs de résistance prédites par ce critère est également illustrée sur la Figure 5-16.

Tableau 5-7 : Valeurs de la résistance à la compression prédites par le critère de Hoek-Brown

Taux de déformation (s^{-1})	-5°C		-10°C		-15°C	
	Résistance (MPa)	erreur (%)	Résistance (MPa)	erreur (%)	Résistance (MPa)	erreur (%)
10^{-4}	2.85	4.90	3.82	3.96	4.71	2.73
	6.64	33.53	5.20	25.68	6.22	24.94
	9.32	17.38	6.55	50.69	7.72	50.98
	13.69	191.80	9.18	71.14	10.67	78.71
	Erreur moyenne	61.90	Erreur moyenne	37.87	Erreur moyenne	39.34
	4.43	1.60	5.99	1.22	7.91	0.99
10^{-3}	14.82	10.42	8.39	22.02	9.96	22.01
	21.10	10.66	10.68	32.77	12.01	54.27
	30.79	233.23	15.05	67.38	16.11	93.93
	Erreur moyenne	63.98	Erreur moyenne	30.85	Erreur moyenne	42.80
	3.49	7.45	3.93	24.06	8.36	9.54
	7.63	2.83	11.70	12.61	13.46	14.15
10^{-2}	10.61	27.34	16.51	4.71	17.86	10.90
	15.49	23.71	23.90	25.78	25.65	54.28
	Erreur moyenne	15.33	Erreur moyenne	16.79	Erreur moyenne	22.22

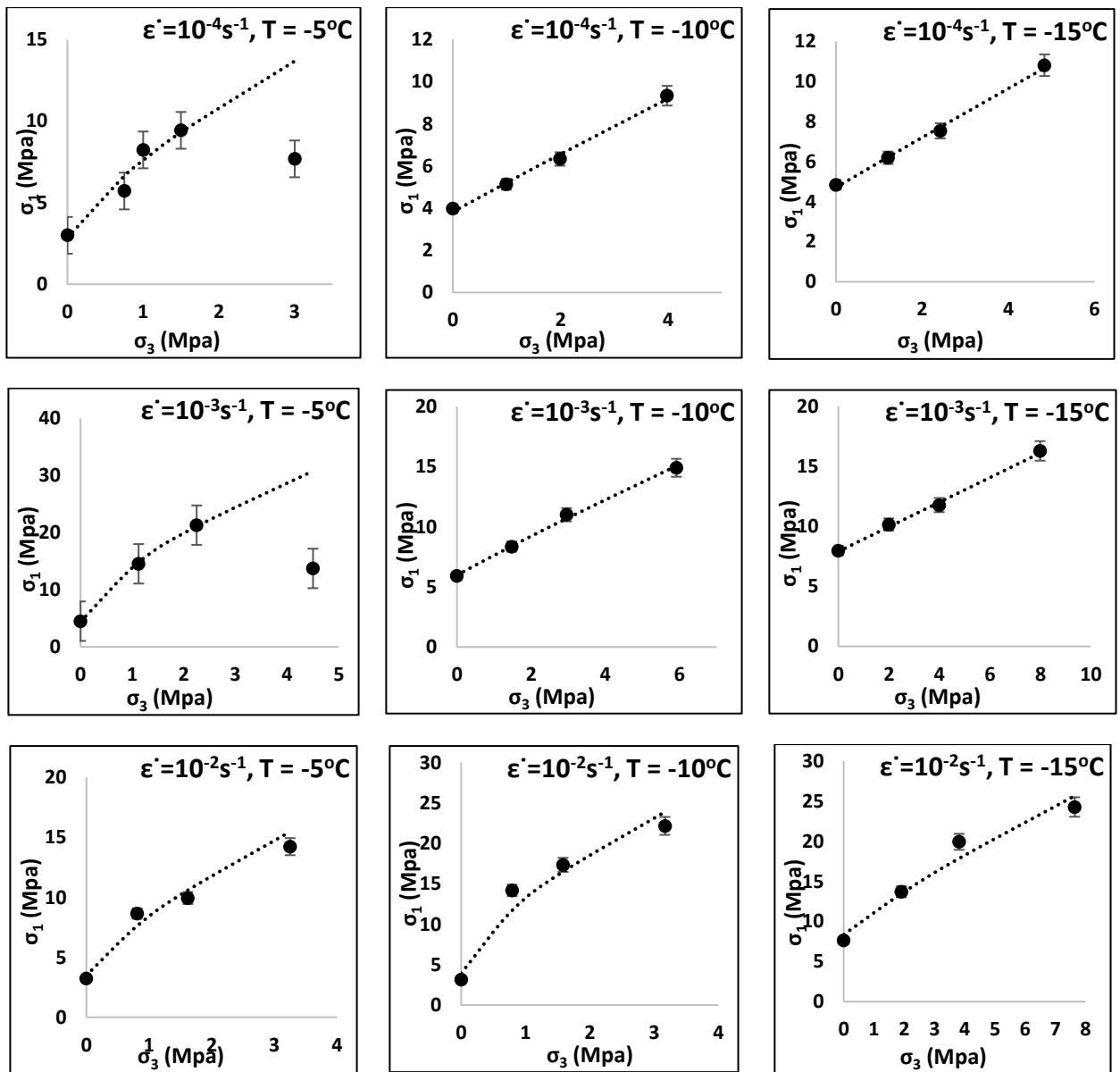


Figure 5-16 : Comparaison entre le critère de rupture de Hoek-Brown et les données expérimentales pour différentes conditions expérimentales

5.4.3 Critère de Larme

D'après les observations expérimentales (Figure 5-4), la résistance de la glace atmosphérique diminue d'une façon très apparente au-delà de certaine pression de confinement. Les modèles de Mohr-Coulomb et de Hoek-Brown ne permettent pas de déceler cette particularité. Le modèle de Larme proposé dans l'équation (5.6) montre une bonne adaptation avec ce comportement. La Figure 5-18 montre l'évolution de la courbe présentant ce critère avec les données expérimentales. Les valeurs des constantes matérielles incorporées dans le modèle de Larme sont résumées dans le Tableau 5-8.

Tableau 5-8 : Paramètres du critère de Larme en fonction du taux de déformation à -5,

-10 et -15°C

Taux de déformation	- 5°C			- 10°C			- 15°C		
	T	C	θ	T	C	θ	T	C	θ
1,00E-04	-0,12	4,55	75,59	-0,54	6,00	64,02	-7,41	130,00	8,87
1,00E-03	-0,06	6,09	82,04	-2,70	42,70	29,38	-39,40	130,00	7,23
1,00E-02	-0,18	10,36	68,01	-0,05	10,37	78,02	-0,79	24,82	59,64

Le paramètre T a été interprété comme la résistance à la traction purement biaxiale, tandis que le paramètre C a été considéré comme la résistance à la compression purement hydrostatique. D'après Nadreau et Michel [69], le point faible de ce critère est la signification physique de ces paramètres. Pour mettre en avant ces résultats, ils ont considéré que les paramètres T et C sont indépendants du taux de déformation, ce qui n'est pas le cas dans la présente étude. Par ailleurs, la dépendance du modèle sur le taux de déformation est prise en considération par le biais du demi-angle $θ$. La Figure 5-17 montre l'évolution des constantes T , C et $θ$ en fonction du taux de déformation.

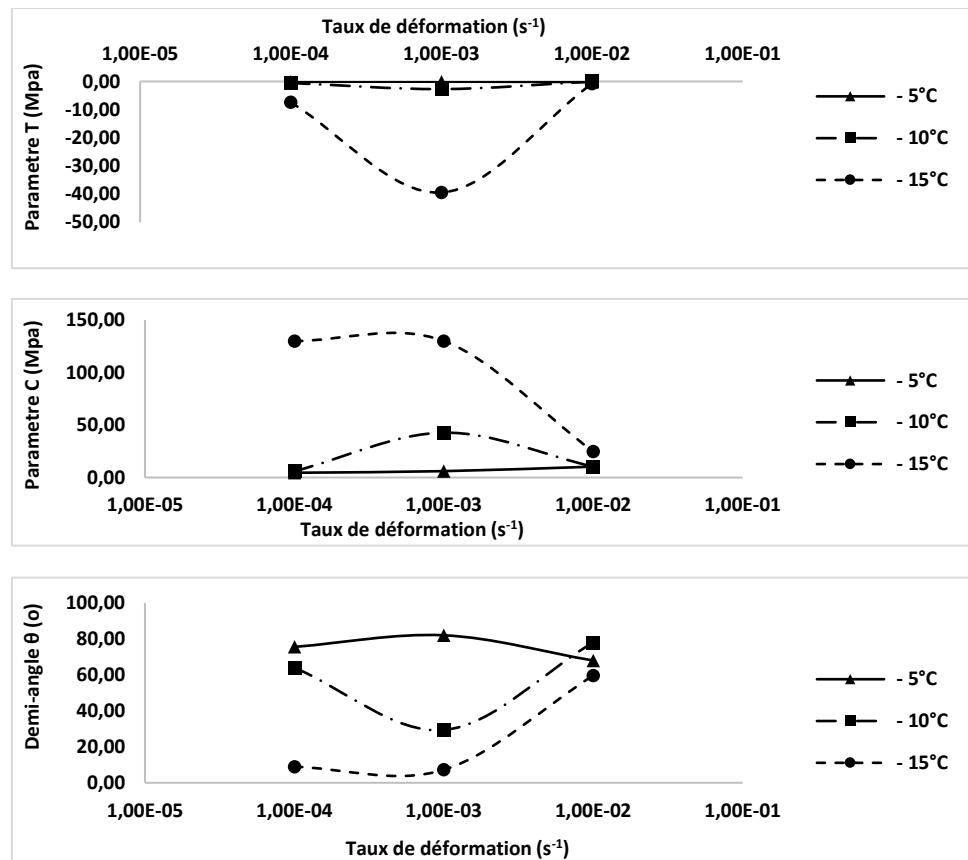


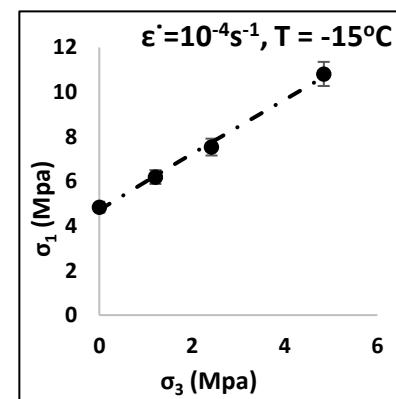
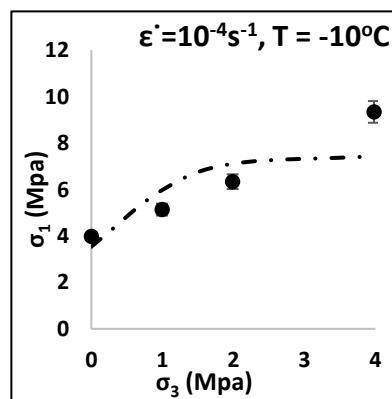
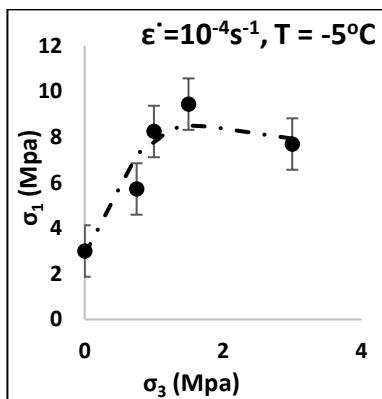
Figure 5-17 : Évolution des constantes T, C et θ en fonction des taux de déformation pour les trois températures -5, -10 et -15°C

Le paramètre T montre une évolution significative en fonction de la température et fait apparaître également la transition ductile-fragile à un taux de déformation de 10^{-3}s^{-1} . Le paramètre C est influencé par la température et son allure montre également une sensibilité aux taux de déformation. L'évolution du demi-angle θ est influencée par la température et le taux de déformation.

Le Tableau 5-9 résume l'ensemble des résultats obtenus par le critère de Larme. Une comparaison entre les résultats expérimentaux et le critère de Mohr-Coulomb est illustrée à la Figure 5-18.

Tableau 5-9 : Valeurs de la résistance à la compression prédictes par le critère de Larme

Taux de déformation (s^{-1})	-5°C		-10°C		-15°C	
	Résistance (MPa)	erreur (%)	Résistance (MPa)	erreur (%)	Résistance (MPa)	erreur (%)
10^{-4}	2.84	5.38	3.54	11.08	4.71	2.68
	7.13	43.53	5.97	44.22	6.24	25.36
	8.49	6.94	7.11	63.48	7.75	51.48
	7.93	69.10	7.43	38.48	10.67	78.72
	Erreurs moyennes	31.24	Erreurs moyennes	39.32	Erreurs moyennes	39.56
10^{-3}	4.30	4.40	5.86	0.86	7.95	0.44
	16.71	24.53	8.52	23.92	10.02	22.80
	19.08	0.06	10.86	34.93	12.09	55.23
	14.29	54.67	14.93	66.07	16.18	94.73
	Erreurs moyennes	20.91	Erreurs moyennes	31.44	Erreurs moyennes	43.30
10^{-2}	3.35	3.16	3.39	6.86	7.44	2.46
	8.06	2.65	13.62	1.73	14.61	23.86
	10.56	26.82	17.98	14.07	19.03	18.16
	13.29	6.18	22.03	15.94	24.47	47.16
	Erreurs moyennes	9.70	Erreurs moyennes	9.65	Erreurs moyennes	22.91



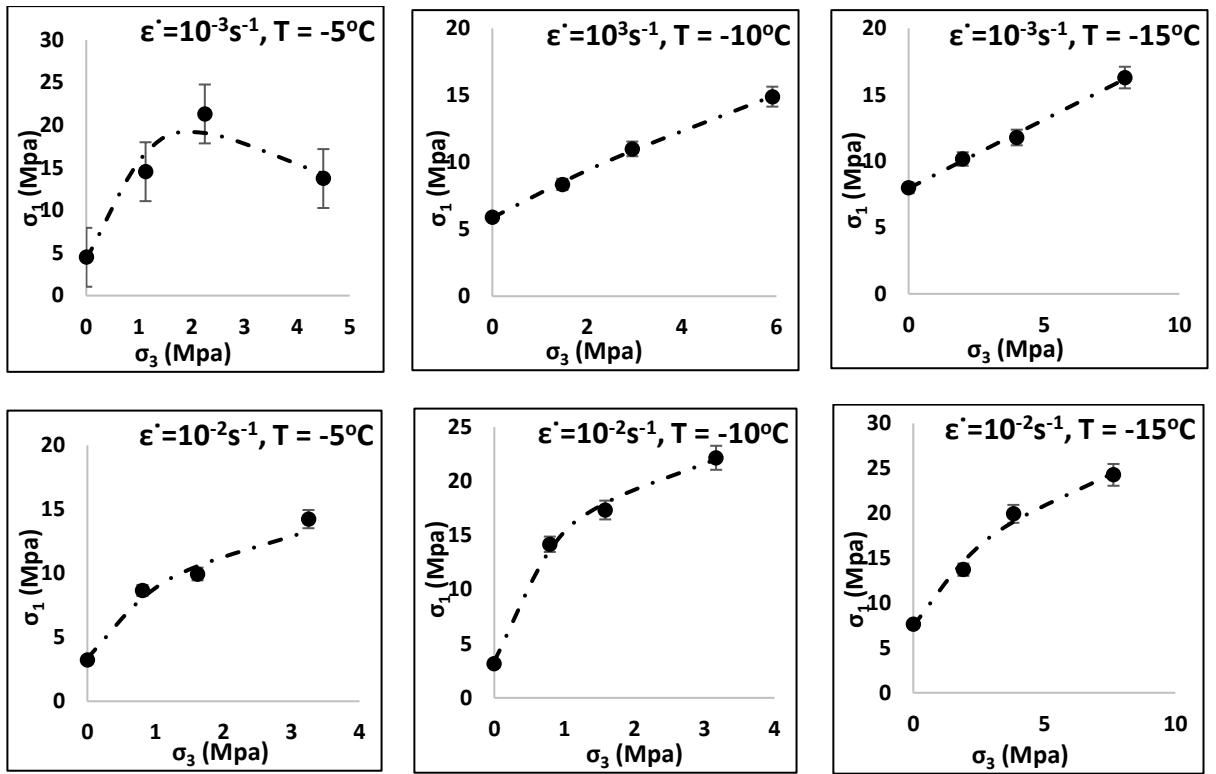


Figure 5-18 : Comparaison entre le critère de rupture de Larme et les données expérimentales pour différentes conditions expérimentales

5.4.4 Discussion

Généralement, les trois critères de rupture investiguerés prédisent bien le comportement fragile de la glace atmosphérique. Au voisinage du point de fusion (température de -5°C), la résistance de la glace atmosphérique croît avec l'augmentation du confinement jusqu'à un maximum, puis décroît d'une façon significative. Les deux critères de Mohr-Coulomb et de Hoek-Brown ne permettent pas de représenter cette spécificité, tandis que le critère de Larme reste capable de prédire cette décroissance. Cependant, la signification physique des constantes matérielles incorporées dans ce critère reste non réaliste.

Dans les conditions de givrage atmosphérique, la glace subit des contraintes de confinement qui sont inférieures à la résistance à la compression uniaxiale. Cette condition

est suggestive du critère de Hoek-Brown, puisque c'est le critère qui reste le plus réaliste dans la représentation de la rupture de la glace atmosphérique à faibles contraintes de confinement.

5.5 Validation du comportement et modélisation par éléments finis

5.5.1 Implémentation et calibration du critère de Mohr-Coulomb

Après les avoir identifiés, les paramètres du critère de Mohr-Coulomb servent comme données d'entrée pour le modèle à éléments finis. À cette fin, le code commercial Abaqus a été utilisé afin de reproduire le comportement en compression uniaxiale de la glace atmosphérique. La Figure 5-19 montre l'algorithme employé pour la modélisation du comportement mécanique de la glace atmosphérique.

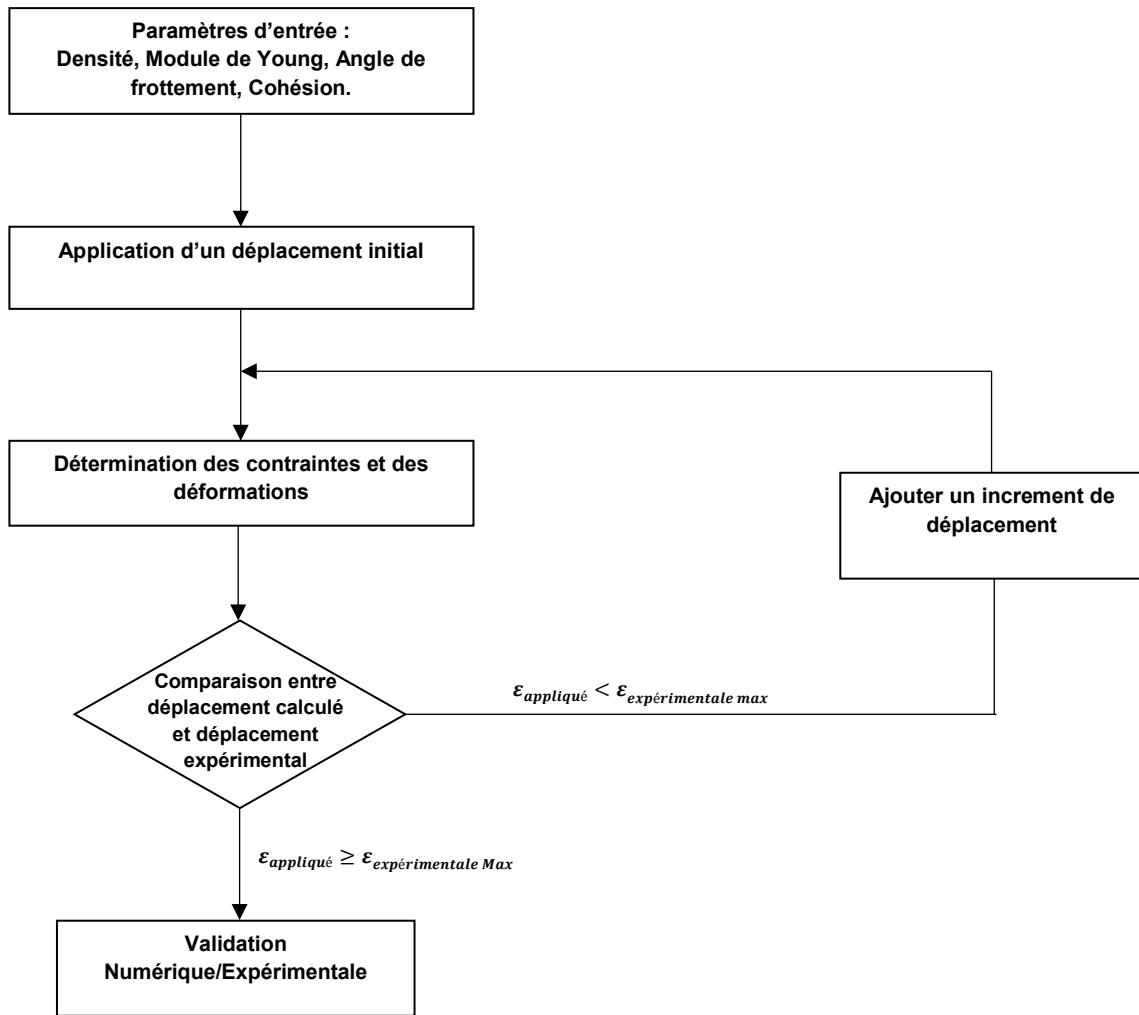


Figure 5-19 : Algorithme utilisé pour l'identification des constantes de Mohr-Coulomb

Le modèle à éléments finis utilisé dans la présente étude exploite la symétrie de révolution des échantillons de la glace et permet de modéliser le comportement en mode 2D. L'échantillon a été maillé avec 250 éléments de type CPE4R, la simulation a été réalisée en mode dynamique explicite dans le but d'introduire l'effet de la vitesse de déformation dans le comportement de la glace. La Figure 5-20 montre les conditions aux limites ainsi que le type d'éléments utilisés pour le modèle à éléments finis.

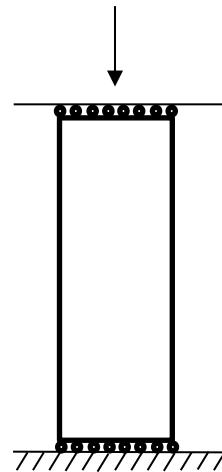


Figure 5-20 : Conditions aux limites et type d'éléments utilisés pour le modèle éléments finis

L'élasticité de la glace a été prise en considération par le biais du module de Young expérimental. Néanmoins, les mesures expérimentales effectuées dans la présente étude ne permettent pas d'avoir une valeur fixe et fiable du module de Young de la glace atmosphérique. Ceci peut être associé à plusieurs sources d'erreurs comme la manipulation expérimentale, la nature des imperfections dans les échantillons, etc. Eskandarian [9] a utilisé la technique de Hill pour calculer le module de Young de la glace atmosphérique à différentes températures. Les valeurs données par Eskandarian ont été calculées sur la base de la relation suivante :

$$E = 9.363(1 - 1.471 \times 10^{-3}\theta) \quad (5.7)$$

θ étant la température en $^{\circ}\text{C}$. Par exemple, le module de Young à -5°C est de 9.43Gpa. Cette valeur a été remplacée par 5Gpa, qui est la valeur du module de Young expérimentale obtenu avec les résultats des essais de compression uniaxiale. La raison était de comparer la courbe expérimentale avec celle fournie par le code éléments finis.

5.5.2 Validation et comparaison avec les résultats expérimentaux

Selon le critère de Mohr-Coulomb (équation 5.2), la rupture par cisaillement dans un essai de compression simple survient selon un axe orienté de $\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2}$. La Figure 5-21 (a) montre l'évolution d'une fissure selon cet axe, tandis que la Figure 5-21 (b) montre la concentration des déformations plastiques dans le modèle numérique.

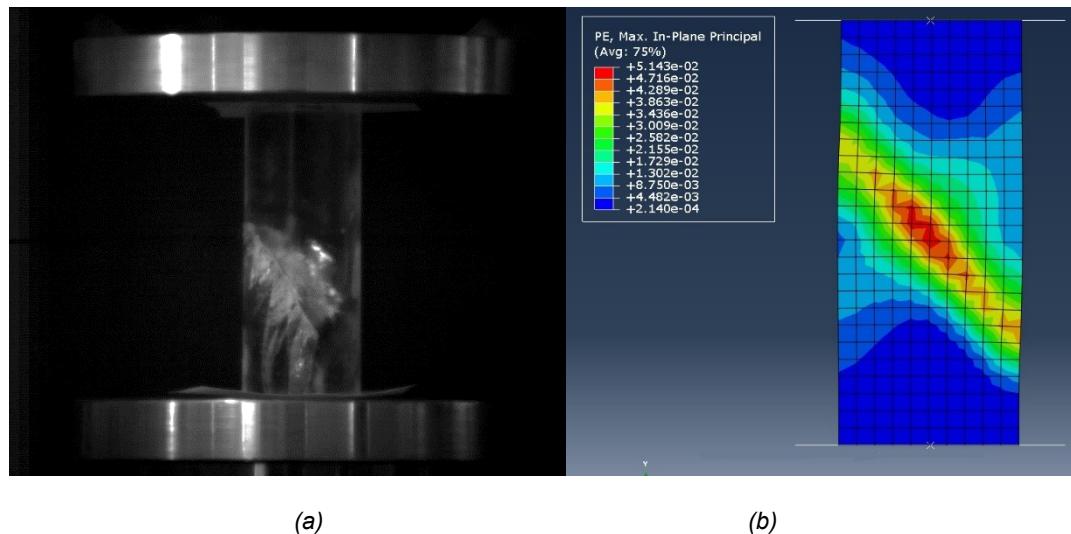


Figure 5-21 : Comparaison entre l'image d'une fissure dans une éprouvette en compression simple et la concentration des déformations plastiques dans le modèle éléments finis

La courbe contraintes-déformations a été tracée pour un taux de déformation de 10^{-4}s^{-1} à -5°C . Les résultats générés par le modèle éléments finis comparés avec les données expérimentales, ainsi que l'écart entre les deux résultats sont présentés dans le . La courbe prédite par le modèle à éléments finis est tracée également à la Figure 5-22 pour des raisons comparatives.

Tableau 5-10 : Résultats numériques comparés avec les résultats expérimentaux

Mesures expérimentales		Résultats du modèle éléments finis		Écart entre les données expérimentales et le modèle numérique (Pa)
Déformations	Contraintes (Pa)	Déformations	Contraintes (Pa)	0
0	0	0	0	0
0.002897	1048972	0.006334	2855640	1806668
0.005911	2303564	0.024423	2868920	565356.1
0.009397	2899520	0.063324	2825550	73969.89
0.012895	3045338	0.093838	2796660	248677.9
0.016391	2979425	0.120796	2770830	208594.6
0.019892	2840449	0.146818	2734020	106428.8
0.023398	2708869	0.17213	2698880	9989.425
2.69E-02	2601182	0.197362	2662720	61538.44
3.04E-02	2542155	0.222278	2639770	97615.36
3.39E-02	2456388	0.2469	2606500	150112.1
3.74E-02	2368804	0.270949	2576200	207396.2
4.09E-02	2322404	0.294555	2545120	222715.8
4.44E-02	2264318	0.317998	2509110	244792.1
4.79E-02	2248428	0.341353	2478690	230262.2
5.14E-02	2242131	0.364267	2435820	193688.5
5.49E-02	2228760	0.387207	2402470	173710.2
5.84E-02	2224318	0.409662	2367430	143112.4
6.19E-02	2211630	0.431633	2327230	115600
6.54E-02	2177027	0.453014	2291470	114442.6
6.89E-02	2187437	0.473823	2245600	58162.82

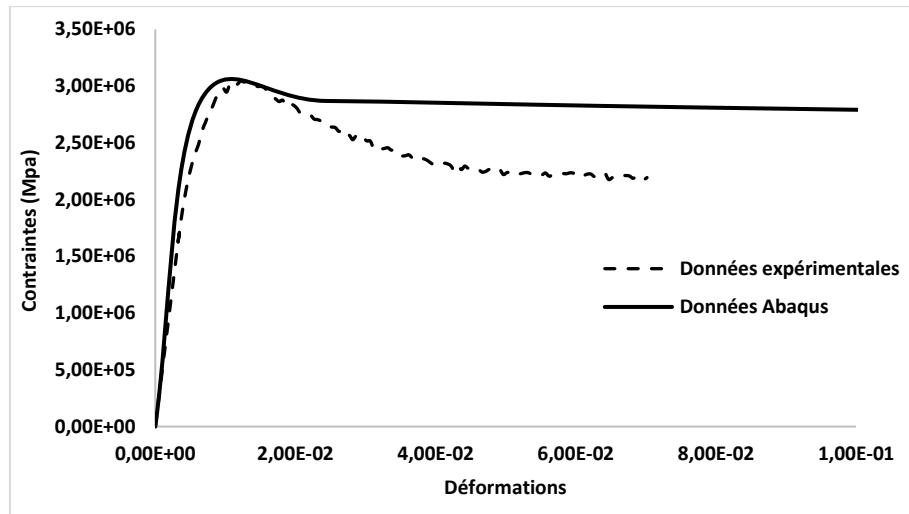


Figure 5-22 : Comparaison entre la courbe contrainte déformation expérimentale et celle donnée par le modèle éléments finis pour un taux de déformation de $10^{-4}s^{-1}$

D'après la Figure 5-22, la prédiction du seuil de plasticité par le critère de Mohr-Coulomb est très acceptable, ce qui montre la bonne validité de ce critère pour représenter la rupture de la glace atmosphérique. L'écrouissage (le durcissement) de la glace n'a pas été pris en considération lors de l'implémentation du critère de Mohr-Coulomb. Cela justifie la grande marge entre les résultats expérimentaux et ceux prédits par le modèle à éléments finis.

Chapitre 6

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusions

Les recherches entretenues dans le cadre de la présente thèse ont permis de caractériser le comportement fragile de la glace atmosphérique, et ce dans le but de contribuer à la compréhension du phénomène du délestage par bris mécanique et de ces mécanismes, ainsi que de modéliser la rupture de la glace atmosphérique en proposant des critères de rupture convenables. La revue de littérature élaborée, les études expérimentales ainsi que l'analyse des différentes données ont permis de révéler plusieurs points saillants, dont on cite.

Comportement mécanique de la glace atmosphérique

- Le comportement de la glace atmosphérique est fortement influencé par la température, le Taux de déformation et la porosité; la résistance à la compression de la glace atmosphérique croît d'une façon significative avec la croissance du Taux de déformation en passant par un maximum. Cette valeur maximale caractérise la zone de transition ductile-fragile de la glace, et est généralement située entre 10^{-4} et 10^{-3} s^{-1} . Pour les températures testées, la résistance à la compression de la glace atmosphérique augmente lorsque la température de formation diminue, ceci jusqu'à -15 °C, puis elle diminue avec la diminution de la température à -20°C. La résistance

à la compression croît avec la croissance de la porosité jusqu'à atteindre une valeur maximale pour une porosité de 1%, au-delà de laquelle une décroissance est observée.

- La résistance de la glace atmosphérique dépend fortement du confinement. Pour une température donnée, et pour un taux de déformation donné, l'augmentation du confinement permet à la résistance de la glace atmosphérique d'augmenter. Cependant, pour une température de -5°C, même sous confinement, la transition ductile-fragile de la glace atmosphérique est toujours observée à un taux de déformation de 10^{-3}s^{-1} , tandis qu'on remarque l'absence de cette transition pour des températures plus froides de -10 et -15°C.

Critère de rupture empirique pour la glace atmosphérique

- Le critère de rupture empirique uniaxial proposé se base sur les observations expérimentales. Le critère permet de présenter le comportement fragile de la glace atmosphérique en compression et en traction uniaxiale, sous différentes conditions.
- L'analyse de sensibilité des paramètres du critère de rupture a permis de comprendre leur évolution en fonction des différentes variables telles que la température.
- L'intégration de l'effet de la température sur le critère de rupture a été réalisée par une fonction *shift* de type WLF.

Critères de rupture pour la glace atmosphérique sous chargement triaxial:

- Les trois critères de rupture de Mohr-Coulomb, Hoek-Brown et de Larme sont considérés pour la glace atmosphérique, afin de prévoir la rupture de celle-ci sous des contraintes triaxiales. Les résultats des tests triaxiaux ont été utilisés pour identifier les constantes matérielles incorporées dans ces critères de rupture.

- Les trois critères de rupture investigués prédisent bien le comportement fragile de la glace atmosphérique. Au voisinage du point de fusion (température de -5°C), la résistance de la glace atmosphérique croît avec l'augmentation du confinement jusqu'à un maximum, puis décroît d'une façon significative. Les deux critères de Mohr-Coulomb et de Hoek-Brown ne permettent pas de représenter cette spécificité, tandis que le critère de Larme reste capable de prédire cette décroissance. La signification physique des constantes matérielles incorporées dans ce critère reste cependant non réaliste.

Modélisation de la rupture de la glace atmosphérique :

- Le modèle neuronal proposé pour représenter la rupture de la glace atmosphérique sous chargement uniaxial montre une bonne capacité de prédiction, avec un taux d'erreur très acceptable. Les valeurs estimées par le modèle neuronal montrent une bonne concordance avec l'expérimental, avec une erreur relative de 1,71, 5,37 et 0,22 % pour les températures -20, -15, et -5 °C respectivement.
- Un modèle à éléments finis a été appliqué afin de valider le critère de rupture de Mohr-Coulomb. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance avec l'expérimental.

6.2 Recommandations

La revue de littérature présentée ainsi que les questions abordées dans ce travail montrent que la problématique de délestage de glace sur les réseaux électriques est un champ de recherche très prometteur et demeure peu étudiée. Les perspectives et les recommandations sont très nombreuses. Cependant, nous nous baserons sur les résultats obtenus dans cette thèse pour faire part de nos recommandations pour les futurs travaux de recherche.

- La porosité a une grande influence sur le comportement de la glace atmosphérique. L'étude de son effet sur les paramètres des critères de rupture sera d'une grande importance pour perfectionner les critères de rupture présentés.
- Les conditions d'accrétion affectent considérablement la taille et la forme des grains de la glace, la prise en considération de la variation de certains paramètres comme la vitesse du vent, l'humidité, etc. Tous ces éléments seront d'une grande utilité dans la justification de certaines observations expérimentales.
- La prise en considération de l'anisotropie de certains types de glace permettra de développer les critères de rupture pour ce type de glace, en s'inspirant du présent travail.
- Le courant électrique sur les conducteurs influence d'une façon directe la densité et la structure granulaire de la glace atmosphérique. La prise en considération de la présence du courant électrique dans les critères de rupture proposés sera d'une grande utilité pour le problème de délestage sur les conducteurs.
- L'étude expérimentale présentée dans la présente thèse sur le comportement de la glace atmosphérique sous des contraintes triaxiales est considérée comme pionnière. Une étude plus approfondie de ce type de chargement permettra de mieux comprendre certaines observations expérimentales ainsi que le perfectionnement des critères de rupture présentés.

- Le modèle neuronal présenté reste une originalité spécifique à la présente investigation, l'alimentation du modèle par d'autres données expérimentales ou des mesures *in situ* permettra au modèle de mieux prédire le comportement fragile de la glace atmosphérique dans les conditions de délestage par bris mécanique.
- L'implémentation des deux critères de rupture de Hoek-Brown et de Larme aura une grande utilité dans les problèmes de modélisation liés à la présence de la glace atmosphérique sur les structures.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] M. Farzaneh, Ed., *Atmospheric Icing of Power Networks*. Springer Science & Business Media, Berlin, 381p, 2008.
- [2] Y. Sakamoto, "Snow accretion on overhead wires," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 358, pp. 2941–2970, 2000.
- [3] M. Farzaneh, "Ice accretions on high-voltage conductors and insulators and related phenomena," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 358, no. 1776, pp. 2971–3005, Nov. 2000.
- [4] M. Farzaneh and W.A. Chisholm, "Insulators for icing and polluted environments", IEEE Press series on Power Engineering, IEEE/John Wiley, New York, 680 p, 2009.
- [5] M. Farzaneh and J.-L. Laforte, "Ice Accretion On Conductors Energized By Ac Or Dc:A Laboratory Investigation Of Ice Treeing," *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, vol. 4, no. 1. International Society of Offshore and Polar Engineers, 01-Mar-1994.
- [6] M. Farzaneh and O. T. Melo, "Flashover Performance of Insulators in the Presence of Short Icicles," *Int. J. Offshore Polar Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 112–118, 1994.
- [7] S. Bernardin, "Étude et analyse du délestage de glace atmosphérique sur les câbles," Université du Québec à Chicoutimi, Mémoire de maîtrise, 1989.
- [8] A. Bouamoul, "Etude expérimentale et théorique sur le processus de délestage par fonte de la glace accumulée autour d'un cylindre," Université du Québec à Chicoutimi, Thèse de doctorat, 2002.
- [9] M. Eskandarian, "Ice shedding from overhead electrical lines by mechanical breaking," Université du Québec à Chicoutimi, Thèse de doctorat, 2005.
- [10] M. Kermani, "Ice shedding from cables and conductors – a cracking model of atmospheric ice," Université du Québec à Chicoutimi, Thèse de doctorat, 2007.

- [11] P. V. Hobbs, *Ice Physics*. Oxford University Press, 2010.
- [12] E. M. Schulson, "The structure and mechanical behavior of ice," *Jom*, vol. 51, no. 2, pp. 21–27, Feb. 1999.
- [13] W. H. Barnes, "The Crystal Structure of Ice between 0 degrees C. and - 183 degrees C," *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 125, no. 799, pp. 670–693, Nov. 1929.
- [14] B. Michel and R. O. Ramseier, "Classification of river and lake ice," *Canadian Geotechnical Journal*. Vol 8, 36, 1971.
- [15] B. Michel, *Ice mechanics*. Presses de l'université Laval, 1978.
- [16] G. Poots, *Ice and Snow Accretion on Structures*. Research Studies Press, 1996.
- [17] J. M. Thériault, R. E. Stewart, J. a. Milbrandt, and M. K. Yau, "On the simulation of winter precipitation types," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 111, no. 18, pp. 1–11, 2006.
- [18] ISO, "ISO 12494:2001 - Atmospheric icing of structures," 2013.
- [19] M. H. Foder, "ISO 12494 ' Atmospheric Icing of Structures ' and How to Use It," vol. I, pp. 678–685, 2001.
- [20] M. Kermani, M. Farzaneh, and L. E. Kollar, "Estimation of stresses in atmospheric ice during galloping of power transmission lines," in *12th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAS*, 2007, p. Paper 5-2.
- [21] M. Kermani, M. Farzaneh, and L. E. Kollar, "The effects of wind induced conductor motion on accreted atmospheric ice," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 2, pp. 540–548, 2013.
- [22] M. Farzaneh, Ed., *Atmospheric Icing of Power Networks*. Springer Science & Business Media, Berlin, 381p, 2008.
- [23] C. Rawlins, A. Hard, R. Ikegami, and E. Doocy, *Transmission Line Reference Book – Wind-Induced Conductor Motion*, Electric P. Palo Alto, California, 1979.
- [24] CIGRE Working Group 01, "Report on Aeolian Vibration, ELECTRA, NO. 124," 1978.
- [25] CIGRE Working Group 11, "Modelling of Aeolian vibration of single conductors: Assessment of the technology, ELECTRA, NO.181," 1998.
- [26] M. Abdel-Rohman and B. F. Spencer, "Control of Wind-Induced Nonlinear Oscillations in Suspended Cables," *Nonlinear Dyn.*, vol. 37, no. 4, pp. 341–355, Sep. 2004.

- [27] H. M. Irvine and T. K. Caughey, "The Linear Theory of Free Vibrations of a Suspended Cable," *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 341, no. 1626, pp. 299–315, Dec. 1974.
- [28] E. Doocy and A. Hard, *Transition Line reference Book Wind-induced conductor motion*. Palo Alto, California.: Institute, Electric Power Research, 1979.
- [29] M. Kazakevich, I. Grafkiy, and A. Vasilenko, "Interaction of wind with the ice-covered structural elements," in *International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, 1998, pp. 299–302.
- [30] M. Kermani and M. Farzaneh, "Study of Influencing Factors on Ice Shedding from Power Transmission Lines," in *international workshop on Atmospheric icing of structures; IWAS*, 2009.
- [31] P. Zsolt, "Modelling and simulation of the ice melting process on a current-carrying conductor," Université du Québec à Chicoutimi, Thèse de doctorat, 2006.
- [32] D. Kuroiwa, *Monograph series, Volume 6*. 1958.
- [33] N. K. Sinha, "Elasticity of natural types of polycrystalline ice," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 127–135, Dec. 1989.
- [34] A. Derradji-Aouat, *Experimental study of the behaviour of columnar grained ice subjected to cyclic loading*. St. John's Newfoundland: National Research Council Institute for Marine Dynamics, 1993.
- [35] 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.
- [36] R. J. Scavuzzo, M. L. Chu, and V. Ananthaswamy, "Influence of aerodynamic forces in ice shedding," *J. Aircr.*, vol. 31, no. 3, pp. 526–530, May 1994.
- [37] L. E. Kollar and M. Farzaneh, "Modeling Sudden Ice Shedding From Conductor Bundles," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 2, pp. 604–611, Apr. 2013.
- [38] M. Aberkane, "Implémentation numérique et calibrage d'un modèle d'endommagement ductile pour la glace atmosphérique," Université du Québec à Chicoutimi, Mémoire de maîtrise, 2012.

- [39] V. P. Singh, P. Singh, and U. Haritashya, *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [40] G. Lambrinos, J. Aguirre-Puente, and M. Sakly, "Experimental research on the sublimation of ice samples," *Ann. Geophys. Ser. B. Terr. Planet. Phys.*, vol. 5, no. 6, pp. 589–593, 1987.
- [41] J. Druez and P. McComber, "Ice Accretion and Shedding on Overhead Line Cables," in *Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, 1997, vol. 2, pp. 647–655.
- [42] E. M. Schulson, "Brittle failure of ice," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 68, no. 17–18, pp. 1839–1887, Dec. 2001.
- [43] H. . Frost, "Mechanisms of crack nucleation in ice," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 68, no. 17–18, pp. 1823–1837, Dec. 2001.
- [44] D. M. Cole, "Crack nucleation in polycrystalline ice," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 79–87, 1988.
- [45] A. N. Stroh, "A theory of the fracture of metals," *Adv. Phys.*, vol. 6, no. 24, pp. 418–465, Oct. 1957.
- [46] E. M. Schulson, "An analysis of the brittle to ductile transition in polycrystalline ice under tension," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 87–91, Nov. 1979.
- [47] D. M. Cole, "Effect of grain size on the internal fracturing of polycrystalline ice," *Crrel Cr 86-05*, no. 86, p. 71, 1986.
- [48] E. Smith and J. T. Barnby, "Crack Nucleation in Crystalline Solids," *Met. Sci. J.*, vol. 1, no. 1, pp. 56–64, Jan. 1967.
- [49] 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.
- [50] N. K. Sinha, "Delayed Elastic Strain Criterion for First Cracks in Ice," in *IUTAM symposium*, 1982, pp. 323–330.
- [51] N. K. Sinha, P. Ehrhart, H. D. Carstanjen, A. M. Fattah, and J. B. Roberto, "Grain boundary sliding in polycrystalline materials," *Philos. Mag. A*, vol. 40, no. 6, pp. 825–842, Dec. 1979.
- [52] J. Weertman, *Dislocation Based Fracture Mechanics*. World Scientific, 1996.

- [53] N. K. Sinha, P. Ehrhart, H. D. Carstanjen, A. M. Fattah, and J. B. Roberto, "Grain boundary sliding in polycrystalline materials," *Philos. Mag. A*, vol. 40, no. 6, pp. 825–842, Dec. 1979.
- [54] R. M. Christensen, *The Theory of Materials Failure*. OUP Oxford, 2013.
- [55] R. Hill, *The Mathematical Theory of Plasticity*. Clarendon Press, 1998.
- [56] K. Sinha, "Rheology of Columnar-grained Ice," *Exp. Mech.* 18, pp. 464–470, 1978.
- [57] M. F. Ashby and P. Duval, "The creep of polycrystalline ice," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 3, pp. 285–300, Nov. 1985.
- [58] M. Mellor, "Mechanical Properties of Polycrystalline Ice," in *Physics and Mechanics of Ice, IUTAM Symposium*, 1980, pp. 217–245.
- [59] H. Hamza, "Critical strain energy as a failure and crack propagation criterion for ice," in *Proc. IAHR Int. Symp. on Ice Problems*, 1984.
- [60] D. Cole, "Strain energy failure criterion for S2 fresh water ice in flexure," in *Proc. IAHR Int. Symp. on Ice Problems Vol. 1*, 1988, pp. 206–215.
- [61] A. K. Singh, *Mechanics of solids*, Prentice-H. New Delhi, 2007.
- [62] A. M. Fish and Y. K. Zaretsky, "Strength And Creep of Ice In Terms of Mohr-Coulomb Fracture Theory," *The Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 01-Jan-1998.
- [63] J. C. Jaeger, N. G. W. Cook, and R. Zimmerman, *Fundamentals of Rock Mechanics*. John Wiley & Sons, 2009.
- [64] E. Hoek, C. Carranza-torres and B. Corkum, "Hoek-brown failure criterion – 2002 edition," Proceedings of the North American rock mechanics Symposium, Toronto, 2002.
- [65] E. Hoek, "Uniaxial compressive strength versus Global strength in the Hoek- Brown criterion," pp. 1–5, 2005.
- [66] A. Derradji-Aouat, "Mathematical modelling of monotonic and cyclic behaviour of polycrystalline fresh water ice," University of Ottawa, Thèse de doctorat, 1992.
- [67] A. M. Fish, "Creep and yield model of ice under combined stress," 1991.
- [68] S. J. Jones, "Triaxial testing of polycrystalline ice," in *Third International Conference on Permafrost*, 1978, pp. 670–674.

- [69] J.-P. Nadreau and B. Michel, "Yield and failure envelope for ice under multiaxial compressive stresses," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 75–82, Oct. 1986.
- [70] A. M. Fish and Y. K. Zaretsky, "Ice strength as a function of hydrostatic pressure and temperature," *US Army CRREL Rep. 97-6*, p. 23, 1997.
- [71] E. M. Schulson and S. E. Buck, "The ductile-to-brittle transition and ductile failure envelopes of orthotropic ice under biaxial compression," *Acta Metall. Mater.*, vol. 43, no. 10, pp. 3661–3668, 1995.
- [72] E. M. Schulson, D. Iliescu, and C. E. Renshaw, "On the initiation of shear faults during brittle compressive failure: A new mechanism," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 104, no. B1, pp. 695–705, Jan. 1999.
- [73] H. Farid, M. Farzaneh, A. Saeidi, and F. Erchiqui, "A contribution to the study of the compressive behavior of atmospheric ice," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 121, pp. 60–65, Jan. 2016.
- [74] A. Derradji-Aouat, "Mathematical modelling of monotonic and cyclic behaviour of polycrystalline fresh water ice," University of Ottawa, Thèse de doctorat, 1992.
- [75] J. Schwarz, R. Frederking, V. Gavrillo, I. G. Petrov, K.-I. Hirayama, M. Mellor, P. Tryde, and K. D. Vaudrey, "Standardized testing methods for measuring mechanical properties of ice," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 245–253, Jul. 1981.
- [76] ASTM, "ASTM D4543 - 01 Standard Practices for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances," 2008.
- [77] ASTM, "ASTM D 2664-95a Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undrained Rock Core Specimens Without Pore Pressure Measurements," 1995.
- [78] ASTM, "ASTM D2938 - 95(2002) Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens (Withdrawn 2005)," 2005.
- [79] R. A. Batto and E. M. Schulson, "On the ductile-to-brittle transition in ice under compression," *Acta Metall. Mater.*, vol. 41, no. 7, pp. 2219–2225, Jul. 1993.
- [80] N. Sinha, "Constant strain-and stress-rate compressive strength of columnar-grained ice," *J. Mater. Sci.*, 1982.

- [81] M. Kermani, M. Farzaneh, and R. Gagnon, “Bending strength and effective modulus of atmospheric ice,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 2, pp. 162–169, Jul. 2008.
- [82] M. Arakawa and N. Maeno, “Mechanical strength of polycrystalline ice under uniaxial compression,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 3, pp. 215–229, Dec. 1997.
- [83] E. . Schulson, “The brittle compressive fracture of ice,” *Acta Metall. Mater.*, vol. 38, no. 10, pp. 1963–1976, Oct. 1990.
- [84] 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.
- [85] Environnement Canada, “Environnement Canada,” 2015.
- [86] F. D. Haynes, “Effect of temperature on the strength of snow-ice.,” *CRREL Rep.*, no. 78–27. 1978.
- [87] M. L. Williams, R. F. Landel, and J. D. Ferry, “The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 77, no. 14, pp. 3701–3707, 1955.
- [88] 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.
- [89] S. S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Macmillan, 1994.
- [90] H. Farid, M. Farzaneh, A. Saeidi, and F. Erchiqui, “Neural network approach to characterize the atmospheric ice compressive strength,” in *The 16th International Workshop on Atmospheric Icing of structures*, 2015, pp. 87–94.
- [91] F. Erchiqui, “Neuronal Networks Approach for Characterization of Softened Polymers,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 25, pp. 463–473, 2006.
- [92] M. A. Rist and S. A. F. Murrell, “Ice triaxial deformation and fracture,” *J. Glac.*, vol. 44, no. 135, pp. 305–318, 1994.
- [93] R. E. Gagnon and P. H. Gammon, “Triaxial experiments on iceberg and glacier ice,” *J. Glaciol.*, no. 139, 1995.
- [94] S. J. Jones, “The confined compressive strength of polycrystalline ice.,” *Journal of Glaciology*, vol. 28, no. 98. pp. 171–177, 1982.

- [95] V. R. Parameswaran and S. J. Jones, "Triaxial testing of frozen sand.," *Journal of Glaciology*, vol. 27, no. 95, pp. 147–155, 1981.
- [96] P. M. Melanson, I. L. Meglis, I. J. Jordaan, and B. M. Stone, "Microstructural change in ice: I. Constant-deformation-rate tests under triaxial stress conditions," *J. Glaciol.*, vol. 45, no. 151, pp. 417–437, 1999.
- [97] I. L. Meglis, P. M. Melanson, and I. J. Jordaan, "Microstructural change in ice: II. Creep behavior under triaxial stress conditions," *J. Glaciol.*, vol. 45, no. 151, pp. 438–448, 1999.
- [98] T. H. Jacka and M. Maccagnan, "Ice crystallographic and strain rate changes with strain in compression and extension," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 269–286, Mar. 1984.
- [99] T. H. Jacka and Li Jun, "The steady-state crystal size of deforming ice," *Annals of Glaciology*, vol. 20, pp. 13–18, 1994.
- [100] R. E. Gagnon and P. H. Gammon, "Characterization and flexural strength of iceberg and glacier ice," *J. Glaciol.*, no. 137, 1995.
- [101] J. F. Labuz and A. Zang, "Mohr-Coulomb failure criterion," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 45, no. 6, pp. 975–979, 2012.
- [102] A. M. Fish, "Strength of frozen soil under a combined stress state," in *Proceedings of the Sixth International Symposium On Ground Freezing*, 1991, pp. 135–145.
- [103] I. Mujtaba and M. Hussain, *Application of Neural Networks and Other Learning Technologies in Process Engineering*. World Scientific, 2001.
- [104] H. Adeli, "Neural Networks in Civil Engineering: 1989–2000," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 16, pp. 126–142, 2001.
- [105] F. Erchiqui, "Neuronal Networks Approach for Characterization of Softened Polymers," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 25, no. 5, pp. 463–473, Mar. 2006.
- [106] M. H. Palmer-BrownD., Draganova C., Pimenidis E., "Engineering Applications of Neural Networks - 11th International Conference, | Springer," 2009. .
- [107] L. Iliadis, H. Papadopoulos, and C. Jayne, Eds., *Engineering Applications of Neural Networks*, vol. 384. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [108] M. Minsky, *The Emotion Machine: Commonsense Thinking, Artificial Intelligence, and the Future of People and Machines*. New York: Simon & Schuster, 2018.

Future of the Human Mind, vol. 13. Simon and Schuster, 2007.

- [109] P. Borne, M. Benrejeb, and J. Haggège, *Les réseaux de neurones: présentation et applications*. Editions OPHRYS, 2007.
- [110] F. Rosenblatt, “Perceptron Simulation Experiments,” *Proc. IRE*, vol. 48, no. 3, pp. 301–309, Mar. 1960.
- [111] T. Kohonen, “An Introduction to neural computing,” *Neural Networks*, vol. 1, pp. 3–16, 1988.
- [112] G. Dreyfus, *Neural Networks: Methodology and Applications*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [113] S. Becker, “UNSUPERVISED LEARNING PROCEDURES FOR NEURAL NETWORKS,” *Int. J. Neural Syst.*, vol. 2, no. 01n02, pp. 17–33, Jan. 1991.

Annexe A : Présentation de l'approche neuronale

Les réseaux de neurones sont des structures qui prennent leur inspiration (souvent de façon assez lointaine) du fonctionnement élémentaire des systèmes nerveux. Ils constituent une approche permettant d'aborder sous des angles nouveaux les problèmes de classification, de reconnaissance de formes, d'association, d'identification ou même de modélisation [89]. Grâce à leur traitement parallèle de l'information et à leurs mécanismes inspirés des cellules nerveuses (neurones), ils infèrent des propriétés émergentes permettant de solutionner des problèmes jadis qualifiés de complexes [103]. Les réseaux de neurones trouvent leurs applications dans des champs différents. Leurs applications immérent dans la science des matériaux, le génie civil, l'environnement, etc. [104]–[107].

Les réseaux de neurones comportent diverses architectures fortement interrelées traitant des éléments, offrant une alternative aux approches de calculs conventionnelles. Ils répondent en parallèle à un ensemble d'entrées et sont concernés davantage par des transformations que par des algorithmes et procédures. Ils peuvent réaliser les tracés compliqués d'entrée-sortie sans relations explicites (linéaire et non linéaire) entre l'ensemble des données présentées pendant un processus d'apprentissage.

Caractéristiques des réseaux de neurones artificiels

Un réseau de neurones peut être défini comme un ensemble de neurones lié entre eux suivant une architecture bien déterminée. Chaque neurone réalise un calcul sur la base des données présentées par un autre neurone en aval et transmet l'information au neurone ou aux neurones suivants [89]. Un réseau de neurones est caractérisé par :

- i) L'architecture du réseau, qui définit le mode avec lequel les neurones sont connectés les uns aux autres ;

- ii) Le mode d'apprentissage, qui correspond à la phase d'entraînement du réseau. Il s'agit également de l'étape dans laquelle les poids synaptiques sont ajustés d'une façon itérative jusqu'à la satisfaction des critères de convergence.

De manière générale, un réseau de neurones permet de faire un meilleur usage des mesures disponibles que les méthodes d'approximation non linéaires conventionnelles. Ce gain peut être considérable lorsque le processus à modéliser dépend de plusieurs variables tel le cas des procédés de mise en forme là où interviennent plusieurs types de non-linéarités et plusieurs paramètres matériels [108]. La Figure A-1 montre une analogie entre neurone biologique et neurone artificiel.

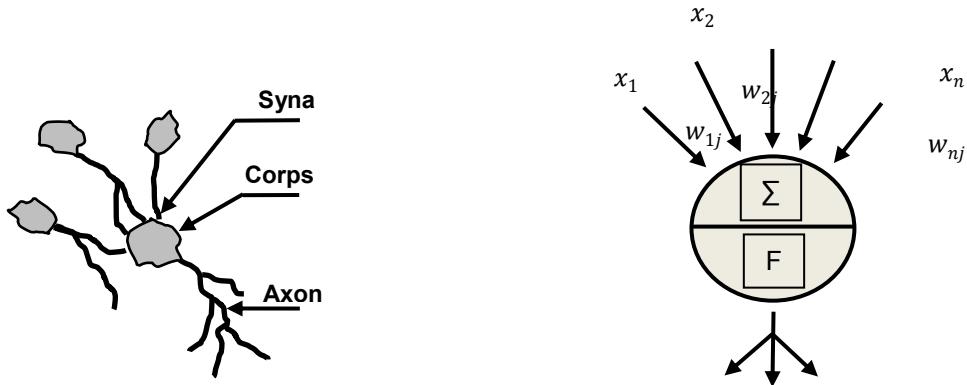


Figure A-1 : Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel

On peut généralement définir un neurone comme étant une fonction algébrique non linéaire, paramétrée à valeurs bornées [109].

Architecture d'un réseau de neurones

Un réseau de neurones est un maillage de plusieurs neurones, généralement organisé en couches. Pour construire une couche de S neurones, il s'agit simplement de les assembler comme à la Figure A-2.

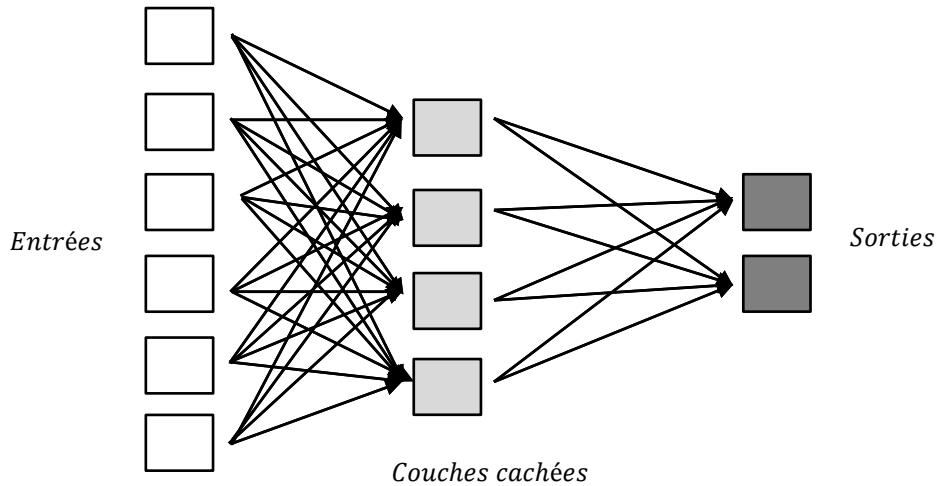


Figure A-2 : Structure d'un réseau de neurones multicouches

Parmi les architectures les plus reconnues, on distingue :

- Le perceptron : réseau à une seule couche à propagation avant [110] ;
- Le perceptron multicouche : réseau multicouche à propagation avant [89] ;
- Le réseau récurrent formé d'une ou de plusieurs couches avec des boucles de retour vers les couches précédentes [111].

Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est vraisemblablement la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux. Elle ne concerne cependant pas tous les modèles, mais les plus utilisés. L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré [112]. L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement. Durant cette phase de fonctionnement, le réseau adapte sa structure (le plus souvent, les poids des connexions) afin de fournir sur ses neurones de sortie les valeurs désirées.

Cet apprentissage nécessite des exemples aussi désignés sous l'appellation d'échantillon d'apprentissage ainsi qu'un algorithme d'apprentissage. Après initialisation des poids du réseau (en général des valeurs aléatoires), il y a présentation des exemples au réseau et calcul des sorties correspondantes. Une valeur d'erreur ou de correction est calculée et une correction des poids est appliquée. Au niveau des algorithmes d'apprentissage, il a été défini deux grandes classes selon que l'apprentissage est dit supervisé ou non supervisé [112].

- L'apprentissage supervisé : Consiste à calculer les coefficients synaptiques de manière à ce que les sorties du réseau soient aussi proches que possibles des sorties «désirées», une sortie déjà imposée en amont ;
- L'apprentissage non-supervisé : Lorsque l'on cherche à trouver une représentation des données aléatoires dans un espace de dimension beaucoup plus faible (typiquement de dimension 2) tout en conservant les «proximités» ou «ressemblances» entre ces derniers, ce type d'apprentissage est envisagé [113].

Annexe B : L'ensemble des résultats des tests expérimentaux

Table B-1 : Résultats expérimentaux des tests de compression uniaxiale sur la glace désaérée

Taux de déformation (s^{-1})	T = -20 °C			T = -15 °C			T = -5 °C		
	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la compression (MPa)		
	Tous les tests	Moyenne	Écart-type	Tous les tests	Moyenne	Écart-type	Tous les tests	Moyenne	Écart-type
1.00E-01	2.73			2.17			0.92		
	2.96			3.25			1.88		
	2.78	2.80	0.13	2.47	2.54	0.80	2.57	1.64	0.90
	2.72			2.96			1.21		
	3.20			1.67			2.46		
	4.35			3.84			2.67		
1.00E-02	4.37			3.51			2.63		
	4.38	4.31	0.11	3.69	3.46	0.30	2.70	2.48	0.21
	4.47			3.53			2.59		
	4.33			3.98			2.25		
	6.78			5.03			5.03		
	6.78			5.51			6.86		
1.00E-03	6.77	6.77	0.02	5.68	5.60	0.43	4.75	4.44	0.80
	6.77			5.48			3.85		
	6.80			6.30			5.00		

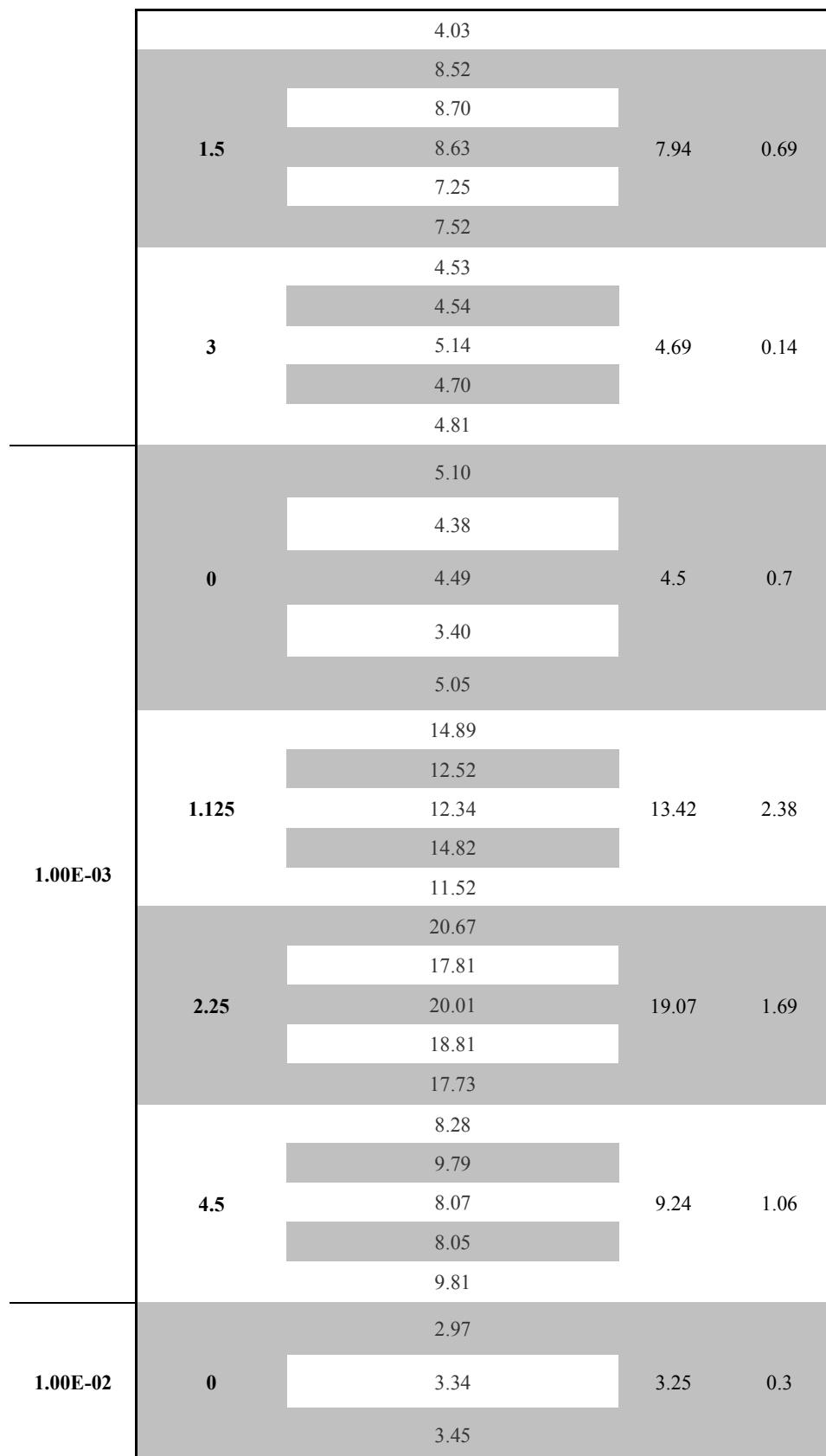
Table B-2 : Résultats expérimentaux des tests de compression uniaxiale sur la glace atmosphérique poreuse

Taux de déformation (s^{-1})	T = -20 °C			T = -15 °C			T = -5 °C		
	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la compression (MPa)		
	Tous les tests	Moyenne	Écart-type	Tous les tests	Moyenne	Écart-type	Tous les tests	Moyenne	Écart-type
1.00E-04	13.60			6.48			4.31		
	15.39			7.19			3.10		
	11.80	14.16	1.20	6.42	6.61	0.97	2.30	3.50	0.83
	14.01			7.27			3.00		
	13.57			7.49			3.92		
1.00E-01	1.94			5.98			1.48		
	1.93	1.95	0.04	5.02	4.55	0.50	2.14	1.64	0.70

	1.92		4.95		2.58			
	1.94		5.69		2.65			
	2.01		4.81		2.57			
	5.79		7.30		2.97			
	5.79		7.35		3.34			
1.00E-02	5.79	5.80	0.01	8.07	7.63	0.30	3.45	3.25
	5.80			7.70			3.42	0.30
	5.80			7.45			3.02	
	5.80			8.57			5.10	
	5.60			8.15			4.38	
1.00E-03	5.66	5.91	0.20	8.17	7.98	0.57	4.49	4.55
	5.64			7.50			3.40	0.70
	6.12			7.24			5.05	
	5.96			4.55			3.10	
	5.70			4.89			4.12	
1.00E-04	4.92	5.45	0.30	4.93	4.84	0.25	2.62	3.05
	5.52			4.53			1.42	0.89
	5.37			4.80			2.54	

Table B-3 : Résultats expérimentaux des tests de compression triaxiale sur la glace atmosphérique accumulée et testée à -5°C

Taux de déformation (s^{-1})	Contraintes de confinement (MPa)	Contrainte différentielle (MPa)			Écart-type
		Tous les tests	Moyenne		
0	0	3.10			
		4.12			
1.00E-04	0.75	2.62	3	0.89	
		1.42			
		2.54			
	0.75	4.16			
		4.68			
		4.08	3.97	0.57	
		4.18			



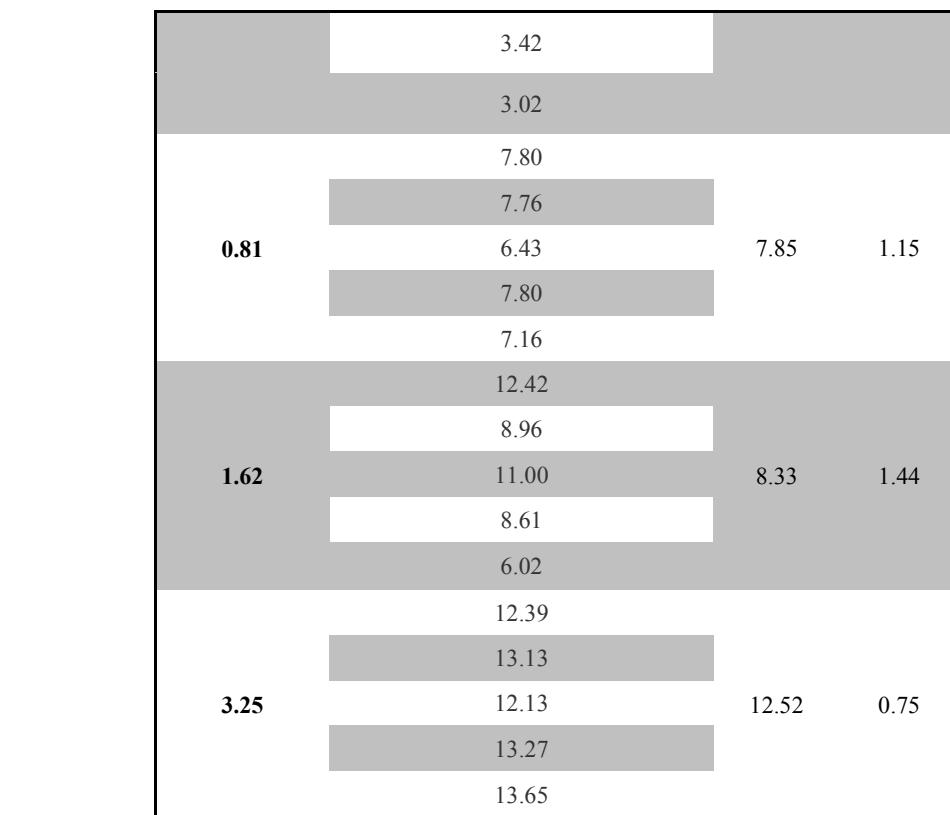
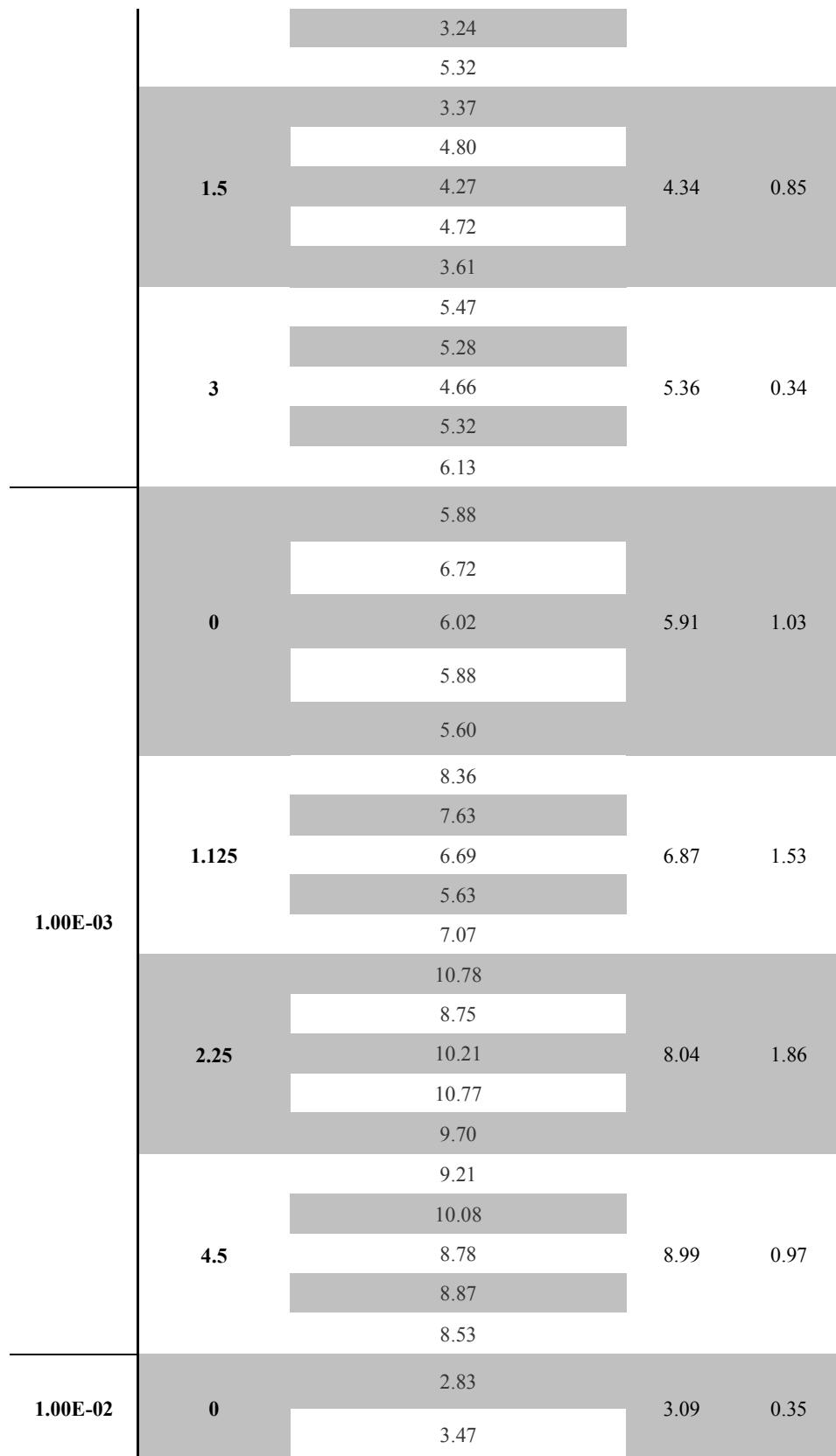


Table B-4 : Résultats expérimentaux des tests de compression triaxiale sur la glace atmosphérique accumulée et testée à -10°C

Taux de déformation (s^{-1})	Contraintes de confinement (MPa)	Contrainte différentielle (MPa)		
		Tous les tests	Moyenne	Écart-type
1.00E-04	0	3.30		
		2.62		
	0.75	4.20	3.97	0.73
		3.21		
		5.09		
		4.47		
		3.48	4.13	0.91
		5.35		



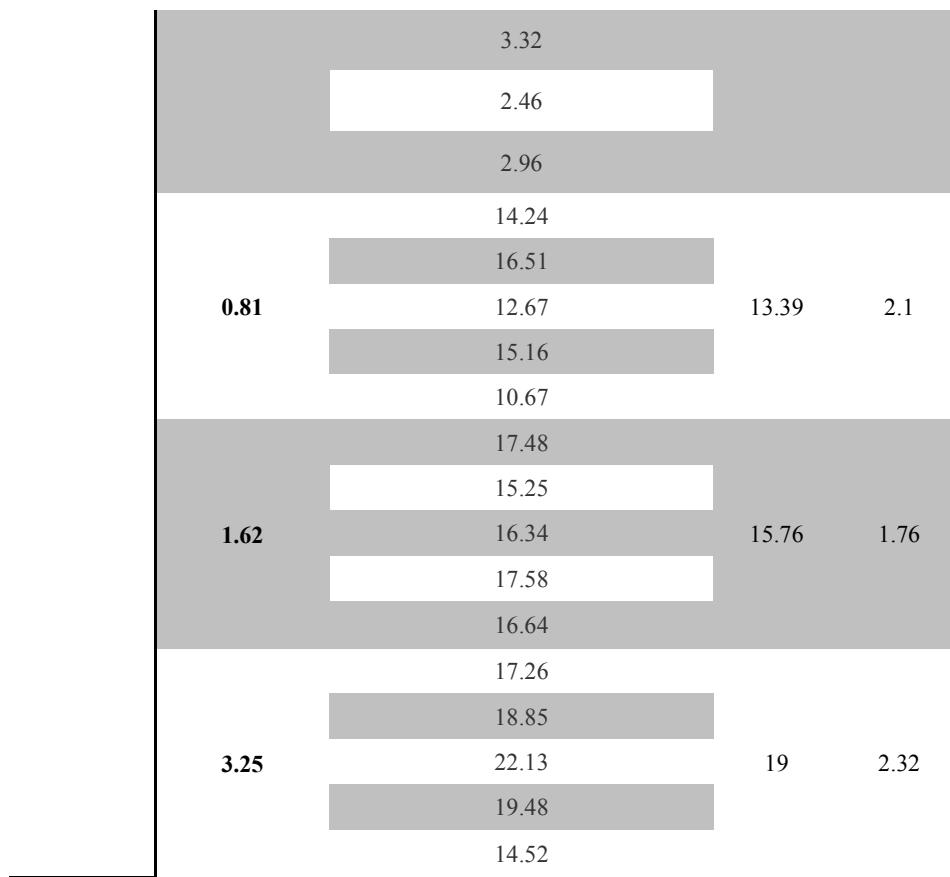


Table B-5 : Résultats expérimentaux des tests de compression triaxiale sur la glace atmosphérique accumulée et testée à -15°C

Taux de déformation (s^{-1})	Contraintes de confinement (MPa)	Contrainte différentielle (MPa)		
		Tous les tests	Moyenne	Écart-type
1.00E-04	0	4.55		
		4.89		
	0.75	4.93	4.84	0.25
		4.53		
0.75	4.80			
		5.38		
		4.70	4.98	0.66

