



Université du Québec
à Rimouski

Développement d'une méthodologie de conception de prises d'escalade avec application à un matériau composite recyclable

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie (3108)

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

© **MAXIME CAPPI**

Août 2024

Composition du jury :

Jean-Sébastien Deschênes, président du jury, UQAR

Jean Brousseau, directeur de recherche, UQAR

Richard Lepage, examinateur externe, UQAR

Dépôt initial le 11 juin 2024

Dépôt final le 14 août 2024

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

Aux rencontres de ces 2
dernières années...

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord l'entreprise Third Hold de Guillaume Bronsard à l'initiative de tout ce projet sans qui rien de tout cela n'aurait été possible. Je remercie également l'organisme Mitacs qui a su porter un intérêt au projet pour le financer.

Pour leur aide, je tiens à remercier tout le personnel de l'UQAR qui a participé à ce projet. Je tiens à remercier particulièrement : Suzie Loubert pour la réactivité aux multiples impressions 3D que je lui ai demandées, Karel Uhlir pour le temps passé durant à m'aider à me servir des machines d'essais, Richard Lafrance et Dany Morin pour les multiples constructions que je vous faisais faire. Je remercie également Sasan Sattarpanah Karganroudi pour m'avoir accueilli à Drummondville pour me transmettre son expertise en matière de rétro-ingénierie.

Pour le soutien, je remercie encore une fois mon compagnon, mes colocataires (Adrien et Timothé) et mes amis (Laure, Chloe, Lea, Taya, Maela, Gabriel, Thomas, Philippine, Lou, Clara W., Axel, Klem, Cyril, Clara D., Anna, Charlotte). Ils ont rendu mon expérience rimouskoise et même canadienne inoubliable.

Je tiens à remercier également ma famille ; mes parents et grands-parents qui m'ont soutenu dans ce choix de partir à l'étranger pour poursuivre mes études.

Enfin, je tiens à remercier tout spécialement, mon maître de recherche Jean Brousseau pour avoir su m'aiguiller durant les moments de doutes et m'aider à avancer dans ce parcours initiatique qu'est la réalisation d'un mémoire.

Merci à tous,

AVANT-PROPOS

« Je crois bien que l'alpinisme avait toujours exercé sur moi une certaine fascination. Comme tout le monde, je m'étonnais des exploits de ces hommes qui se mesurent aux parois vertigineuses, défiant la mort [...] pour repousser toujours plus loin les limites des possibilités humaines » (Hebert, 1972).

Grimper fait partie des désirs intemporels de l'être humain, mais, dans quel but ? À quoi bon remettre sa vie entre les mains d'une corde de quelques centimètres de diamètre ? L'irrationalité de l'engouement envers une activité où l'expression « la vie ne tient qu'à un fil » est une véritable intrigue.

De nombreuses personnes sont arrivées à la même conclusion, il a donc fallu mettre en place une version édulcorée de ce sport : c'est ainsi qu'est née l'escalade en salle ou blocs. Les prises d'escalades ont donc été créées dans ce but de reproduire les différents volumes qu'il est possible de retrouver sur une paroi rocheuse ou glaciaire. Depuis l'ouverture de la première salle en 1960, ce sport n'a cessé de produire des prises toujours plus innovantes : au niveau de l'aspect (prise lumineuse), de la forme (prise de structure rocheuse complexe) ou des matériaux (prise en bois voire même en roche). De plus, un leitmotiv de ce sport est la volonté de limiter l'impact carbone de ce sport.

Plus qu'un sport de l'extrême, c'est un sport extrêmement engagé...

Les innovations dans ce milieu étant déjà multiples, il a fallu innover et c'est ainsi qu'est née l'idée. Et si l'on créait des prises d'escalades recyclables ? La fin de vie d'une prise serait ainsi la genèse d'une nouvelle.

RÉSUMÉ

Les prises d'escalades sont, pour la majorité, produites en polyuréthane de façon artisanale sans base scientifique. Cela présente deux inconvénients majeurs : un environnemental, le polyuréthane est l'une des sources de déchets plastiques les plus importantes actuellement et un manque de prédictibilité, leur création se basant sur l'intuition des concepteurs. Ce mémoire tente de résoudre ces deux problèmes en proposant un processus de conception de prises d'escalade recyclables dans un matériau composite innovant composé d'une matrice en fibres de verre à mâts coupés baignant dans la résine Elium® 150. Le processus de conception s'appuie sur la validation de différents tests issus de normes d'essais de matériaux plastiques ASTM D638 et de la réglementation européenne en vigueur sur les prises d'escalade NF EN 12 572.

La démarche employée dans ce mémoire s'inscrit dans un processus de rétro-ingénierie. Des échantillons des deux matériaux sont utilisés : polyuréthane du commerce et matériau composite test. Dans ce dernier cas, les éprouvettes comme les prises sont obtenues par moulage dans des empreintes obtenues par impression 3D. Les différents tests indiquent que le composite est un matériau assez similaire au polyuréthane présentant tout de même une plus grande fragilité. Ayant des données tests, la modélisation numérique des essais peut être menée. Les résultats numériques valident la possibilité d'utilisation de ces prises tout en présentant une concentration d'effort au niveau des points de fixation. Pour finaliser le processus de conception, des prises d'escalade en composite sont produites et subissent les tests de la réglementation européenne. Elles valident ainsi les tests de la norme avec un facteur de sécurité. L'invariance du matériau au facteur thermique est également vérifiée.

Un processus de conception applicable à toutes prises d'escalades est issu de ces résultats. Il consiste en l'obtention de données de matériaux, la modélisation d'une prise et la simulation par éléments finis de cette dernière. Les résultats obtenus à l'issue de ces simulations sont de bons indicateurs de la conception initiale. Il ne reste plus qu'à tester les prises selon la norme NF EN 12 572 et de les installer en salle pour connaître le ressenti des grimpeurs.

Mots clés : Prises d'escalade, Composite, Rétro-ingénierie, Plastique, Recyclage, Polyuréthane, Modélisation, Processus de conception

ABSTRACT

Most climbing holds are made by hand and not based on science. It has two major drawbacks: an environmental one, as polyurethane is one of the most significant sources of today's plastic waste and a lack of predictability, as their creation is based on designers' intuition. This dissertation aims to solve these two issues by proposing a design process for recyclable climbing holds made of an innovative material composed of a chopped fiberglass strands matrix immersed in Elium® 150 resin. The design process is based on the validation of various tests coming from plastic material testing standards ASTM D638 and European regulations regarding climbing holds NF EN 12 572.

The approach used in this dissertation follows a reverse engineering process. Samples are extracted from both materials: commercial polyurethane and the tested composite material. In the latter case, test specimens as well as climbing holds are obtained by molded in 3D printing imprint. Several tests indicate that the composite material is quite similar to polyurethane but with greater fragility. With test data available, numerical modeling of tests can be conducted. The numerical results confirm the possibility of using these holds, albeit with a concentration of stress at attachment points. To finalize the conception process, composite climbing holds are produced and undergo European regulation tests. They validate the test of the standard with a safety factor. Thermal stability of the material is also verified.

This results in a design process applicable to all climbing holds. It consists of obtaining material data, modeling a hold, and simulating it using finite elements analysis. Results obtained from these simulations are good indicators for initial conception. The next steps are to test the holds according to the NF EN 12 572 standard and install them in a climbing gym to gather feedback from climbers.

Keywords: Climbing Holds, Composite, Reverse Engineering, Plastic, Recycling, Polyurethane, Design Process

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ix
AVANT-PROPOS	xii
RÉSUMÉ.....	xiv
ABSTRACT.....	xvi
TABLE DES MATIÈRES	xviii
LISTE DES TABLEAUX.....	xxi
LISTE DES FIGURES.....	xxiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xxx
LISTE DES SYMBOLES	xxxiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	5
1.1 PROBLÉMATISATION.....	5
1.1.1 Description du contexte actuel.....	5
1.1.2 Énoncé de la problématique.....	11
1.2 DÉFINITION DES OBJECTIFS.....	12
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	15
2.1 INTRODUCTION.....	15
2.2 ESCALADE ET MESURE.....	15
2.2.1 Normes sur les prises	15
2.2.2 Travaux antérieurs en escalade	17
2.3 MATÉRIAUX DES PRISES D'ESCALADE	24
2.3.1 Polyuréthane	25
2.3.2 Composite innovant	30

2.3.3 Critères de limitation en statique	35
2.4 RÉTRO-INGÉNIERIE	40
2.4.1 Généralité du processus	40
2.4.2 Choix de la MDRE	44
2.5 RÉSUMÉ	46
CHAPITRE 3 MATÉRIEL ET MÉTHODE	47
3.1 INTRODUCTION	47
3.2 DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	49
3.2.1 Éprouvettes normées pour plastique ASTM D638.....	49
3.2.2 Obtention des éprouvettes	53
3.2.3 Machine d'essai en traction : calibrage et étalonnage	57
3.2.4 Méthodologie d'obtention des caractéristiques des matériaux.....	62
3.3 TEST DE LA NORME NF EN 12 572-3	63
3.3.1 Préparation thermique	63
3.3.2 Les différents tests et leur mise en place	66
3.3.3 Détermination des valeurs limites des tests pour le dimensionnement.....	70
3.4 MODÉLISATION NUMÉRIQUE	71
3.4.1 Modélisation des spécimens : introduction des propriétés des matériaux	72
3.4.2 Modélisation des prises d'escalades (commerciales et innovantes).....	77
3.5 MOULAGE D'UNE PRISE EN COMPOSITE RECYCLABLE	88
3.6 RÉSUMÉ	90
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET ANALYSES	91
4.1 ESSAI DE TRACTION NORMES ASTM D638.....	91
4.1.1 Cas du polyuréthane de Movement Factory	91
4.1.2 Cas des éprouvettes en composite (Elium® 150 + fibres de verre)	92
4.1.3 Détermination du coefficient de Poisson.....	96
4.2 ESSAI SELON LA NORME NF EN 12 572	97
4.2.1 Cas du polyuréthane de Movement Factory	97

4.2.2 Cas du composite (Elium® 150 + fibre de verre).....	101
4.3 MODELISATION NUMERIQUE.....	105
4.3.1 Test normé de traction (ASTM D638).....	105
4.3.2 Simulations sur les prises d'escalade.....	109
4.4 MISE EN PLACE DE LA METHODE DE CONCEPTION.....	118
4.5 RÉSUMÉ.....	122
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	124
ANNEXE I : Quantification du niveau en escalade.....	127
ANNEXE II : Plan des moules des éprouvettes.....	130
ANNEXE III : Résultats des essais en traction pour les éprouvettes tests.....	134
ANNEXE IV: Préparation thermique des prises d'escalade en polyuréthane.....	136
ANNEXE V : Plan du crochet utilisé pour les tests de la norme NF EN 12 572.....	138
ANNEXE VI : Plan du système d'accroche selon la norme NF EN 12 572.....	139
ANNEXE VII: Plan du moule de prise d'escalade.....	143
ANNEXE VIII: Méthode de traitement des essais en traction.....	146
ANNEXE IX: Préparation thermique des prises d'escalade en Elium® 150.....	150
ANNEXE X: Choix du chargement le plus contraignant des prises d'escalades.....	152
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES,.....	155

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs relatives de la norme de différentes grandeurs en fonction du niveau du grimpeur.....	20
Tableau 2 : Résumé des caractéristiques des matériaux composant la majorité des prises d'escalade actuelle.....	24
Tableau 3 : Étapes d'un processus de rétro-ingénierie, adapté de (Buonamici et al., 2018) et (Varady et al., 1997).	40
Tableau 4 : Présentation et comparaison des différentes stratégies en CAD, adapté et traduit de (Buonamici et al., 2018).....	41
Tableau 5 : Classification des types d'éprouvettes en fonction de leur utilisation	51
Tableau 6 : Différentes équations liant la dureté Shore à la valeur du module d'Young.....	52
Tableau 7 : Résumé des propriétés mécaniques des matériaux d'étude	96
Tableau 8 : État de validation des tests de la norme pour les prises en polyuréthane	99
Tableau 9 : Tableau des paramètres pour les essais en composite ayant subi le traitement thermique	102
Tableau 10 : État de validation des tests de la norme pour les prises en composite.....	103
Tableau 11 : Correspondance des niveaux entre chaque pays d'escalade en voie	128
Tableau 12 : Correspondance des niveaux entre chaque pays d'escalade en bloc	129

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Différentes blessures types en escalade (Ecuyer & Haeni, s. d.)	6
Figure 2 : Prototype de prises en mousse réalisé par le shaper Christophe Picard, issu de La fabrique verticale, (2017)	9
Figure 3 : Tryptique du développement durable, issu de Bien vivre ensemble, (2014)	9
Figure 4 : Différents types de prises d'escalades liste non exhaustive, issue de Valls & Placette, (2005).....	10
Figure 5 : FN et FF pour la main d'un grimpeur (Seifert et al., 2017).	19
Figure 6 : Interprétation artistique montrant à quoi pourrait ressembler le Digiwall (Liljedahl et al., 2005).....	21
Figure 7 : Illustration des capteurs non invasifs existants pouvant être utilisés, traduit de (Breen et al., 2023).	22
Figure 8 : Organigramme présentant les différents polyuréthanes ainsi qu'un exemple de leur utilisation, inspiré de (Akindoyo et al., 2016).....	25
Figure 9 : Structure de plusieurs isocyanates, (Akindoyo et al., 2016)	26
Figure 10 : Réaction classique d'obtention de PU, (Akindoyo et al., 2016).....	26
Figure 11 : Procédé de moulage par injection plastique (Plastisem, 2024).	27
Figure 12 : Procédé de moulage par gravité (Tomasevic, 2020).	28
Figure 13 : Différentes méthodes de recyclage du polyuréthane, inspiré de (Zia et al., 2007)	29
Figure 14 : Différents types de composites (Ngo, 2023).....	30
Figure 15 : Fibres de verre coupées (Air Tech, 2024).	32
Figure 16 : Perkadox GB-50L, Dibenzoyl de peroxyde (Nouryon, 2022b).	32
Figure 17 : Moule expérimental de prises d'escalade vide pour la résine Elium® 150.....	33
Figure 18 : Moule expérimental de prises d'escalade rempli par la résine Elium® 150	33

Figure 19 :Prise d'escalade en polyuréthane (à gauche) et Elium® 150 (à droite)	34
Figure 20 : Schéma du cycle de vie de la résine Elium®, traduit de (Arkema, 2022).....	39
Figure 21 : Explication de la structuration KDM, adapté de (KDM, s. d.).....	43
Figure 22 : : Explication de la structuration ASTM D, adapté de (Khachouch et al., 2023).....	44
Figure 23 : Méthodologie de rétro-ingénierie, adapté de (Karganroudi et al., 2022).	45
Figure 24 : Méthodologie de rétro-ingénierie appliquée à ce mémoire et inspiré de la figure 23.....	46
Figure 25 : Organigramme de la méthodologie de recherche	48
Figure 26 : Différents modèles d'éprouvettes selon la norme ASTM D638, (Zainab, 2019).....	50
Figure 27 : Classification et exemple d'objets selon leur dureté Shore, (2019).....	51
Figure 28 : Duromètres 306L et 307L de la marque PTC Instruments (PTC, s. d.-b) and (PTC, s. d.-a).....	53
Figure 29 : Prises d'escalade de la gamme CAKES de l'entreprise Movement Factory Holds (Movement Factory, 2017).....	54
Figure 30 : Moule en SLA (à gauche) et contre-moule en FDM (à droite)	56
Figure 31 : Chapeau (à gauche) et bâti (à droite) en FDM	56
Figure 32 : Processus d'obtention d'éprouvette en composite à base d'Elium® 150	57
Figure 33 : Données matériaux 8789K82, fiche technique de Mc Master.....	58
Figure 34 : Bloc de 8789K82 dans lequel sont débitées 3 éprouvettes de type I selon la norme ASTM D638	59
Figure 35 : Désignation des paramètres de tests selon la géométrie d'éprouvette sélectionnée (Zainab, 2019).....	60
Figure 36 : Essais en traction des éprouvettes de 8789K82.....	62
Figure 37 : Thermocouple HH802 Omega (type Alumnel - Chromel).....	64
Figure 38 : Processus de préparation thermique des prises d'escalade selon la norme NF EN 12 572-3,(AFNOR, 2009).	64

Figure 39 : Prise d'escalade en polyuréthane (a) et composite (b) dans un environnement à -30°C, bain de neige carbonique et de sel	65
Figure 40 : Étuve de la préparation thermique réglée à 70°C.....	65
Figure 41 : Prises d'escalade accrochées sur une plaque de bouleau de 18 mm.....	66
Figure 42 : Système d'accroche lesté avec des sacs de sable.....	68
Figure 43 : Crochet d'accroche	69
Figure 44 : Positionnement du crochet pour réaliser le test de rotation et le test d'arrachement de la norme NF EN 12 572	69
Figure 45 : Système de test pour obtenir la limite de résistance des prises d'escalade; à gauche en polyuréthane et à droite en composite.....	71
Figure 46 : Extrait de la mise en plan de l'éprouvette de Type I (a) et Type IV (b) sur Solidworks.....	73
Figure 47 : Lois de comportement, a : Matériau élastique avec zone parfaitement plastique, b : matériau élastique avec écrouissage isotrope linéaire	74
Figure 48 : Maillage raffiné pour éprouvette type I (a) et type IV (b).....	76
Figure 49 : Étude de convergence du maillage des éprouvettes (a) de type I et (b) de type IV	77
Figure 50 : Modèle numérique d'une reproduction de prise du commerce sur Solidworks; a : face avant, b : face arrière	78
Figure 51 : Modèle numérique de la prise d'escalade d'étude de ThirdHold sur Solidworks.....	79
Figure 52 : Représentation visuelle des conditions aux limites pour la prise du commerce; a : Conditions aux limites 1, b : Conditions aux limites 2.....	82
Figure 53 : Représentation visuelle des conditions aux limites pour la prise d'étude; a : Déplacements imposés 1, b : Déplacements imposés 2, c : Déplacements imposés 3.....	83
Figure 54 : Prise d'escalade du commerce modélisée sur COMSOL® avec zone d'application de la force	84
Figure 55 : Prise d'escalade d'étude modélisée sur COMSOL® avec zone d'application de la force : a application axiale de la force ; b application désaxée de la force	84

Figure 56 : Maillage de la prise d'escalade du commerce sur COMSOL®	85
Figure 57 : Étude de convergence du maillage éléments finis pour la prise du commerce, a : Conditions aux limites 1 et b : Conditions aux limites 2	85
Figure 58 : Maillage de la prise d'escalade sur COMSOL®, a : chargement désaxé et b : chargement axial.....	86
Figure 59 : Étude de convergence du maillage éléments finis de la prise d'escalade dans les différents cas d'étude, a : conditions aux limites 1 et chargement axial, b : conditions aux limites 2 et chargement axial, c : conditions aux limites 3 et chargement axial, d : conditions aux limites 1 et chargement désaxé, e : conditions aux limites 2 et chargement désaxé et f : conditions aux limites 3 et chargement désaxé	87
Figure 60 : Moule de la prise d'escalade, à gauche parties inférieures, à droite partie supérieure.....	88
Figure 61 : Test de la norme NF EN 12 572 pour les prises d'escalade en composite.....	89
Figure 62 : Tracés de l'évolution de la contrainte nominale (MPa) en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm) des éprouvettes en polyuréthane; (a) : éprouvette 1; (b) : éprouvette 2, test 1, sans rupture; (c) : éprouvette 2, test 2 ; (d) éprouvette	94
Figure 63 : Tracés de l'évolution de la contrainte nominale (MPa) en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm) des éprouvettes en composite; (a) : éprouvette 1; (b) : éprouvette 2; (c) : éprouvette 3; (d) : éprouvette 4; (e) : éprouvette 5	95
Figure 64 : Suivi thermique des prises d'escalades en polyuréthane de la marque Movement factory, graphique présentant la température en Celsius (°C) en fonction du temps en minutes (min)	97
Figure 65 : Valeur du coefficient de poisson des éprouvettes tests en 8789K82 polyuréthane en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm) de ces dernières : (a) éprouvette 1, (b) éprouvette 2, (c) éprouvette 3, (d) éprouvette 4, (e) éprouvette 5	98
Figure 66 : Évolution de la force exercée sur la prise d'escalade en polyuréthane en fonction du déplacement (mm).....	100

Figure 67 : Zoom sur l'évolution de la force exercée sur la prise d'escalade en polyuréthane en fonction du déplacement (mm).....	101
Figure 68: Suivi thermique des prises d'escalades en composite à base d'Elium® 150, graphique présentant la température en Celsius (°C) en fonction du temps en minutes (min).....	102
Figure 69 : Tracés de l'évolution de la contrainte nominale (MPa) en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm) des éprouvettes en composite ayant subi le traitement thermique.....	103
Figure 70 : Évolution de la force exercée sur la prise d'escalade en composite en fonction du déplacement (mm)	104
Figure 71 : Zoom sur l'évolution de la force exercée sur la prise d'escalade en composite en fonction du déplacement (mm)	104
Figure 72 : Répartition de la contrainte de Von Mises dans une éprouvette de Type IV en Polyuréthane soumise à une force de traction de 650 N	106
Figure 73 : Courbe de traction du polyuréthane de la zone élastique obtenu par modélisation d'une éprouvette de Type IV	106
Figure 74 : Répartition du critère de Von Mises dans une éprouvette de Type IV en polyuréthane pour une sollicitation d'une force de traction de 650 N.....	107
Figure 75 : Répartition de la contrainte de Coulomb-Mohr dans une éprouvette de Type I en composite pour une sollicitation d'une force de traction de 2 550 N.....	108
Figure 76 : Courbe de traction du composite obtenu par modélisation d'une éprouvette de Type I en composite	108
Figure 77 : Répartition du critère de Coulomb-Mohr dans une éprouvette de Type I en composite pour une sollicitation d'une force de traction de 2 550 N.....	109
Figure 78 : Évolution du minimum du critère de Von Mises en fonction de la charge exercée.....	110
Figure 79 : Répartition du critère de Von Mises sur la prise du commerce pour une force exercée de 10 000 N (Condition aux limites 1)	111
Figure 80 : Répartition du critère de Von Mises sur la prise du commerce pour une force exercée de 11 800 N (Condition aux limites 2)	111
Figure 81 : Évolution du minimum du critère de Coulomb-Mohr en fonction de la charge exercée avec un chargement axial	113

Figure 82 : Répartition du critère de Coulomb-Mohr sur la prise d'étude pour une force limite exercée avec un chargement axial avec zooms intéressants; a : Conditions aux limites 1 $F = 7\,400\text{ N}$, b : Conditions aux limites 2 $F = 31\,000\text{ N}$ et c : Conditions aux limites 3 $F = 9\,000\text{ N}$	114
Figure 83 : Évolution du minimum du critère de Coulomb-Mohr en fonction de la charge exercée avec un chargement désaxé.....	115
Figure 84 : Répartition du critère de Coulomb-Mohr sur la prise d'étude pour une force exercée avec un chargement désaxé: a : Conditions aux limites 1 $F = 2\,550\text{ N}$, b Conditions aux limites 2 $F = 4\,800\text{ N}$ et c Conditions aux limites 3 $F = 3\,000\text{ N}$	117
Figure 85 : Processus de conception normée de prises d'escalades	121
Figure 86 : Plan d'assemblage du moule des éprouvettes	130
Figure 87 : Plan de la partie inférieure du moule des éprouvettes de type I	131
Figure 88 : Plan de la partie flexible du moule des éprouvettes de type I	132
Figure 89 : Plan de la partie supérieure du moule des éprouvettes de type I	133
Figure 90 : Tracé de l'évolution de la contrainte nominale (MPa) en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm) pour 3 éprouvettes (a), (b) et (c) de type I en 8789K82	135
Figure 91 : Tracés de l'évolution de la température des thermocouples (°C) en fonction du temps (min) pour des prises d'escalade en polyuréthane.....	137
Figure 92 : Plan d'assemblage du système d'accroche des prises d'escalades pour test de limite de rupture.....	139
Figure 93 : Plan de la partie supérieure du système d'accroche	140
Figure 94 : Plan de la partie intermédiaire du système d'accroche	141
Figure 95 : Plan de la partie inférieure du système d'accroche	142
Figure 96 : Plan de la 1 ^{ère} partie du moule à prises d'escalade.....	143
Figure 97 : Plan de la 2 ^{ème} partie du moule à prises d'escalade.....	144
Figure 98 : Plan de la partie supérieure du moule à prise d'escalade	145
Figure 99 : Tracés de l'évolution de la contrainte nominale (MPa) en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm) d'une éprouvette en composite.....	146

Figure 100 : Coefficients de la série de Fourier (a) réelle et (b) imaginaire en fonction de la période du signal.....	147
Figure 101 : Tracés de l'évolution de la température des thermocouples (°C) en fonction du temps (min) pour des prises d'escalade en composite.....	151
Figure 102: Autre zone possible d'application de la force pour dimensionner le critère de rupture en statique	152
Figure 103 : Évolution du critère de CM en fonction de la force exercée.....	153
Figure 104 : Répartition du critère de CM dans le cas de la force limite de 2 400 N	153

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AFNOR	Association Française de Normalisation
AS	Australian Standard (Normes Australienne)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Agence américaine de tests et matériaux)
ASTMD	Abstract Syntax Tree Metamodel (Métamodèle d'arbre de syntaxe abstraite)
B2B	Business to Business (vente entre 2 entreprises)
BPA	Bureau de prévention des accidents
CAD	Computer Aided Design (Conception assistée par ordinateur)
CBJ	Climbing Business Journal (Journal du marché de l'escalade)
CIO	Comité International Olympique
CM	Coulomb-Mohr
COF	Coefficient de Friction
COP	Centre de Pression
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (Frittage laser direct des métaux)
EN	Européenne
FDM	Fused Deposition Modeling (Modélisation par dépôt de fil fondu)
FPU	Flexible polyurethane

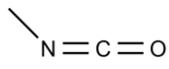
FQME	Fédération Québécoise de la Montagne et de l'Escalade
FRC	Fiber-reinforced concrete (Béton en fibre renforcé)
GASTM	Generic Abstract Syntax Tree Metamodel (Métamodèle générique d'arbre de syntaxe abstraite)
HDI	1,6-hexamethylene diisocyanate
HMDI	Hydrogenated MDI (4,4'-diisocyanato dicyclohexylmethane)
IFSC	International Federation of Sport Climbing (Fédération internationale de l'escalade)
IPDI	1-isocyanato-3isocyanatomethyl-3,5,5-trimethyl-cyclohexane
ISO	International organization for standardization (Organisation Internationale de normalisation)
KDM	Knowledge Discovery Metamodel (Métamodèle de découverte des connaissances)
MDI	Methylene diphenyl diisocyanate
MDRE	Model Driven Reverse Engineering (Rétro-ingénierie pilotée par le modèle)
MTS	Material Test System (Système d'essai des matériaux)
NF	Norme Française
PASTM	Proprietary Abstract Syntax Tree Metamodel (Métamodèle propriétaire de l'arbre de syntaxe abstraite)
PLA	Polylactic Acid (Acide Polyactique)
PTC	Pacific Transducer Corp (Entreprise de transducteur du pacifique)

PU	Polyuréthane
PUI	Polyurethane ionomers
SAE	Structure artificielle d'escalade
SASTM	Specific Abstract Syntax Tree Metamodel (Métamodèle spécifique d'arbre de syntaxe abstraite)
SLA	Stéréolithographie
SLS	Selective Laser Sintering (Frittage sélectif par laser)
TDI	Toluene diisocyanate
TPU	Thermoplastic Polyurethane
WPU	Water Borne Polyurethane (Polyuréthane à base d'eau)

LISTE DES SYMBOLES



Cycle aromatique



Groupe fonctionnel isocyanates (NCO)



Groupe fonctionnel hydroxyle (OH)

ν

Module de Poisson (sans unité)

E

Module d'Young (MPa)

σ_{\max}

Contrainte maximale (MPa)

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$

Contraintes principales (MPa)

σ_{VM}

Contrainte de Von Mises (MPa)

Re

Limite élastique (MPa)

E_{plast}

Module de plasticité du modèle bilinéaire (MPa)

σ_{plast}

Valeur de plasticité du modèle linéaire avec plateau (MPa)

T

Température (°C)

μ_s

Coefficient de friction dynamique (sans unité)

μ

Coefficient de friction statique (sans unité)

ρ

Masse volumique (kg/m³)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

10 janvier 2024, à Saint-Gall, peu avant 16 heures, un homme de 57 ans a subi de graves blessures des suites d'une chute d'un mur d'escalade. Son pronostic vital est engagé. La question pour les enquêteurs est: quelle est la cause ? S'agit-il d'un problème humain ou matériel ? En s'intéressant aux normes régissant le matériel, il apparaît qu'elles ne sont pas obligatoires. Aucun véritable processus de conception n'existe. Ce mémoire a pour objectif de résoudre une partie de ses interrogations en éliminant l'inculpation des prises d'escalade utilisées.

En effet, il propose un procédé de conception de prises d'escalade s'appuyant sur l'ingénierie. Ce dernier est appliqué dans le cas d'une étude de développement de prises d'escalades en composite recyclables développées par l'entreprise Arkema®. Cette étude cherche à quantifier les paramètres de sécurité nécessaires à l'utilisation des prises d'escalade dans le commerce. La démarche utilisée s'appuie sur un modèle de rétro-ingénierie. Elle détermine ainsi différents paramètres mécaniques s'appuyant sur des normes mécaniques et sécuritaires en escalade pour des prises du commerce. Ces données font office de référence pour élaborer le processus de conception d'une prise dans un matériau innovant.

Les objectifs de cette étude visent à améliorer le processus de conception des prises d'escalade qui présente actuellement deux problèmes majeurs. Tout d'abord, il y a la question du matériau. Bien que couramment utilisé dans de nombreux objets du quotidien tels que les coques de téléphone et l'isolation de maisons, le polyuréthane pose un problème écologique significatif en tant que source majeure d'émissions de gaz à effet de serre. En effet ce matériau est issu de la chimie pétrolière. Le second problème concerne la méthode actuelle de conception des prises d'escalade. Elle est artisanale et réalisée par des « shapers » (cela désigne les concepteurs de prises d'escalade, il n'existe aucun équivalent français de ce mot). Cela manque donc de prédictibilité. Il est difficile de déterminer la sécurité et la viabilité

d'une prise d'escalade sans la produire et la tester. Cette étude vise à résoudre ces deux problématiques en proposant des prises d'escalade fabriquées dans un matériau innovant en composite recyclable. De plus, un processus de validation quantifiable qui peut être appliqué à toutes les prises d'escalade assurant ainsi leur sécurité et leur efficacité avant leur mise en production est proposé.

Apparu dans les années 60, ce sport s'est fortement démocratisé dans les années 2010. Même si l'escalade en salle présente un risque moindre que son homologue sauvage, il n'en reste pas moins que le danger existe et qu'un meilleur encadrement du processus de conception permettrait de limiter des accidents. Plus qu'une amélioration du processus c'est véritablement une définition de ce dernier qui est nécessaire. Pour justifier de la sécurité d'utilisation des prises d'escalade, une série de tests est réalisée : aussi bien de nature mécanique (selon la norme d'essais sur les plastiques ASTM D638 (Zainab, 2019)) que sécuritaire. Dans ce dernier cas, c'est la norme NF EN 12 572 qui est utilisée, bien qu'elle fasse partie d'une norme à application volontaire européenne c'est la seule qui aborde la question de la sûreté d'utilisation des prises. Elle se situe donc au cœur de l'étude et représente un véritable critère de validation. Les valeurs obtenues pour ces tests dans le cas de prise du commerce en polyuréthane servent de référence pour le test du matériau innovant qu'est le composite à base d'Elium® 150 (Arkema, s. d.). Ces données sont implémentées dans un logiciel d'élément fini qu'est COMSOL® dans le but de pouvoir prédire si la prise d'escalade peut ou ne peut être utilisée dans un cadre sportif. Enfin, pour valider ce test, des prises sont produites et les résultats expérimentaux sont étudiés et comparés à ceux espérés.

Le travail effectué durant ce projet se divise en quatre chapitres. Le premier amène le sujet en étudiant les problèmes actuels de la conception des prises d'escalade, soulevant ainsi la problématique et les objectifs de l'étude. Le deuxième développe la revue de littérature du sujet. Il fait un bilan des différents travaux qui existent à l'heure actuelle dans le domaine de l'escalade, décrit les différences entre le matériau actuel (polyuréthane) et celui étudié (composite à base d'Elium® 150). Il explique l'organisation d'un processus de rétro-ingénierie. Le troisième chapitre expose la méthode suivie durant l'étude pour quantifier les

matériaux. Les tests décrits sont de deux principales natures: mécaniques et sécuritaires. Dans le cas des tests mécaniques (ASTM D638), la méthode d'obtention, la forme et les paramètres de test des différentes éprouvettes sont obtenus tels qu'énoncés. Dans le cadre des tests sécuritaires (NF EN 12 572), les différents tests sont décrits, de leur préparation à leur réalisation. Certains dépassements de la norme comme la détermination de la limite de rupture des prises sont également évoqués. Ces paramètres sont ensuite modélisés sur COMSOL® dont les choix de modélisation y sont détaillés. Enfin, il est expliqué la méthode de moulage des prises avec le composite innovant. Dans le quatrième chapitre, les résultats des différents tests évoqués ainsi que de la simulation numérique sont présentés. Il en ressort un processus de conception de prises d'escalade utilisable à l'avenir lors de la conception de nouvelles prises. Les résultats expérimentaux et modélisés sont mis en perspective pour en déduire ce procédé. L'étude se termine par une mise en perspective des résultats avec les objectifs initiaux.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

1.1 PROBLÉMATISATION

1.1.1 Description du contexte actuel

- Un intérêt grandissant pour l'escalade

L'escalade est un sport qui consiste à progresser le long d'une paroi en s'aidant des aspérités naturelles (escalade sauvage) ou artificielles (escalade en salle). Sa pratique peut nécessiter l'utilisation d'équipements d'assurance (escalade en voie) ou non (escalade en bloc). Ce sport s'est démocratisé à la fin du XIXe avec le développement de l'alpinisme et la volonté humaine de conquérir les endroits les plus reculés (Wikipedia, 2023). En Amérique, on trouve d'ailleurs l'un des lieux d'escalade sauvage le plus connu dans le parc de Yosemite, el Capitan, connu pour sa difficulté (Rose, 2021).

L'escalade en salle voit le jour beaucoup plus tardivement. Il faut attendre 1960 à Leeds en Angleterre pour que le premier mur d'escalade soit mis en place. Il ne s'agit alors que d'un mur en béton avec des briques pour prise qui a pour but de reproduire un mur d'escalade sauvage (Rose, 2021).

Depuis lors, l'escalade en salle n'a pas cessé d'intéresser de plus en plus de participants, en Europe et en Amérique. Selon les dernières études, 115 salles d'escalade ont été recensées au Canada en 2021, trois fois plus qu'en 2010 où il n'y en avait que 41 (Farooqui, 2019). Quant aux États-Unis, pas moins de 762 salles sont présentes à la fin de 2022 avec une ouverture d'environ 35 nouvelles salles chaque année. Un engouement grandissant pour ce sport (CBJ, 2023) est donc observable.

- Un sport sécuritaire

La pratique de ce sport étant grandissante, la question sécuritaire entre donc au cœur du débat. C'est ainsi que certaines études se sont interrogées sur la dangerosité de ce sport. Il est bien évident que celle-ci varie grandement en fonction du type d'escalade (type sauvage ou type en salle). En effet, l'escalade sauvage représente à elle seule 10 % des accidents en montagne. Les blessures en escalade peuvent être de différentes natures (la Figure 1 : Différentes blessures types en escalade (Ecuyer & Haeni, s. d.)

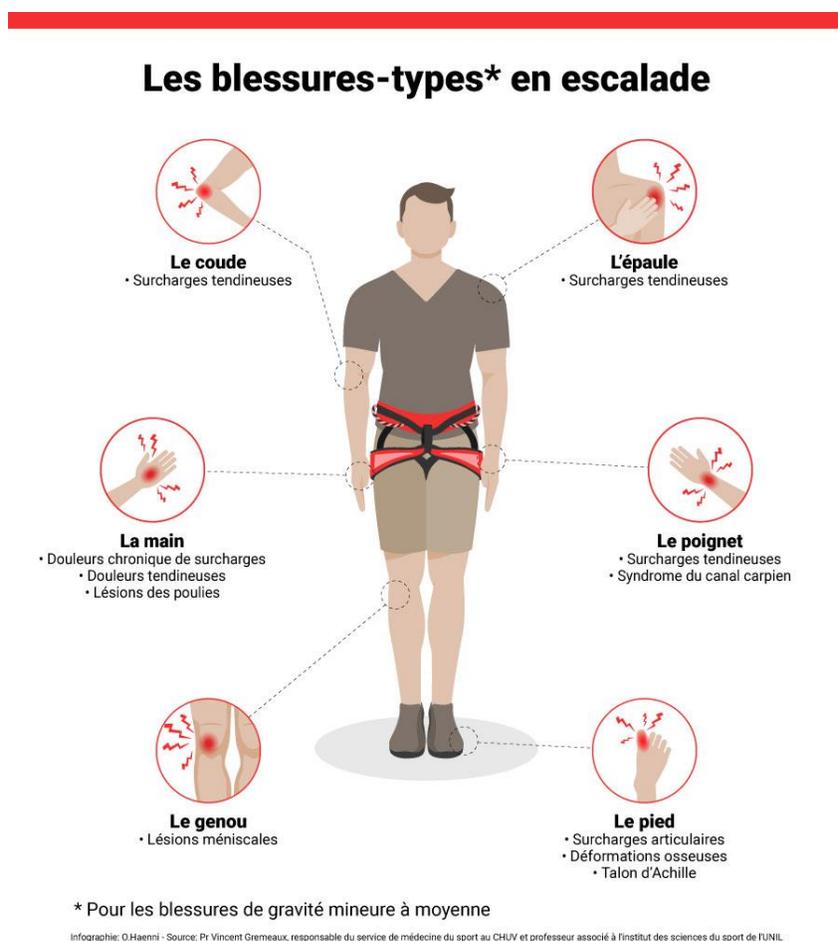


Figure 1 : Différentes blessures types en escalade (Ecuyer & Haeni, s. d.)

Le taux d'accidents est une valeur quantifiant le taux de risque et la gravité des blessures d'une activité. Ce facteur est exprimé comme étant un nombre de blessures en fonction d'une durée définie. Dans le cadre sportif, ce taux est défini aux 1 000 heures. En termes de référence, le football présente un facteur de risque élevé de 7,21 (Prieto-González et al., 2021).

Dans le cas de l'escalade, c'est la diversité de ce sport qui doit être mis en avant. Selon Rauch et al. (2019) le taux de risque d'accident est de 4 pour l'escalade sauvage. Il existe également l'escalade glaciaire ou encore l'escalade de blocs. La variabilité de ces pratiques est à l'origine du fait que le taux d'accident peut être très différent entre deux études. L'étude critique de Jones et al. (2018) tente de pallier à cela en définissant un taux d'accident moyen. Elle arrive à une valeur de 2,71 sur un total de 8 études. Le taux avoisine une valeur de 0,02 selon 2 études qui ont été menées en Allemagne (Schöffl et al., 2013) et en Angleterre (Limb, 1995). Bien au contraire l'étude de Van Middelkoop et al. (2015) décrit un taux de blessure très élevé de 13,04. Il faut comprendre que cette grande variabilité provient du fait que les études menées possèdent chacune un cadre qui leur est propre (nombre de participants, durée d'étude, localisation, type de mesures). Dans certains cas l'association de facteurs est plus à même d'accentuer les accidents. Les blessures varient également grandement en fonction des caractéristiques intrinsèques d'un grimpeur (âge, sexe, physiologie...).

En ce qui concerne l'escalade intérieure, il est important de mettre en évidence qu'il n'existe qu'un nombre limité d'études se focalisant uniquement sur cette pratique. Verhamme et al. (2023) réalisent une étude comparative dans 20 salles différentes d'escalade en France basée sur des données de 2021 et 2022. Il en ressort un taux de risque de blessure de 0,97. Dans une autre étude, Schöffl et al. (2013) montre qu'il est difficile d'associer la cause des accidents en escalade à un seul et même facteur. Une normalisation du processus de conception pour les éléments d'escalade pourrait garantir une diminution du facteur de risque. Par exemple, en ce qui concerne les matelas « Les normes françaises [...] datent de 2009 et n'imposent pas de règle » (Verhamme et al., 2023). Ainsi, il est difficile d'associer

directement les prises d'escalade comme étant la raison principale de blessures en escalade. Cependant, la mise en place d'un processus de conception et de certification stimulerait l'innovation dans le domaine des prises d'escalade. En effet cela permettrait ainsi de concevoir des prises en minimisant la quantité de matière utilisée tout en cherchant à respecter les normes avant même d'avoir fabriqué les prises.

- Un processus de création artisanal

Avec cet intérêt grandissant pour la pratique de l'escalade, il a donc fallu concevoir de plus en plus de prises d'escalade. C'est ainsi qu'est né le métier de shaper (anglicisme du mot shape : forme) (La fabrique verticale, 2017). Ces shapers sont avant tout des passionnés d'escalade qui possèdent une expérience pratique et qui ont souvent travaillé dans des métiers manuels tels que tailleur de pierre. Leur processus est le suivant :

- Imaginer la prise sur papier avec des croquis
- Réaliser des prototypes en mousse facilement façonnable
- Utiliser ces prototypes pour réaliser des moules pour les prises
- Mouler les prises et les peindre

La conception est donc ici un processus alliant le ressenti du shaper à un esthétisme pour promouvoir les ventes de la marque. La Figure 2 présente un prototype de prise réalisé par un shaper. Ce prototype est composé de mousse et façonné selon l'expérience de ce dernier. À aucun moment des mesures quantitatives ne sont réalisées sur les prises pour garantir leur efficacité (La Boutique du Léopard, 2023).

Les prises sont, la plupart du temps, moulées en polyuréthane, un des plastiques les plus couramment utilisés dans notre société. Bien que les prises d'escalades ne représentent qu'une petite partie de la production de polyuréthane, elles n'en restent pas moins problématiques. La recherche d'une production plus durable (cf. Figure 3) est importante avec l'engouement croissant de ce sport.



Figure 2 : Prototype de prises en mousse réalisé par le shaper Christophe Picard, issu de La fabrique verticale, (2017)



Figure 3 : Tryptique du développement durable, issu de Bien vivre ensemble, (2014)

- La diversité des prises

Il existe différents types de prises qui peuvent avoir des tailles et des formes très différentes (cf. Figure 4). Une présentation de quelques formes de prises d'escalade est présente ci-dessous. Ce sport étant toujours en constante évolution, cette liste n'est pas exhaustive.



Figure 4 : Différents types de prises d'escalades liste non exhaustive, issue de Valls & Placette, (2005)

Comme dit précédemment chacune de ces prises a été conçue par un shaper. Cependant la conception étant fortement influée par celui-ci, il serait intéressant de mettre en place un processus standardisé pour garantir la fonctionnalité ou non d'une prise. La garantie de qualité passe aussi par la validation de normes qui sécurisent l'utilisation d'un produit pour les consommateurs. Pour ce qui est des prises d'escalades, il n'existe pas de norme obligatoire pour vérifier la validité des prises en termes de sécurité. La norme qui fait office de guide est la norme européenne NF EN 12 572, étudiée dans cette étude pour construire la méthodologie de conception.

Un exemple pour comprendre la non-obligation du recours à la norme NF EN 12 572 est le cas du BPA (Bureau de la Prévention des accidents) en Suisse. En effet, comme le dit Monique Walter, conseillère sport du BPA: « *Aucun contrôle n'est effectué lors de l'ouverture d'une salle. Nous [le BPA] sommes calqués sur les normes européennes et les gérants doivent les respecter. En cas de problèmes, les installations sont inspectées, et si une irrégularité devait être découverte, les propriétaires des installations pourraient être inquiétés* » (Ecuyer & Haeni, s. d.). C'est donc un processus réactif et non pas proactif qui est utilisé en Suisse. Par extrapolation, il est admis que les mêmes remarques se retrouvent à l'échelle mondiale.

1.1.2 Énoncé de la problématique

Au vu de la mise en contexte précédente, l'escalade est un sport de plus en plus pratiqué. Sécuritaire et ambivalent dans son utilisation des muscles l'escalade plait grâce au défi qu'elle procure. Cependant ce sport comprend certaines pistes d'amélioration :

- Son aspect environnemental : ce sport ayant une proximité avec la nature, il paraît intéressant de développer cet aspect lors de l'escalade. Remplacer le polyuréthane des prises d'escalades par un matériau plus durable ayant une empreinte carbone plus faible serait une initiative bienvenue.
- Son manque de prédictibilité : la conception de la multitude des prises étant la plupart du temps artisanale, sans aspect scientifique, une grande variabilité est observable dans la production des prises d'escalade, influé par les choix du shaper.

Il serait intéressant au vu des connaissances actuelles de développer des prises d'escalade dans un matériau recyclable tout en développant une méthodologie de conception qui pourrait être réutilisée.

L'étude de cas est faite sur un matériau développé pour un jeune entrepreneur de l'UQAR, Guillaume Bronsard, en partenariat avec un laboratoire de Chimie. Ce matériau est un composite recyclable composé de résine Elium® 150 et de fibres de verres recyclés. Le

processus de conception susmentionné est appliqué pour le matériau précisément, mais il faut comprendre qu'il est possible de réappliquer cette méthode ultérieurement pour d'autres matériaux.

1.2 DÉFINITION DES OBJECTIFS

Au vu de ce qui a été dit précédemment, l'objectif global de ce projet est de développer une méthode de conception pour systématiser la production de prises d'escalade. Le cas d'étude de ce mémoire concerne le développement de prises d'escalade dans un matériau composite recyclable. Ce projet est innovant, car aucune étude similaire n'a été trouvée dans la littérature. La conception de prises étant artisanale, aucun processus de conception n'a été mis en place. Chaque shaper possède son propre système d'autocorrection basé sur son expérience personnelle.

Pour savoir si un nouveau matériau est correct, il faut acquérir des informations sur les prises existantes pour pouvoir les comparer par la suite aux données du nouveau matériau. Pour atteindre le but précédemment évoqué, une démarche de rétro-ingénierie est appliquée aux prises du commerce. Cette dernière consiste à utiliser les données et connaissances actuelles des prises en polyuréthanes pour pouvoir concevoir des prises plus vertes en composites recyclables. Pour que ce processus puisse être automatisé et appliqué à diverses prises d'escalades, une simulation numérique est nécessaire dans un but de standardisation.

L'objectif global de l'étude est d'appliquer une démarche de rétro-ingénierie aux prises du commerce dans le but de développer un processus pour qualifier des prises d'escalade. Le travail se subdivise selon 2 grands axes : l'un orienté sur les matériaux existants et l'autre sur le nouveau matériau (ici composite recyclable en Elium® 150 et fibres de verre).

Pour les prises existantes, il est nécessaire de :

- Fabriquer des spécimens par usinage directement dans des prises existantes
- Mesurer les propriétés des matériaux
- Mettre en place une installation expérimentale et tester les prises selon la norme NF EN 12 572
- Concevoir et fabriquer un montage pour tester les prises jusqu'à la rupture
- Obtenir des valeurs limites de rupture des prises existantes
- Intégrer les propriétés des matériaux dans un logiciel d'éléments finis
- Simuler le comportement du matériau et le comportement des prises sous charge
- Discuter des résultats

Pour les prises en matériaux innovants, il est nécessaire de :

- Fabriquer les moules des spécimens et fabriquer les spécimens
- Mesurer les propriétés
- Modéliser les prises et simuler leur comportement
- Fabriquer un moule pour la fabrication des nouvelles prises
- Fabriquer des prises d'escalade en matériau innovant
- Tester les prises conçues selon la norme NF EN 12 572
- Obtenir des valeurs limites de rupture de prises existantes

De ces différentes étapes, le processus de modélisation adéquat pour valider ou non l'utilisation d'un matériau pour la conception de prises d'escalade est déduit. Au terme des travaux, la proposition de la méthode de conception sera décrite et résumée.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 INTRODUCTION

Au vu des objectifs énoncés précédemment, il reste certaines zones d'ombres à éclaircir pour comprendre au mieux le sujet. Pour cela, il est nécessaire de s'intéresser aux travaux qui ont été faits sur l'escalade jusqu'à nos jours. Le but est de montrer que cette étude est innovante et pionnière dans le domaine. Les normes en escalade sont au cœur de l'étude. Dans un second temps, il est nécessaire d'acquérir des connaissances sur les matériaux aussi bien de référence (polyuréthane) qu'expérimentaux (Elium® 150 + fibres de verre). La troisième partie aborde le processus de Rétro-ingénierie et en quoi ce mémoire s'inscrit dans ce type de méthode.

2.2 ESCALADE ET MESURE

2.2.1 Normes sur les prises

Comme expliqué précédemment même si l'escalade sportive est un sport très ancien, sa reconnaissance par le CIO (Comité International Olympique) est plutôt récente. En effet, cela ne date que de 2010 (CIO, Comité international olympique, 2024). Cette jeunesse explique en partie la plus grande rareté d'informations à son sujet.

La réglementation de ce sport aborde différents aspects :

- Les EPI (Équipement de protection individuelle), norme NF S72-701 (AFNOR, 2008)
- Le matériel de réception, NF P90 312 (AFNOR, 2007)

- Les SAE (Structure Artificielle d'Escalade), c'est-à-dire les murs artificiels, NF S52-400 (AFNOR, 2005) et NF EN 12 572-1 (AFNOR, 2017a) et NF EN 12 572-2 (AFNOR, 2017b) / AS 2316.1.1 et AS 2316.1.2
- Les prises d'escalade, norme NF EN 12 572-3 (AFNOR, 2009) / AS 2316.1.3

À noter que toutes les normes NF font partie, comme la plupart des normes dans le domaine sportif, de la liste de normes volontaires de l'organisme AFNOR. Le ministère chargé des sports décrit lui-même ces normes : « *Lancée à l'initiative des acteurs du marché, la norme volontaire est un cadre de référence qui vise à fournir des lignes directrices, des prescriptions techniques ou qualitatives pour des produits, services ou pratiques au service de l'intérêt général* » (AFNOR, 2021). L'adhésion à ces normes n'est pas obligatoire, mais permet de définir un cadre sécuritaire pour la pratique des activités.

2.2.1.1 Réglementation utilisée dans l'étude, NF EN 12 572

Le choix de cette norme n'a pas été fait au hasard, il s'agit de la norme la plus développée et complète qui existe. En effet la seconde norme qui traite des prises d'escalade fait partie du standard australien « *AS 2316.1.3 est une norme identique à celle européenne EN 12 572-3* » (Standarts, 2021). Ce standard australien est donc postérieur et inspiré de la norme de base NF EN 12 572-3. La norme NF EN 12 572 a la particularité d'aborder différents aspects de l'escalade en termes de réglementation sécuritaire. L'absence de norme ISO (International Organization for Standardization) pousse également à choisir cette norme EN (Européenne), car elle est issue d'un consensus entre différents pays.

Ladite norme se subdivise en trois sous parties :

- La première traite des exigences de sécurité et des méthodes d'essais relatives aux SAE avec points d'assurage (AFNOR, 2017a)
- La seconde aborde les exigences de sécurité et des méthodes d'essais relatives aux pans et blocs d'escalade (AFNOR, 2017b)

- La troisième, la plus importante, décrit les exigences de sécurité et les méthodes d'essais relatives aux prises d'escalade (AFNOR, 2009)

Cette dernière décrit une liste d'essais en rotation, arrachement et fixation qu'il est conseillé de réaliser sur les prises pour tester leur efficacité. Aucune obligation n'existe quant à la réalisation de ces tests pour la commercialisation des prises puisqu'ils n'ont qu'une valeur informative. Ces tests sont développés en profondeur dans le chapitre 3.1 de ce mémoire.

2.2.1.2 Réglementation québécoise

Il n'existe aucun équivalent à la norme NF EN 12 572 au Québec ou plus largement au Canada. La norme sélectionnée pour étude fait parfois office de guide lors de la conception de prises, mais aucune obligation normative n'existe concernant ce produit.

La réglementation qui s'exerce au Québec est donc celle de l'IFSC (International Federation of Sport Climbing). Ce document décrit la déontologie du grimpeur sur blocs. Plus qu'une norme de conception, il s'agit d'un guide des bonnes pratiques du grimpeur pour que le sport se fasse dans le respect d'autrui, sans mettre en danger d'autres grimpeurs ou soi-même. Il évoque également le déroulement d'une compétition d'escalade (IFSC, 2022).

La seule réglementation sécuritaire qui existe au Québec est celle de la FQME (Fédération Québécoise de la Montagne et de l'Escalade). À l'opposé du guide de l'IFSC, ce document concerne l'escalade sauvage (FQME, 2010). Il permet d'informer la FQME de son activité extérieure pour rester dans un cadre sécuritaire tout en évoquant les bonnes pratiques à avoir en escalade sauvage. Plus qu'une branche de l'escalade, la grimpe sauvage est une pratique à part entière qui comporte ses propres codes et règles de sécurité.

2.2.2 Travaux antérieurs en escalade

Il n'existe que peu de travaux de recherche sur les prises d'escalade. Cela vient du fait notamment que l'intérêt porté à ce sport est plutôt récent. Quelques travaux réalisés sur des prises peuvent tout de même être identifiés. Ils s'organisent selon 3 grands piliers.

2.2.2.1 Amélioration de la performance des grimpeurs

La prise d'escalade est ici vue non pas comme une fin en soi, mais bien comme un moyen d'obtenir des informations sur les performances du grimpeur. Les prises d'escalade sont implémentées avec un système de mesure de forces tridimensionnel.

Ces prises sont bien décrites dans l'étude de Fuss & Niegl (2006). Il s'agit de prises classiques auxquelles ont été rajoutés des capteurs piézoélectriques unidirectionnels dans les 3 directions de l'espace. Le traitement des données permet de convertir les impulsions électriques créées par les prises sollicitées en composantes de force exprimées en Newton (N).

Plusieurs grandeurs d'études sont également définies :

- Temps de contact (s) : durée du contact entre la main et la prise (Fuss & Niegl, 2008)
- Force (N) : il s'agit du maximum de la force résultante
- COF : il s'agit du rapport entre la force de friction (FF) et la force normale (NF).
 $COF = FF/NF$ (Seifert et al., 2017)
- Facteur de lissage : il s'agit de la moyenne de la différence entre le signal du capteur de force et la valeur théorique de la force qui serait parabolique
- Coefficient de Hausdorff : il s'agit d'un coefficient assez complexe qui fait état de l'entropie du signal mesuré. Il prend en compte le temps de contact, la force ainsi que le facteur de lissage (Lechner et al., 2013).

Les forces normales et de friction sont présentes à chaque point de contact entre le grimpeur et le mur. Dans la Figure 5, la main du grimpeur exerce une composante de force verticale et une de friction perpendiculaire qui transcrit l'adhérence entre la main et la prise.

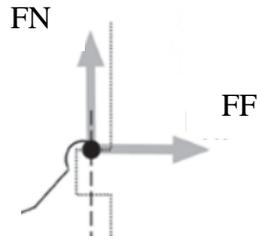


Figure 5 : FN et FF pour la main d'un grimpeur (Seifert et al., 2017).

Différentes études traitent de ces facteurs précédemment mentionnés dans le but de les étudier dans un cadre d'amélioration des performances :

- Fuss & Niegl (2008) ont étudié toutes les données précédentes avec des grimpeurs aguerris de différents niveaux pour tenter d'observer l'évolution des paramètres en fonction du niveau.
- Fuss & Niegl (2006) est une étude préliminaire qui étudie la construction de prises instrumentées pour la mesure de force.
- Lechner et al. (2013) ont réalisé une étude similaire de suivi des paramètres dans une compétition régionale pour tenter de relier les paramètres mentionnés au classement du grimpeur.
- Seifert et al. (2017) est un document étudiant toute la science qui peut exister dans l'escalade. Le chapitre 7 est plutôt intéressant traitant de l'aspect d'ingénierie qui existe derrière les prises avec le développement de prises instrumentées.

Ces prises d'escalade implémentées de capteurs de force ont permis de quantifier la valeur et l'évolution de ces différentes grandeurs en fonction du niveau du grimpeur (Maffiodo et al., 2020).

Le Tableau 1 résume les valeurs de ces grandeurs en fonction du niveau du grimpeur. Il présente les valeurs relatives de ces différentes grandeurs selon le niveau du grimpeur.

Tableau 1 : Valeurs relatives de la norme de différentes grandeurs en fonction du niveau du grimpeur

	Grimpeur débutant	Grimpeur chevronné
Temps de contact (s)	Grand	Faible
Force (N)	Grand	Faible
COF	Faible	Grand
Facteur de lissage	Faible	Grand
Coefficient de Hausdorff	Grand	Faible

Ces grandeurs sont donc des indicateurs pour suivre l'évolution du niveau d'un grimpeur. Cependant, le prix trop important de l'appareillage des prises cloisonne son utilisation à de la recherche plutôt qu'à de l'implémentation en salle pour un suivi régulier.

2.2.2.2 Interaction entre l'Homme et les prises d'escalades

Pour aller au-delà d'une amélioration des performances du grimpeur, certaines études visent à matérialiser et à quantifier l'interaction entre le grimpeur et le mur d'escalade. Les prises d'escalade sont plus que de simples outils de mesures, elles sont de véritables interfaces multisensorielles.

- Murs interactifs

Les murs interactifs sont développés dans différents pays : en Espagne (Liljedahl et al., 2005) et en Amérique avec l'Université de l'Illinois (Datta et al., 2018).

Dans le cas du « Digiwall » développé par Liljedahl et al. (2005), les prises sont interactives (visuelles et sonores). Elles permettent de diversifier la pratique de l'escalade à un public plus large en offrant une expérience innovante. La Figure 6 est une représentation

de ce à quoi pourrait ressembler le Digiwall. Les prises à utiliser par le grimpeur sont de couleur rouge.



Figure 6 : Interprétation artistique montrant à quoi pourrait ressembler le Digiwall (Liljedahl et al., 2005).

Dans le cas de Datta et al. (2018), seule la partie lumineuse de prises est exploitée. Les prises à employer par le grimpeur s'illuminent. Cela multiplie ainsi les possibilités de voie d'escalade pour les grimpeurs pour diversifier leur pratique en fonction de leurs attentes.

- Test multifactoriel

L'interaction entre l'homme et les prises d'escalade peut aussi être réalisée par la mise en place de tests multifactoriels répartis sur le grimpeur (capteurs aérobies, capteurs de mouvement, capteurs oculaires...). C'est ce que réalise Breen et al. (2023) dans son étude. Il implémente les grimpeurs de nombreux capteurs non invasifs dans le but d'obtenir un suivi en temps réel de ces différentes grandeurs. Le but est d'obtenir un profil physiologique d'un grimpeur pour pouvoir anticiper sa fatigue musculaire ou bien les mouvements à réaliser pour grimper une voie (voir Figure 7).

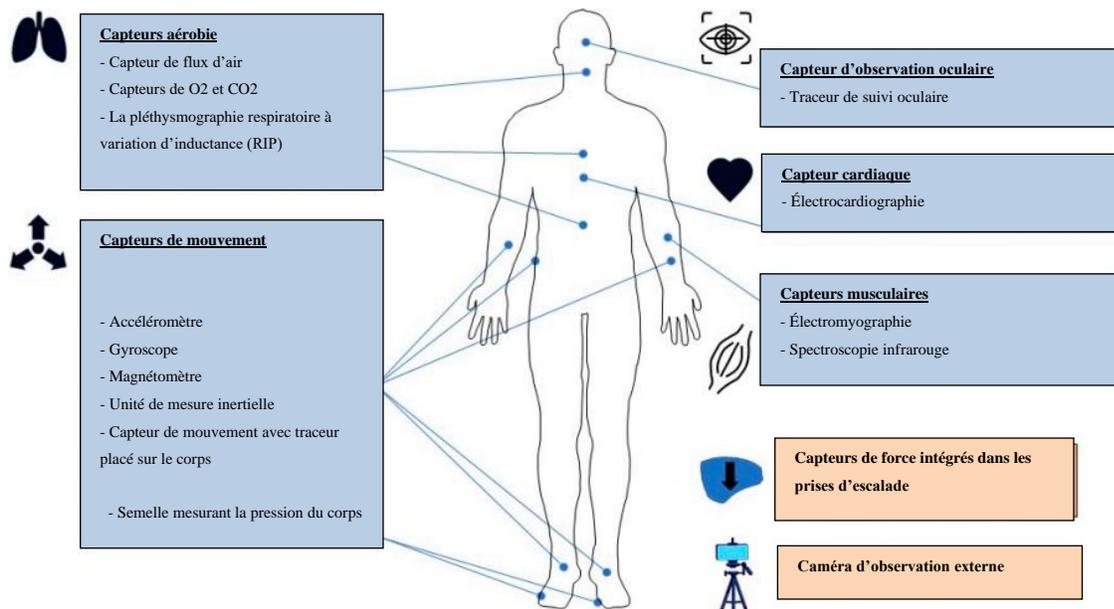


Figure 7 : Illustration des capteurs non invasifs existants pouvant être utilisés, traduit de (Breen et al., 2023).

Comme précédemment, dans le cadre de l'optimisation des performances du grimpeur, la mise en place de mur interactif est très complexe et coûteuse. Aucune étude n'existe pour le moment sur la rentabilité que pourraient avoir de tels projets dans un cadre public et non simplement dans un cadre de recherche.

2.2.2.3 Quantification et étude de la perception du grimpeur

Ce troisième et dernier type d'études concerne les documents traitants de la perception du grimpeur. Les zones d'escalade en voie ou en bloc suivent un système de cotation très subjectif et variant d'un pays à l'autre. L'ANNEXE I : Quantification du niveau en escalade, présente les différents systèmes de cotation en escalade selon les pays, leur correspondance et l'interprétation en termes de niveau que cela représente. Ces études cherchent à trouver de nouveaux liens entre la perception du grimpeur et de nouvelles grandeurs quantifiables.

On retrouve ici des références à des grandeurs évoquées précédemment : le coefficient de Hausdorff, le COF. On fait également appel à de nouvelles grandeurs comme le COP (Centre de Pression).

COP : point dynamique qui caractérise le contact entre deux solides. Il caractérise le point de contact entre deux solides où s'applique la force de pression.

Différents paramètres font l'objet d'études :

- Le matériau des prises (Fuss et al., 2020) relié au COF
- L'angularité des prises (Fuss et al., 2013) et (Fuss & Niegl, s. d.) reliée au coefficient de Hausdorff et au COP
- La forme générale des prises (Button et al., 2018), c'est ici une interprétation visuelle qui est réalisée sur la régularité ou non de la forme générale des prises

Les études précédemment citées permettent de faire des liens entre cette perception subjective qu'est la prise en main ou l'adhérence d'une prise et des grandeurs objectives et quantifiables.

Les travaux des différentes études se résument comme suit :

- Il existe une corrélation entre le COF d'un matériau et le ressenti de l'adhérence d'un grimpeur, plus le COF est faible, plus l'adhérence ressentie par le grimpeur est faible
- En ce qui concerne l'angularité d'une prise, le coefficient de Hausdorff augmente et le COP s'éloigne du mur en même temps que l'angularité de la prise augmente
- L'irrégularité d'une prise est un facteur qui améliore le ressenti d'adhérence d'un grimpeur, la surface de contact entre la main et la prise d'un grimpeur étant plus grande

Même si ces études tentent de rendre leurs modèles applicables à tout échantillon, elles ne sont à chaque fois composées que d'une vingtaine de grimpeurs. Ce nombre est parfois limitant pour en obtenir des statistiques applicables à toute la population.

Encore une fois, ce ne sont pas les prises qui sont directement le sujet d'étude, mais plutôt les athlètes en eux-mêmes. Les prises d'escalade ne sont vues que comme un moyen d'obtenir différentes informations sur la pratique sportive d'un grimpeur.

2.3 MATÉRIAUX DES PRISES D'ESCALADE

Avant de se concentrer sur le nouveau matériau, il est intéressant de faire un bilan sur la composition actuelle des prises. Le Tableau 2 (ci-dessous) réalisé à l'aide de (prises-escalade.fr, s.d.) et (Keating, 2023) résume cela :

Le matériau le plus utilisé dans le monde de l'escalade est le polyuréthane, c'est donc celui-ci qui va être soumis à une étude de rétro-ingénierie.

Tableau 2 : Résumé des caractéristiques des matériaux composant la majorité des prises d'escalade actuelle

<i>Matériau</i>	Avantage	Inconvénient
<i>Polyester</i>	Toucher réaliste Grande durée de vie	Faible résistance aux chocs
<i>Polyuréthane</i>	Bonne absorption des chocs Légèreté et maniabilité	Toucher plastique Usure rapide du grain, diminution adhérence
<i>Fibres de verre</i>	Légèreté, utile pour les gros volumes	Très couteux
<i>Thermoplastique</i>	Meilleur impact environnemental	Mêmes propriétés que le polyuréthane
<i>Bois</i>	Toucher très réaliste comme en escalade sauvage	Difficulté de mise en forme des prises Coûteux
<i>Rocher</i>	Reproduction totale de l'escalade sauvage	Masse rapidement importante Durée de vie limitée des prises

2.3.1 Polyuréthane

2.3.1.1 Synthèse du polyuréthane

Le polyuréthane est une classe de matériaux plastiques très utilisés de nos jours, notamment grâce à leur ambivalence.

La multitude de synthèses possibles de ce matériau permet d'avoir accès à des propriétés physico-chimiques, thermiques ou encore mécaniques bien différentes (Akindoyo et al., 2016). La Figure 8 montre un aperçu de cette multiplicité d'applications.

La synthèse de ces différents matériaux est assez similaire, elle résulte en la réaction entre des isocyanates et des polyols (Ye & Zhu, 2017).

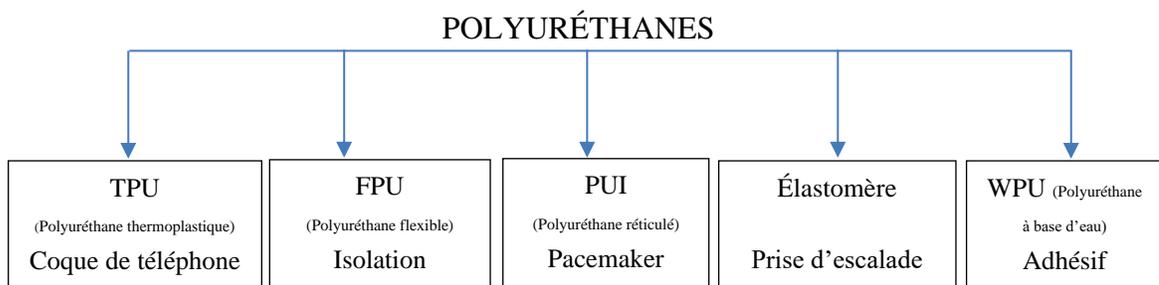


Figure 8 : Organigramme présentant les différents polyuréthanes ainsi qu'un exemple de leur utilisation, inspiré de (Akindoyo et al., 2016).

- Isocyanates :

Les Isocyanates sont une famille d'éléments qui comportent le groupe chimique NCO (groupe isocyanate). La Figure 9 est une présentation des composés de cette famille les plus connus. Les composés comportant des cycles aromatiques (MDI et TDI) sont ceux les plus couramment utilisés dans l'industrie, notamment grâce à leur bonne réactivité. Les autres composés (HDI, IPDI et HMDI) sont utiles lorsqu'une question de transparence ou de précision de couleur est nécessaire. En effet, le cycle aromatique possède une grande réactivité aux UV donnant au polyuréthane un aspect opaque (Akindoyo et al., 2016).

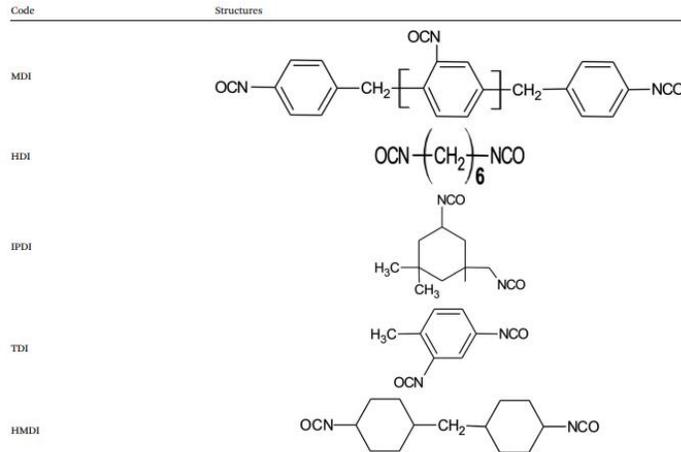


Figure 9 : Structure de plusieurs isocyanates, (Akindoyo et al., 2016)

- Polyols :

Il s'agit de composés organiques issus de la chimie du pétrole qui ont la particularité d'avoir plusieurs groupements acides. Les acides sont des composés portant le groupe fonctionnel hydroxyle (OH).

Par l'intermédiaire de l'action de catalyseurs et d'extendeurs de chaines carbonées, un élément de la famille des polyuréthanes est obtenu. L'illustration de cette réaction est présente dans la Figure 10.

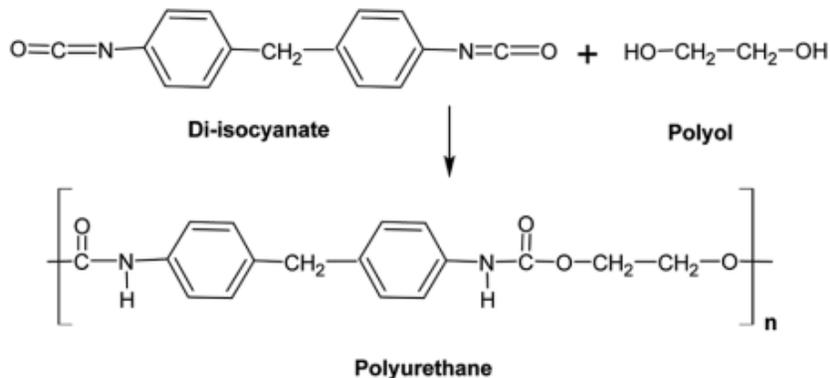


Figure 10 : Réaction classique d'obtention de PU, (Akindoyo et al., 2016)

2.3.1.2 Mise en forme du polyuréthane

En plus de la liste des composants qui peuvent modifier les propriétés d'un matériau, le procédé de mise en forme a aussi un très grand impact. Il va modifier la structure même du matériau, ce qui aura un impact sur ces propriétés physico-chimiques ou mêmes mécaniques. C'est pour cela qu'il y a une très grande variété de densité chez les polyuréthanes allant de 16 kg/m^3 pour les mousses les plus aérés jusqu'à 400 kg/m^3 pour les plus durs (Dessarthe, 1996).

Le procédé de moulage est le procédé privilégié dans le cadre de matériau plastique de ce type. Il existe une grande variété de procédés de moulage, voici les plus usités :

- Injection plastique (cf. Figure 11) :

Il s'agit d'un type de moulage utilisé lorsque le volume de pièces à produire est grand (production en série). Les billes de plastiques préalablement chauffées à travers l'injecteur sont propulsées dans un moule en deux parties (une fixe et l'autre mobile). Après un temps de pose (rapide) la partie mobile se déplace et l'unité d'éjection sort la pièce (Bensaada, 2019)

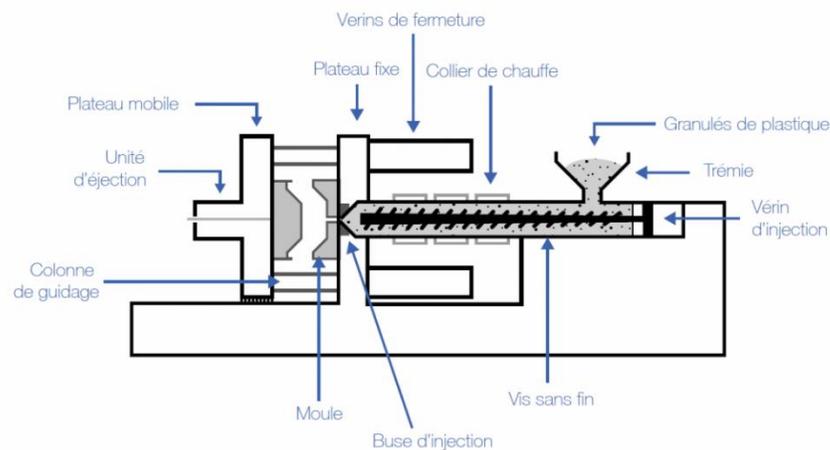


Figure 11 : Procédé de moulage par injection plastique (Plastisem, 2024).

- Moulage par gravité (cf. Figure 12) :

Ce type de moulage est à privilégier lorsque la production est plus faible en quantité. Dans un cadre de recherche, c'est le procédé à privilégier, car il est plus simple à mettre en place. À l'inverse du dernier procédé où le plastique liquide est injecté dans le moule grâce à la pression c'est ici la gravité qui va permettre de mouler la pièce. Préalablement chauffé, le plastique est versé dans un moule en plusieurs parties pour permettre un démoulage plus aisé (Bensaada, 2019).

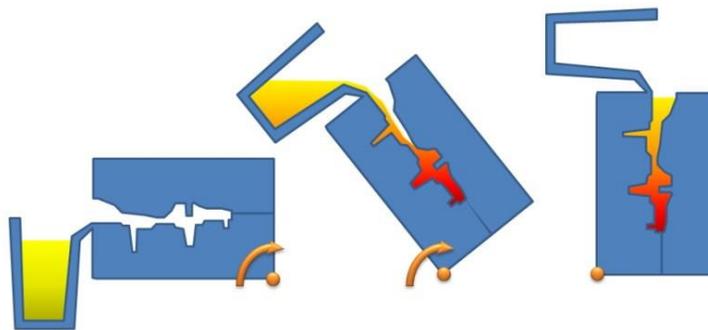


Figure 12 : Procédé de moulage par gravité (Tomasevic, 2020).

2.3.1.3 Recyclage

Le marché du polyuréthane (PU) représente une part non négligeable de l'empreinte carbone humaine. En 2021, le marché de ce composant représentait 220 000 tonnes de déchets (Paschal, 2022) uniquement en comptabilisant les mousses de PU. Un chiffre faramineux qui représente plus de 50 % de la production annuelle de ce matériau (Kemona & Piotrowska, 2020). Un bref résumé des différentes méthodes de recyclage du PU est présente dans la Figure 13.

La famille des polyuréthanes est issue de composés pétrochimiques. Elle représente un grand manque à gagner en termes d'énergie thermique. Certains polyuréthanes peuvent même être dépolymérisés en utilisant un complexe enzymatique par le biais d'un procédé de

glycolyse par exemple. Ces différents procédés sont résumés et expliqués en détail dans l'étude de Kemona & Piotrowska (2020).

Depuis peu, il a même été possible de synthétiser du polyuréthane sans isocyanates à l'aide de réaction autour de la chimie de l'eau. Cela réduit ainsi la part de réactifs chimique issue de la chimie pétrolière. On peut citer un projet de l'Université de Liège qui remplace ce composant toxique par des carbonates cycliques (Bourgignon et al., 2022). La recherche sur la transition verte du polyuréthane existe donc.

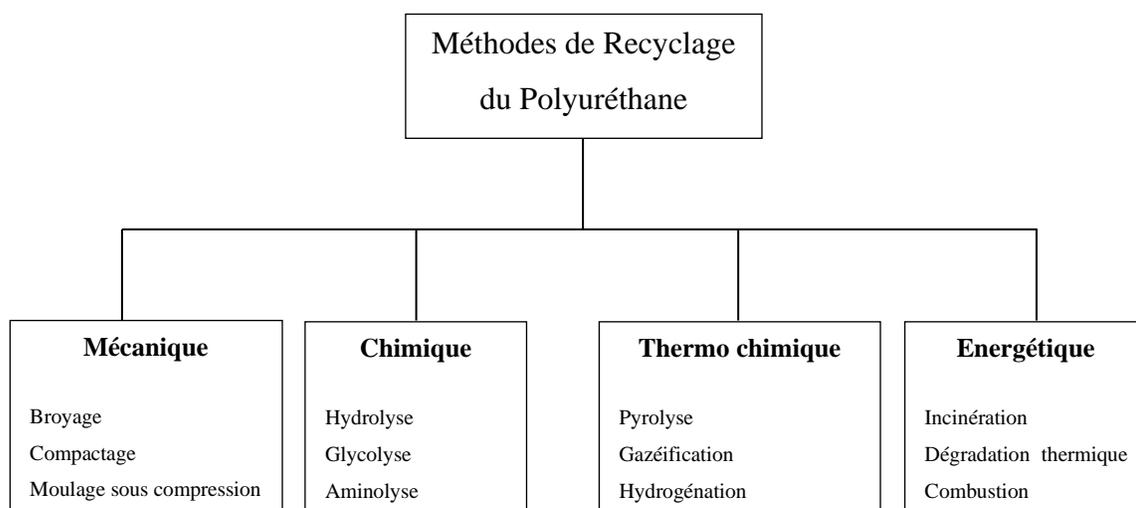


Figure 13 : Différentes méthodes de recyclage du polyuréthane, inspiré de (Zia et al., 2007)

La raison derrière le non-recyclage du polyuréthane est principalement économique. Il est beaucoup plus simple pour une entreprise d'enfouir ces déchets que de les recycler. Cela provient du fait que le rendement des méthodes de recyclage n'est pas en adéquation avec le prix des composants ou des installations nécessaires pour réaliser le procédé. Le recyclage énergétique (incinération, combustion...) présente également un problème d'émission de gaz à effet de serre.

Cette question du recyclage d'un produit devra bientôt faire partie des critères de conception durant la genèse de ce produit à cause du réchauffement climatique qui représente un véritable fléau dans notre société.

2.3.2 Composite innovant

Le but de ce projet est d'appliquer un processus de rétro-ingénierie à des prises d'escalade en composite innovant pour pouvoir dégager une méthode de conception.

2.3.2.1 Synthèse du composite

Le principe d'un composite est de mélanger une résine avec une matrice qui va durcir sous l'effet d'un catalyseur pour donner des propriétés inédites au matériau. Il existe différents types de composites en fonction des fibres (cf. Figure 14). Les deux grands types sont les composites organisés (tissage) ou les composites quasi isotropes (répartition en mat aléatoire). Dans le cas d'étude, il s'agit d'Elium® 150 avec des fibres de verre le tout polymérisé sous l'effet du Perkadox GB-50L pour donner un composite aléatoire à mats coupés.

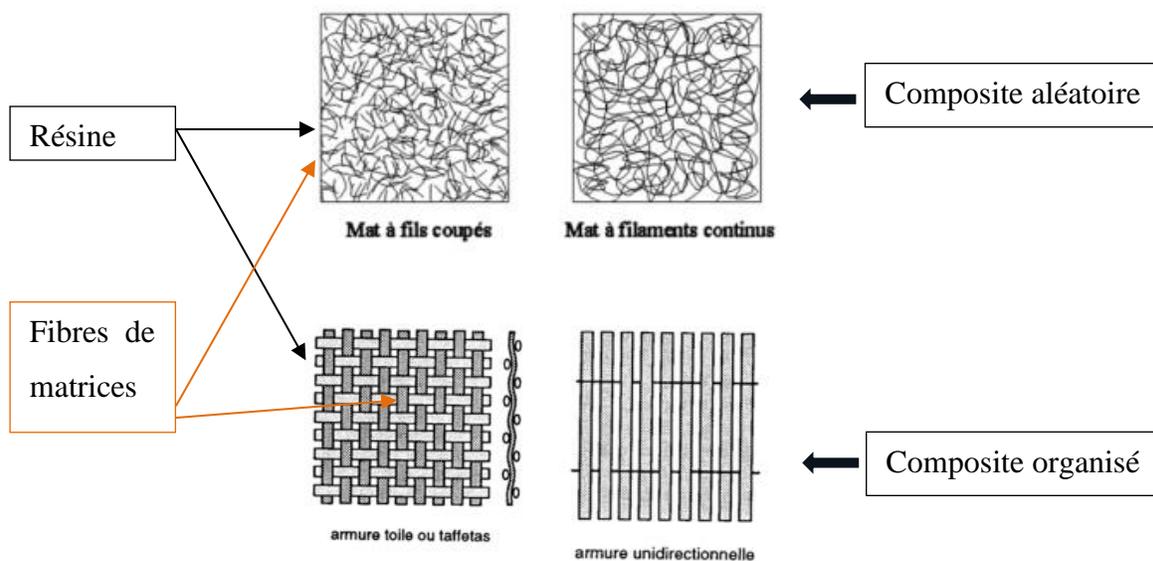


Figure 14 : Différents types de composites (Ngo, 2023)

- Résine Elium® 150:

Cette résine est développée par l'entreprise française Arkema®. La particularité de celle-ci est son ambivalence. En fonction du type de monomères choisis et du processus, les caractéristiques de l'Elium® peuvent grandement varier. Une diversité d'applications est donc possible, des pales d'éoliennes aux coques de bateaux. Cette résine possède également de très bonnes caractéristiques mécaniques, et tout particulièrement une bonne résistance. Cela en fait un candidat de choix pour la conception de prises d'escalade (Arkema, 2022). La composition chimique de cette résine est gardée secrète par l'entreprise.

Une partie des propriétés physico-chimiques, thermodynamiques et mécaniques de la résine est disponible dans les données techniques de l'entreprise (Arkema, s. d.). Cependant, il ne faut pas oublier que la polymérisation change totalement les propriétés du matériau.

- Fibres de verre

Les Fibres de verre sont des composants de plus en plus utilisés dans la conception mécanique. Même si le verre est lui plutôt fragile dans l'imaginaire collectif ; l'ajout de fibres de verre à haut taux de silice permet d'obtenir des matériaux avec des propriétés étonnantes. Ces dernières peuvent parfois être plus résistantes que l'acier. Les propriétés de ces fibres sont disponibles dans l'étude de Berthereau & Dallies, (2008), mais encore une fois ce sont les propriétés du mélange qui sont intéressantes.

Dans ce mémoire, ce sont des fibres recyclées en mât à fils coupés. La Figure 15 offre une représentation de ces fibres de verre à mats coupés.



Figure 15 : Fibres de verre coupées (Air Tech, 2024).

- Perkadox GB-50L

Le Perkadox GB-50L est un catalyseur utilisé dans le durcissement des résines thermodurcissables et commercialisé par l'entreprise Nouryon. Comme pour la résine, le processus d'obtention du composé est gardé secret par l'entreprise. Ce catalyseur est sans phtalate. Ce composant a pour intérêt d'accélérer la rapidité de réaction de durcissement. Il est produit en Amérique du Nord (Nouryon, 2022a). Il se présente sous forme de poudre ajoutée au mélange résine – matrice. Sa formule chimique est présentée sur la Figure 16.

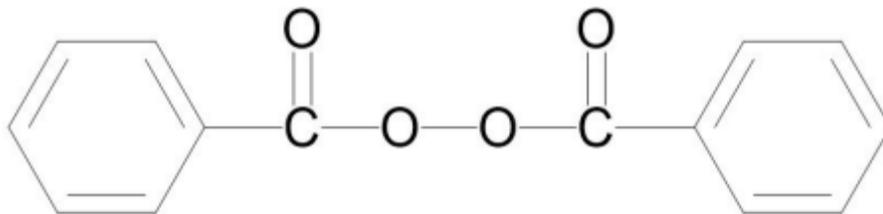


Figure 16 : Perkadox GB-50L, Dibenzoyl de peroxyde (Nouryon, 2022b).

2.3.2.2 Mise en forme

Comme expliqué précédemment, le matériau composite se présente sous la forme d'une résine dans laquelle baignent des fibres de verre coupées. Le procédé de mise en forme utilisé est un procédé de moulage par gravité. (c f 2.3.1.2)

Le mélange de la résine Elium® 150 avec les fibres de verres coupés et le catalyseur GB-50L se présente sous forme d'un liquide visqueux obtenu de manière expérimental. C'est bien le moulage par gravité qui est le procédé le mieux adapté. Le moule avant moulage est visible à la Figure 17. La Figure 18 présente le processus de moulage par gravité pour la prise d'escalade avec le composite préalablement coulé dans le moule de la Figure 17.



Figure 17 : Moule expérimental de prises d'escalade vide pour la résine Elium® 150

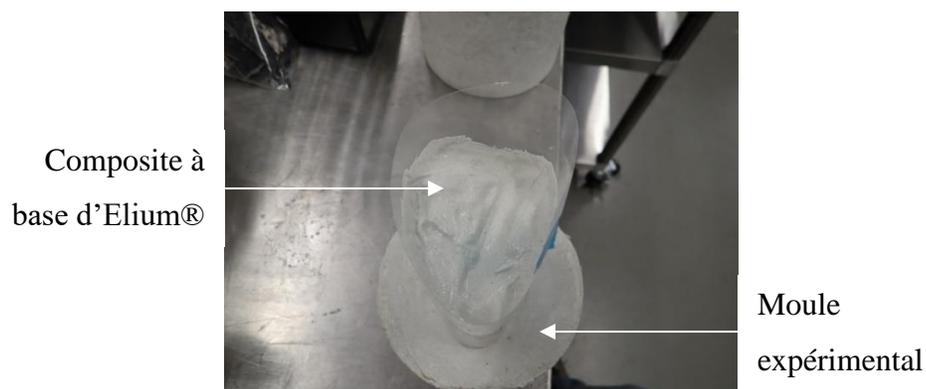


Figure 18 : Moule expérimental de prises d'escalade rempli par la résine Elium® 150

Il est à noter que les proportions du mélange des composites sont gardées secrètes par l'entreprise de Guillaume Bronsard.

Le résultat du moulage est observable à la Figure 19. La résine est ici incolore, mais il est possible d'y ajouter des colorants. Il est à noter que pour le reste de l'étude le matériau sera bleu. Le dosage et le type de colorant seront les mêmes pour que cela ne puisse pas influencer sur les résultats.



Figure 19 :Prise d'escalade en polyuréthane (à gauche) et Elium® 150 (à droite)

2.3.2.3 Recyclage

Le véritable changement qu'amène la résine Elium® est la possibilité de la recycler. En effet, la vie de produits réalisés en résine Elium® est vue comme cyclique. La résine avec des fibres et catalyseurs est d'abord polymérisée. Les dosages sont propres à chaque utilisation. Une fois que le produit a échu sa date d'utilisation il est recyclé soit :

- mécaniquement en broyant et en injectant la poudre dans de la résine liquide pure en complément de la matrice

- chimiquement en dépolymérisant la résine Elium® par chauffage

La Figure 20 est une illustration du cycle de vie de composés fabriqués avec la résine Elium®. Ce procédé s'organise selon 6 étapes :

1. Formulation
2. Polymérisation
3. Fabrication de composite thermoplastique
4. Définition du besoin du client en fonction du secteur
5. Utilisation pour une application
6. Recyclage

Les prises d'escalades font partie d'un procédé de recyclage mécanique. Après l'utilisation en salle, les prises sont récupérées, broyées et réinjectées dans une nouvelle résine pour recommencer le processus.

2.3.3 Critères de limitation en statique

Il ne faut pas perdre de vue que l'objectif principal est de développer une méthode de conception qui réduit le nombre de versions d'un même produit à fabriquer. Plus que choisir des matériaux recyclables, cela passe par le développement de modèles CAO qui doivent être testés. Des critères de limitations en statique sont utilisés. Ils permettent de déterminer des facteurs de sécurité qui quantifient si la contrainte présente dans un matériau se rapproche de la limite de référence du matériau. Ces critères sont empiriques, ils sont donc nombreux en fonction du type du matériau et du type de chargement étudié.

Les différences qui existent entre les deux matériaux étudiés (polyuréthane et composite) sont désormais connues. Il faut maintenant arriver à les quantifier et prédire leur comportement. C'est à ce niveau que les critères de limitation ont un rôle. Ils permettent de savoir avec une bonne précision sous quelle contrainte la rupture du matériau va débiter.

Pour identifier le critère à utiliser, il faut tout d'abord connaître le type de matériau. Les informations qui suivent sont tirées du livre de E Dowling, (2013).

De façon générale un critère de limitation en fatigue se définit à partir d'une contrainte de référence qui doit être obtenue par calcul et qui est définie comme suit (1).

$$\sigma_D = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (1)$$

Le facteur de sécurité est défini selon (2) à l'aide des valeurs matériaux (limite élastique, limite ultime...)

$$X = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{\sigma_D} \quad (2)$$

2.3.3.1 Matériau ductile

Un matériau est dit ductile lorsque : ($\epsilon_{\text{rupt}} > 5\%$) avec ϵ_{rupt} , la déformation à rupture. Dans ce cas, le critère de Von Mises est largement privilégié notamment grâce à sa simplicité d'implémentation numérique.

La contrainte de Von Mises (σ_{VM}) est définie par l'équation (3) :

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3)$$

Le facteur de sécurité (X) est donc le rapport entre la limite élastique et cette contrainte (4) :

$$X = \frac{\sigma_0}{\sigma_{VM}} \quad (4)$$

2.3.3.2 Matériau fragile

Un matériau est dit fragile lorsque : ($\epsilon_{rupt} < 5\%$) avec ϵ_{rupt} , la déformation à la rupture. Dans ce cas, le critère de Coulomb-Mohr est privilégié.

Le modèle de Coulomb-Mohr est ainsi défini (5). Selon ce modèle il existe une dépendance affine entre le cisaillement et la contrainte d'un matériau. Cette dernière provient de la différence qui existe entre la limite de traction et de compression d'un matériau. Dans certains cas, comme celui du béton, la limite en compression peut être 20 fois supérieure.

$$|\tau| + \mu\sigma = \tau_i \quad (5)$$

Avec m défini (6) :

$$m = \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} \quad (6)$$

μ , τ_i et m sont des constantes propres à chaque matériau

Selon ce modèle, trois quantités vont servir à établir la contrainte de Coulomb-Mohr (7.a) (7.b) et (7.c) :

$$C_{12} = \frac{1}{1-m} [|\sigma_1 - \sigma_2| + m(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (7.a)$$

$$C_{23} = \frac{1}{1-m} [|\sigma_2 - \sigma_3| + m(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (7.b)$$

$$C_{31} = \frac{1}{1-m} [|\sigma_3 - \sigma_1| + m(\sigma_3 + \sigma_1)] \quad (7.c)$$

Ces équations se simplifient grandement, lorsque l'on se place dans le cas où les deux limites en traction et compression sont égales. Elles deviennent (8.a), (8.b) et (8.c):

$$C_{12} = |\sigma_1 - \sigma_2| \quad (8. a)$$

$$C_{23} = |\sigma_2 - \sigma_3| \quad (8. b)$$

$$C_{31} = |\sigma_3 - \sigma_1| \quad (8. c)$$

La contrainte de Coulomb Mohr est définie comme étant la plus grande valeur parmi C_{12} , C_{23} et C_{31} (9) :

$$\sigma_{CM} = \text{MAX}(C_{12}, C_{23}, C_{31}) \quad (9)$$

Le facteur de sécurité (X) se définit comme précédemment selon (10) :

$$X = \frac{\sigma_u}{\sigma_{CM}} \quad (10)$$

Avec σ_u la contrainte ultime.

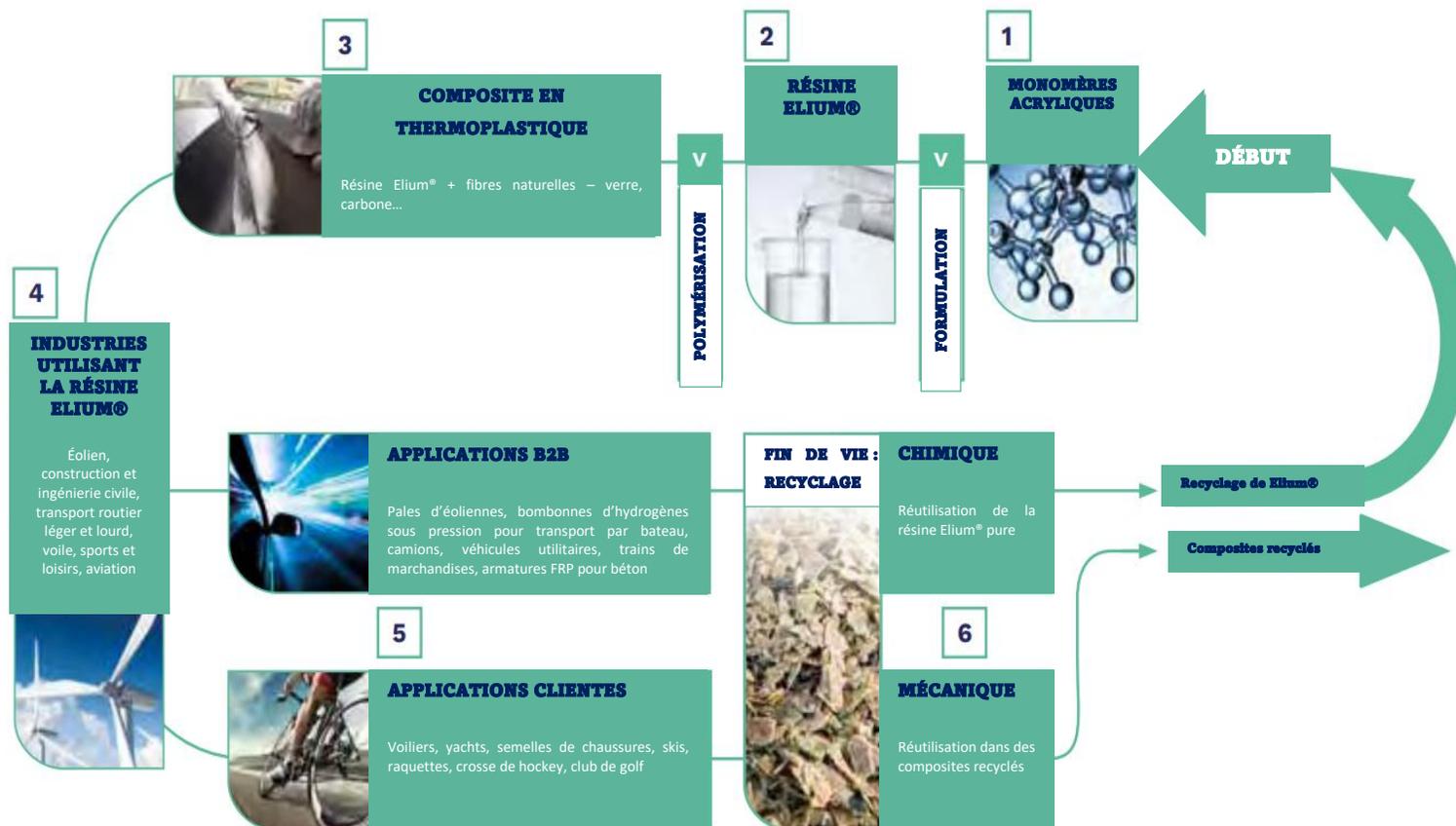


Figure 20 : Schéma du cycle de vie de la résine Elium®, traduit de (Arkema, 2022)

2.4 RÉTRO-INGÉNIERIE

2.4.1 Généralité du processus

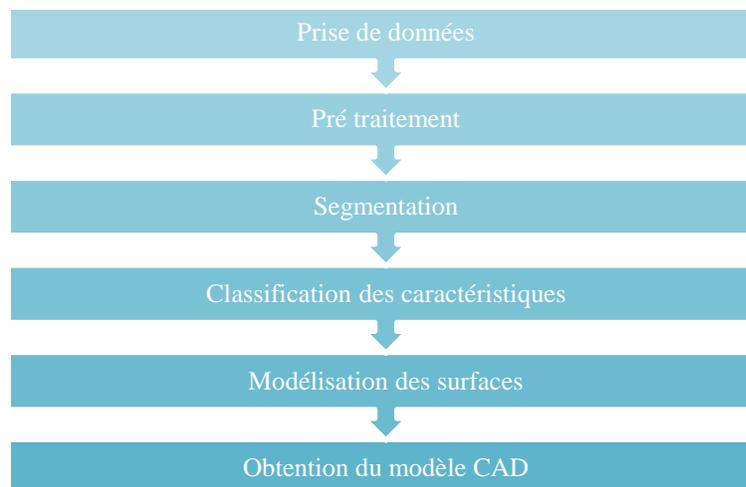
Plus qu'un projet de développement d'un matériau, cette recherche traite également de la mise en place d'une méthode de conception. Une approche de rétro-ingénierie est ici requise. La conception par rétro-ingénierie a vu le jour en même temps que le développement des modèles CAD dans les années 90.

Ce type de conception est même devenue « le moyen le plus courant pour transmettre des informations dimensionnelles et géométriques sur des pièces, des machines, des plans et bien d'autres », traduit de l'étude de Buonamici et al. (2018). Il existe bien évidemment une multitude de méthodes résumées ci-dessous.

2.4.1.1 Les différentes étapes de la méthode

Un processus de reconstruction CAD par rétro-ingénierie s'organise toujours autour des mêmes étapes (cf. Tableau 3) :

Tableau 3 : Étapes d'un processus de rétro-ingénierie, adapté de (Buonamici et al., 2018) et (Varady et al., 1997).



La segmentation est la partie clé de ce processus mentionné précédemment. La surface avec des éléments finis est discrétisée pour pouvoir reconstruire au mieux le modèle. C'est dans cette dernière partie d'obtention du modèle CAD que la diversité des méthodes se concentre. Il existe une variété hétérogène de méthodes dont voici le bilan (Tableau 4).

2.4.1.2 La multiplicité et l'hétérogénéité des méthodes

Les méthodes de rétro-ingénierie s'organisent selon 2 grands types :

- Méthodes basées sur la fonctionnalité de la reconstruction
- Méthode dite libre

Un aperçu général de ces méthodes est présent dans le Tableau 4 réalisé à l'aide de (Buonamici et al., 2018).

Tableau 4 : Présentation et comparaison des différentes stratégies en CAD, adapté et traduit de (Buonamici et al., 2018)

Type de méthodes	Stratégie CAD	Avantages	Inconvénients
Basé sur la fonctionnalité	Modèle indépendant de la surface	Surface conforme à la prise de mesure, faible charge de calcul requise	Absence des intentions de conception (contraintes géométriques et relations), efficacité limitée par la segmentation choisie
	Modèle à contraintes limites (définis par l'utilisateur)	Récupération supplémentaire des intentions de conceptions, identification des contraintes (utilisation de l'expertise humaine)	Nécessité de l'utilisateur pour valider les contraintes, formulation mathématique complexe nécessitant une forte charge de calcul

	Modèle à contraintes limites (automatique)	Récupération supplémentaire des intentions de conceptions, identification des contraintes (niveau requis plus faible pour l'utilisateur)	Difficulté à la mise en place d'un processus de détection des contraintes automatiques, formulation mathématique complexe, très forte charge de calcul pour l'automatisation
	Modèle à base d'esquisses et lignes 2D	Simplicité de traiter des sections 2D par rapport à des objets 3D, très utile en mécanique	Importance de la sélection de bonnes sections 2D par l'utilisateur, efficacité dépendant de ces géométries
	Modèle basé sur les connaissances	Récupération supplémentaire des intentions de conceptions, exploitation de la littérature et des connaissances préalables, utilisation de modèles CAO paramétriques	Limitation en termes d'implémentation à des modèles plus simples et des applications très spécifiques
Libre	Modèle de création libre	Génération du modèle très conforme au modèle 3D, faible interaction de l'utilisateur	Pas d'identification de caractéristiques de CAD avec cette stratégie

2.4.1.3 La course à l'automatisation

Plus récemment, en plus de la recherche de la stratégie CAD la plus adaptée au cas d'étude, c'est une recherche de modèles automatisés pour améliorer toujours plus la performance des systèmes qui est présente. Ainsi, différents MDRE (Model Driven Reverse Engineering) ont vu le jour. Les plus connus sont le modèle KDM (Knowledge Discovery

Metamodel) et le modèle ASTMD (Abstract Syntax Tree Metamodel). Ces deux modèles, bien qu'ils possèdent leur organisation propre, sont très souvent complémentaires.

- KDM (cf. Figure 21)

Ce modèle s'arrange selon différentes strates interdépendantes qui s'organisent toutes autour du cœur source (Khachouch et al., 2023). La Figure 21 est une interprétation visuelle de ce modèle. Le modèle possède une organisation concentrique, il se parcourt de l'extérieur vers l'intérieur en transformant ainsi le concept d'abstrait en un code.

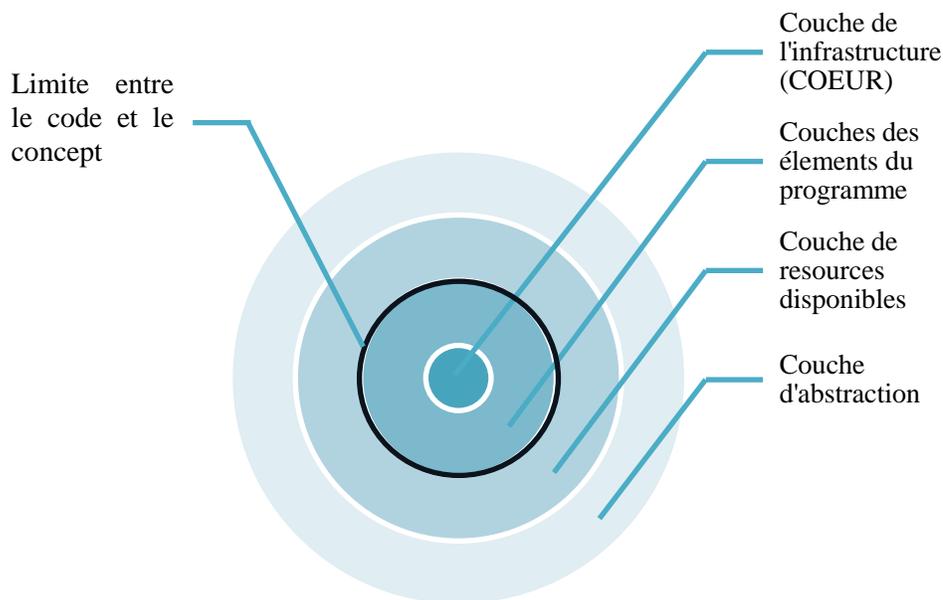


Figure 21 : Explication de la structuration KDM, adapté de (KDM, s. d.)

- Abstract Syntax Tree Metamodel (ASTMD) (cf. Figure 22)

Ce modèle organise et facilite la communication de métadonnées. Il divise les métadonnées selon 3 catégories : GASTM (généralités du code), SASTM (tâches spécifiques du code) et le PASTM (fonctionnalités requises du modèle). À l'inverse d'une organisation

de type concentrique du modèle KDM, son organisation est séquentielle sous forme d'arbre de choix (Deltombe et al., s. d.).

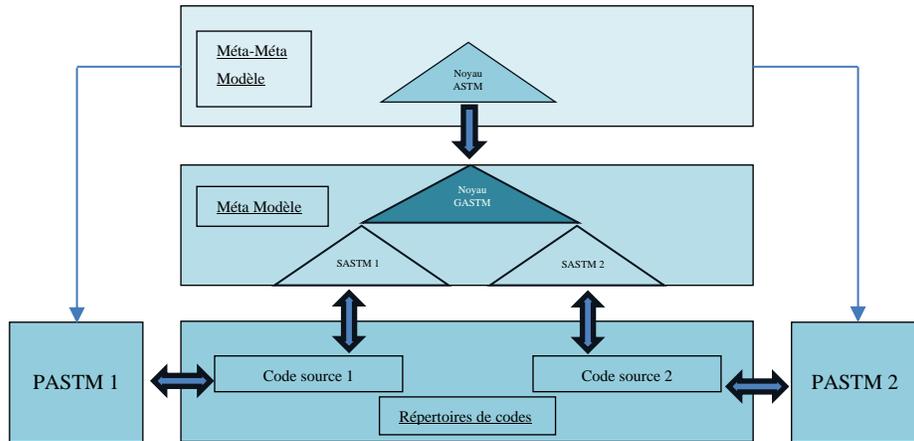


Figure 22 : : Explication de la structuration ASTMD, adapté de (Khachouch et al., 2023)

Ainsi, il existe une multiplicité de méthodes en rétro-ingénierie. L'une d'entre elles est détaillée dans le cas de cette étude en la situant par rapport aux différentes méthodes présentées.

2.4.2 Choix de la MDRE

Même si l'approche de rétro-ingénierie est propre à ce cas d'étude, sa réflexion et son organisation sont basées sur une étude en particulier, présentée ci-dessous. Il s'agit de l'étude Karganroudi et al. (2022).

Cette étude a pour but d'améliorer le processus de maintenance des roues d'engrenage de machines. Menée dans les locaux de l'UQAR, son but est de numériser des roues dentées usées pour pouvoir, par un processus de reconstruction numérique, recréer la roue dentée sans les traces d'usures. Sa méthodologie est présentée dans la Figure 23.

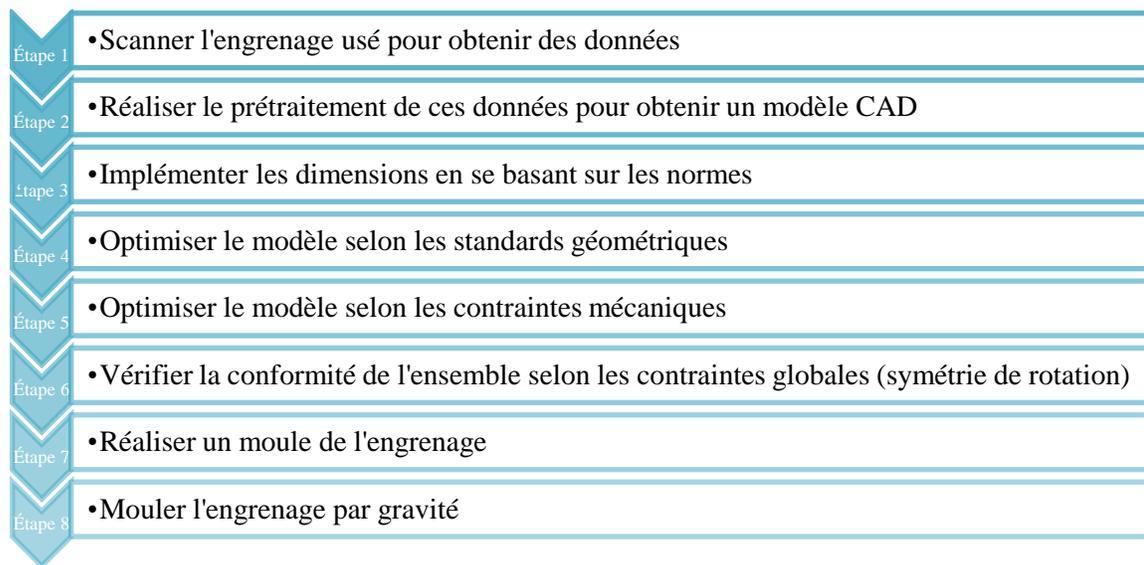


Figure 23 : Méthodologie de rétro-ingénierie, adapté de (Karganroudi et al., 2022).

Au vu de ce qui a été évoqué précédemment, il s'agit d'un modèle de rétro-ingénierie par fonctionnalité à contrainte limite (défini par l'utilisateur). Ce même choix de méthode est développé dans ce mémoire (cf. chapitre 3.1).

Bien que la présentation de sa méthodologie soit ici linéaire et séquentielle, elle présente dans la réalité différentes boucles de rétroaction. La présence d'une vérification de conformité (étape 6) pour valider les optimisations précédentes avant la réalisation du moule est donc nécessaire.

La méthode employée durant ce mémoire n'est pas la même que celle présentée dans la Figure 23, mais elle s'en inspire. La Figure 24 présente l'adaptation du processus de rétro-ingénierie à ce mémoire. Cette suite d'étapes permet de mettre en lumière la méthode employée.

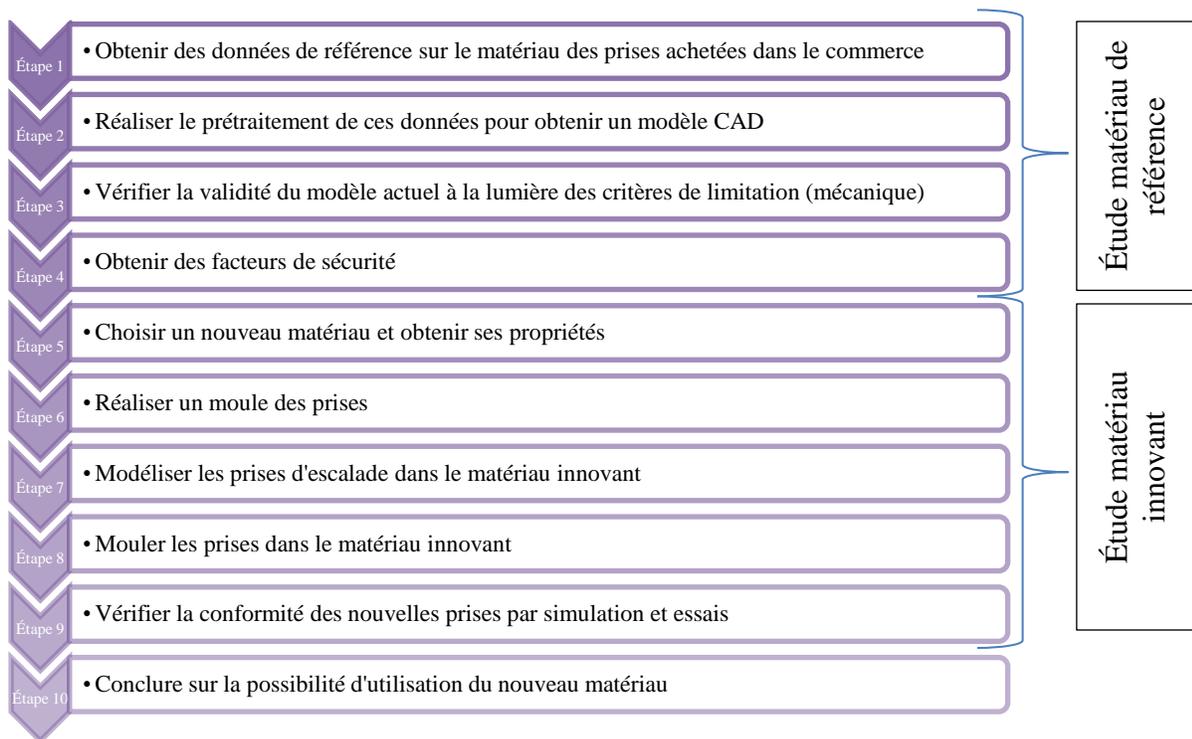


Figure 24 : Méthodologie de rétro-ingénierie appliquée à ce mémoire et inspiré de la figure 23

2.5 RÉSUMÉ

Ce chapitre a donc eu une visée informative faisant un bilan sur les connaissances actuelles. Il permet d'observer que le sujet de recherche étudié ici est innovant. Pour l'instant, aucune recherche sur la normalisation de prises d'escalades n'a été réalisée. Les prises, pour la plupart en polyuréthane, ne sont vues que comme des outils d'acquisition d'informations pour optimiser les performances des grimpeurs. Ici, les prises d'escalade sont placées au centre de l'attention. Elles sont le sujet principal et non pas un moyen d'obtenir des informations. Elles sont étudiées sous toutes les coutures selon un processus de rétro-ingénierie pour quantifier au mieux la validité des nouvelles.

CHAPITRE 3

MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1 INTRODUCTION

Comme expliqué précédemment, cette recherche développe un procédé que doit suivre un matériau pour être conforme à une utilisation sur des prises d'escalade. Il se base sur une méthode par rétro-ingénierie.

Les données de référence sont obtenues en se basant sur le polyuréthane, matériau le plus utilisé pour la production de prise d'escalade de nos jours. Les données disponibles de ce matériau sont de 3 natures :

- Propriétés mécaniques (module de Young, coefficient de poisson, résistance maximale, résistance à la rupture)
- Données sécuritaires (issues de la norme NF EN 12 572)
- Données d'utilisation (quantification d'autres données comme la dureté)

Le même type de données est mesuré pour le matériau à tester (ici, un mélange d'Elium® 150 avec des fibres de verre). Ces résultats sont implémentés dans un modèle numérique de prise d'escalade en observant ou non une concordance des résultats. La validité du matériau est donc vérifiée :

La Figure 25 est une illustration visuelle de ce processus qui permet de mieux comprendre le déroulement de la recherche et met en avant les différents nœuds de réflexion.

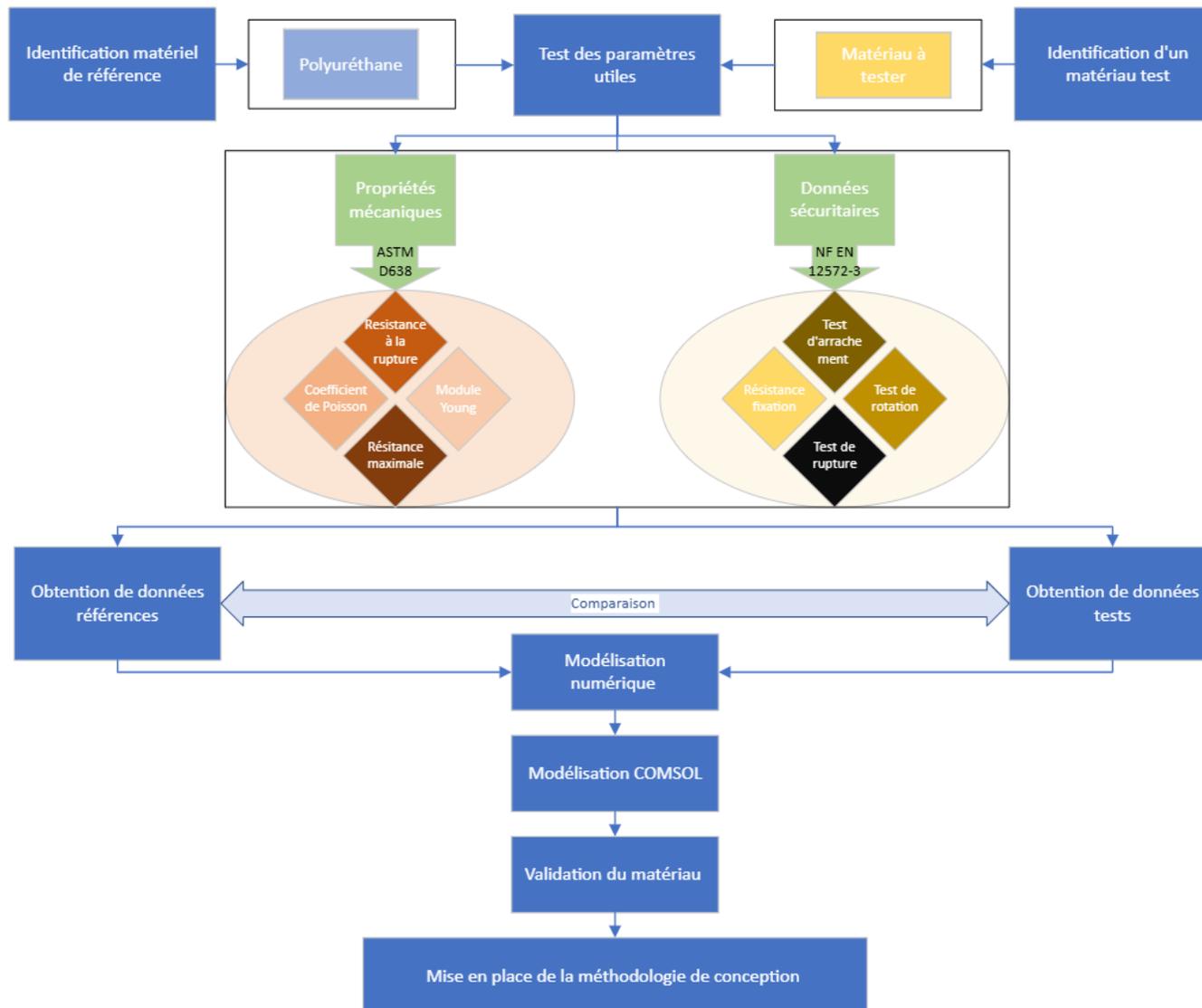


Figure 25 : Organigramme de la méthodologie de recherche

Il existe deux grands types de tests détaillés par la suite : les tests de propriétés mécaniques et les données sécuritaires de la norme NF EN 12 572. Un troisième et dernier point d'ombre évoqué est le développement de la méthodologie de conception, leitmotiv de cette recherche.

3.2 DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

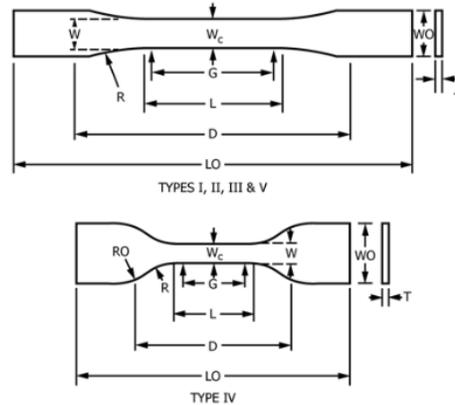
Les différentes propriétés (module de Young, coefficient de poisson, résistance maximale et résistance à la rupture) sont des données qui permettent de caractériser le comportement mécanique des matériaux.

Pour déterminer ces grandeurs, différentes prises de mesures doivent être réalisées sur un échantillon de matériaux. Ces échantillons sont appelés des éprouvettes et possèdent une forme bien précise qui a la particularité de concentrer les efforts dans la partie centrale des éprouvettes, là où un extensomètre de précision est positionné. Ces tests sont réalisés sur des machines de traction dont le calibrage et l'étalonnage sont détaillés par la suite.

3.2.1 Éprouvettes normées pour plastique ASTM D638

La forme de ces éprouvettes est définie par une norme ASTM (American Society for Testing and Materials) D638 (Zainab, 2019). Cette dernière s'applique aux matériaux plastiques renforcés et non renforcés. Dans la norme il existe plusieurs types d'éprouvettes avec différentes formes et tailles pour permettre d'ajuster au mieux la rupture du matériau dans la partie centrale de l'éprouvette. Pour faire le choix parmi ces modèles d'éprouvettes, il est nécessaire de pouvoir borner la valeur du module de Young pour sélectionner le type d'éprouvette. La Figure 26 présente différentes éprouvettes selon ladite norme.

 **D638 – 14**



Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)⁴

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}		
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{B,C}	
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^C	
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)	
WO —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)	
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	± 0.25 (± 0.010) ^C	
G —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	± 0.13 (± 0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)	
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^C	
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

Figure 26 : Différents modèles d'éprouvettes selon la norme ASTM D638, (Zainab, 2019).

Il existe 5 types d'éprouvettes comme vues ci-dessus qui possèdent chacune leur contexte d'application. Le Tableau 5 présente ces différentes utilisations. Dans ce cas, les éprouvettes de type I sont majoritairement utilisées pour mouler le matériau composite et les éprouvettes de type IV pour extraire les échantillons des prises existantes.

Pour vérifier la validité du module de Young obtenu, c'est l'étude de Larson, (2019) que l'on utilise. Cette dernière étude permet d'établir un lien entre la dureté d'un matériau et son module de Young en fonction de la dureté du matériau. Il s'agit d'une sécurité supplémentaire pour valider les résultats obtenus.

La dureté mesurée dans ce cas est la dureté Shore. Ce type de dureté est réservé aux plastiques (mou et dur) qui sont eux-mêmes bien plus mous que les métaux mesurés par une dureté Rockwell ou Vickers. La dureté Shore se subdivise en différentes catégories selon le classement ci-dessous (Figure 27).

Tableau 5 : Classification des types d'éprouvettes en fonction de leur utilisation

Modèle	Utilisation
Type I	Modèle standard à privilégier au maximum
Type II	Si pas de rupture du Type I dans la plage d'essai utiliser le Type II
Type III	Privilégier dans le cas où le matériau ne peut pas être disponible en fine couche (>7 mm)
Type IV	À privilégier dans le cas où la quantité disponible de matériau est limitée
Type V	Éprouvettes de petite taille, privilégiées pour les feuilles de matériau ou les matériaux très élastiques

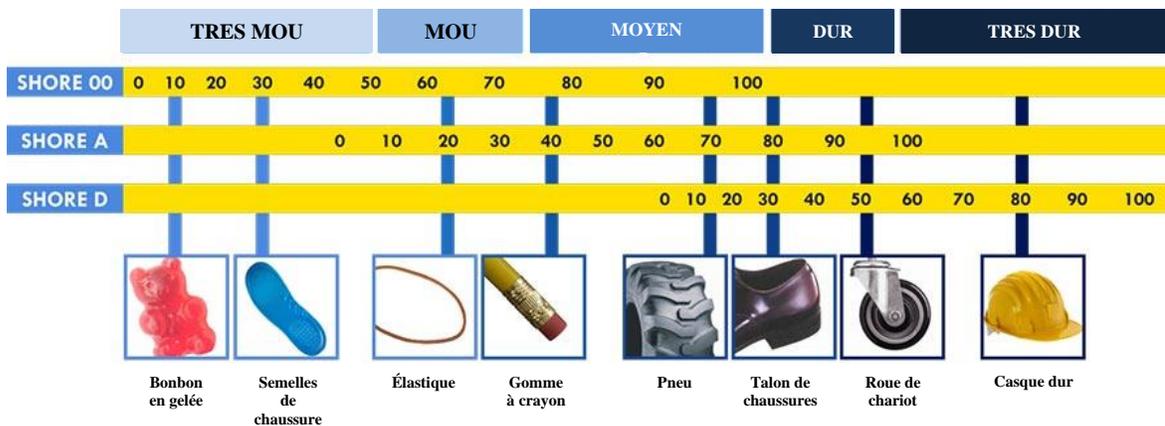


Figure 27 : Classification et exemple d'objets selon leur dureté Shore, (2019)

Selon Larson (2019), 3 modèles mathématiques prévoient la valeur du module de Young en fonction de la dureté du matériau.

Pour les matériaux à valeur faible de dureté Shore A il faut privilégier le modèle de Gent (Gent, 1958) (11), pour les matériaux à faible dureté Shore D c'est le modèle de Ruess (12) et enfin pour les matériaux les plus durs (fortes valeurs de Shore D) c'est le modèle de Qi et al. (2003) (13) qui colle le mieux aux données. Ces 3 équations sont évoquées dans le Tableau 6 :

Tableau 6 : Différentes équations liant la dureté Shore à la valeur du module d'Young

Modèle	Équation	Application
Gent	$E = \frac{0,0981(56 + 7,6233S_A)}{0,0137505(254 - 2,54S_A)} \quad (11)$	Faible dureté Shore A
Ruess	$\log_{10}E = 0,0235S_D - 0,6403 \quad (12)$	Faible dureté Shore D
Qi	$S_D = 100 - \frac{20(-78,188 + \sqrt{6113,36 + 781,88E})}{E} \quad (13)$	Forte dureté Shore D

Les duretés Shore A et D sont reliées selon l'équation (14) :

$$S_D = S_A + 50 \quad (14)$$

Avec S_A la dureté Shore A, S_D la dureté Shore D

Pour mesurer la dureté des matériaux, les duromètres 306 L (Shore A) et 307 L (Shore D) de la marque PTC instruments sont utilisés (Figure 28).



Figure 28 : Duromètres 306L et 307L de la marque PTC Instruments (PTC, s. d.-b) and (PTC, s. d.-a)

Il faut noter que dans le cas de matériau à forte dureté Shore D le modèle de Q_i est celui qui traduit le plus la réalité. Cependant, cette représentation n'est que partielle. Le modèle de Q_i sous-estime grandement le module de Young réel comme l'explique (Larson, 2019).

3.2.2 Obtention des éprouvettes

Pour réaliser la rétro-ingénierie, des prises d'escalades de la marque Movement Factory Holds sont utilisées. Cette entreprise créée par Guillaume Nadeau et Michael Tousignant en 2017 à Montréal a réussi à se faire une place de choix dans le secteur de l'escalade en salle. Cette entreprise est dite communautaire, car elle requiert l'expertise de professionnels du milieu de l'escalade pour concevoir ses prises (Movement Factory, 2017). Cela permet de produire des prises de grande qualité. Ce sont les prises de la gamme CAKES (Figure 29) qui sont étudiées ici.

Dans ces prises, des éprouvettes de Type IV sont extraites à l'intérieur du volume. Ce type est privilégié, car le volume de matière disponible est limité. Ainsi il est impossible de réaliser des éprouvettes de Type I dans les prises, car la longueur maximale disponible est plus faible que la longueur requise.



Figure 29 : Prises d'escalade de la gamme CAKES de l'entreprise Movement Factory Holds (Movement Factory, 2017)

Dans le cas du matériau test, l'obtention des éprouvettes est beaucoup plus complexe puisque le matériau doit être moulé. Des moules en impression 3D sont donc réalisés. Toute la question est d'arriver à sélectionner le matériau dans lequel réaliser les prises pour garantir une précision adéquate et un bon démoulage des éprouvettes réalisées.

5 imprimantes sont présentes à l'UQAR pour 4 types de processus d'impression :

- Impression de type FDM (Fused Deposition Modeling)

Le procédé consiste à chauffer un fil plastique pour le positionner par la suite. Deux matériaux sont disponibles. Le PLA (Acide Polylactique), il possède malheureusement un fini de surface avec trop d'aspérités pour mouler et une résistance aux efforts de moulage trop faible. Le second est un fil de nylon pour la Markfaged, très bonne résistance aux efforts dans ce cas, mais son aspect dur rend le démoulage très complexe. Les propriétés de ce matériau sont disponibles dans sa fiche technique produite par l'entreprise Markfaged, (2022).

- Impression de type SLA (Stéréolithographie)

Le procédé consiste à polymériser une cuve de réactif photosensible avec un laser. Ce type d'impression permet d'obtenir des matériaux flexibles idéals pour le moulage (bon démoulage). Ici, la résine 50A de l'entreprise Formlabs répond parfaitement aux attentes en proposant un matériau flexible. Sa fiche technique de l'entreprise Formlabs, (2020) précédemment mentionnée est également disponible.

- Impression de type SLS (Frittage sélectif par laser)

Le procédé consiste à fusionner des grains de poudre avec un laser. Ce type d'impression possède un problème d'accroche du matériau moulé avec le moule. Le démoulage nécessite un bris du moule. À l'UQAR nous avons accès à une impression à la poudre de Nylon 12 avec l'imprimante Fuse.

- Impression de type DMLS (Frittage laser de Métal)

Le processus est similaire en fonctionnement au SLS. Le problème majoritaire de cette technique est le prix de chaque échantillon qui est faramineux donc c'est un processus qui n'est pas approprié. Différents types de métaux sont présents à l'impression tels que des aciers ou des aluminiums.

Au vu de toutes ces données récoltées suite à des essais, il a donc été choisi de mouler les éprouvettes dans un moule souple en SLA, encerclé dans un coffrage en matériaux durs obtenus par la Markforged, procédé de FDM. Les plans du moule sont présents en ANNEXE II : Plan des moules des éprouvettes. Des photos (Figure 30 et Figure 31) du moule final en 4 parties sont présentes ci-dessous:

- Moule souple en SLA
- Moule interne en FDM pour limiter la déformation sur le côté du moule
- Bâti en FDM pour limiter la déformation en dessous du moule

- Chapeau en FDM pour limiter la déformation au-dessus du moule



Figure 30 : Moule en SLA (à gauche) et contre-moule en FDM (à droite)

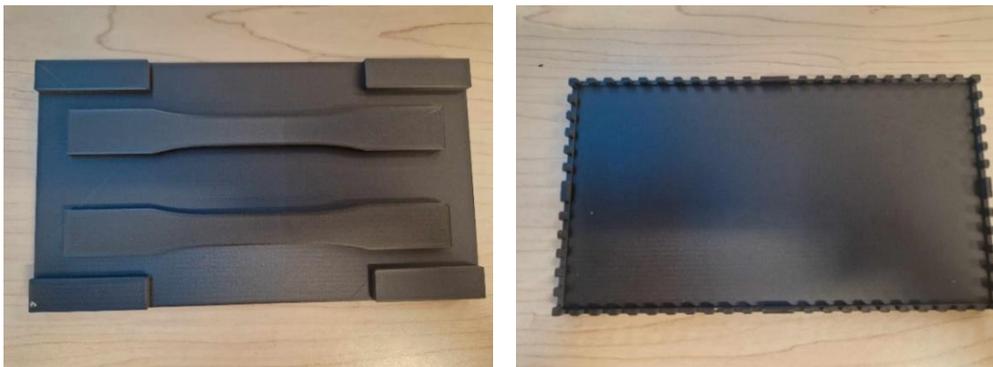


Figure 31 : Chapeau (à gauche) et bâti (à droite) en FDM

Plus que le moule utilisé c'est également le procédé de moulage employé qui est important dans la réalisation des éprouvettes. Le processus de la Figure 32 est respecté pour réaliser les éprouvettes.

À noter qu'il est nécessaire de mettre une épaisseur de matériaux supérieure à celle requise, car ce dernier va être comprimé. Le composite à base de résine Elium® et de fibres de verre est un matériau compressible. En fonction du taux de compression, la résistance du matériau final varie. Cependant, un haut taux de compression du composite nécessite l'utilisation de

presses hydrauliques. Dans ce cas d'étude, il faut donc faire un compromis entre obtenir un matériau résistant et pouvoir être moulé de façon artisanale.

En se basant sur les recommandations du laboratoire de chimie ayant développé ce matériau, un taux de compression de 1/3 est sélectionné. C'est-à-dire que le composite liquide est coulé avec une hauteur 1,33 fois supérieure à celle requise dans le moule. Cette compression est facile à obtenir avec des serre-joints et permet d'obtenir un matériau assez résistant pour l'utilisation requise.

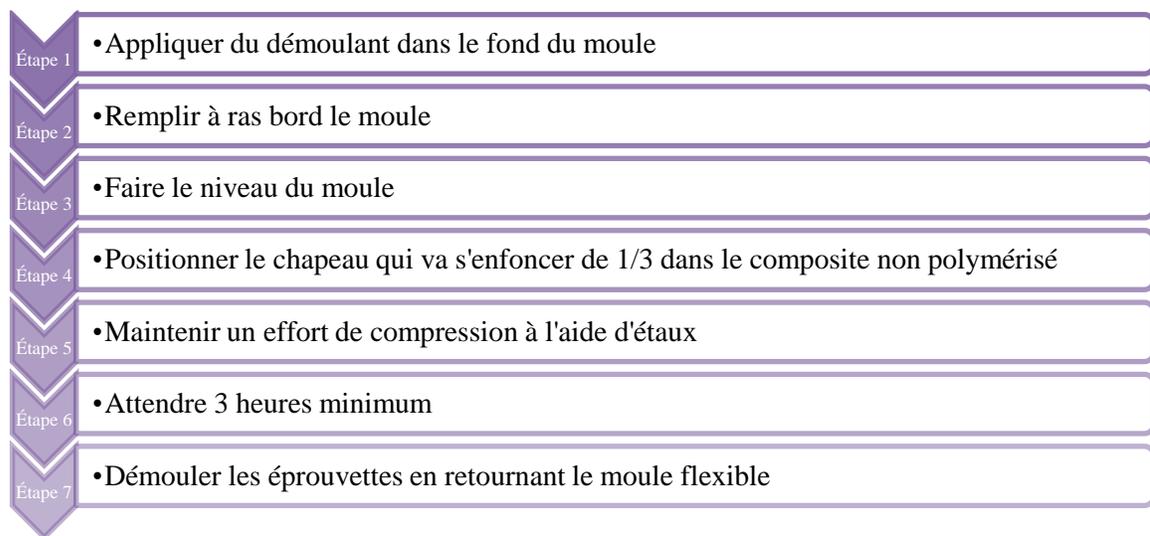


Figure 32 : Processus d'obtention d'éprouvette en composite à base d'Elium® 150

3.2.3 Machine d'essai en traction : calibrage et étalonnage

Pour mesurer les données mécaniques de chacun des matériaux, une machine d'essai en traction dont la référence est la MTS (Material Test System) 810 est utilisée. Cet essai permet d'avoir accès à différentes données : module de Young, résistance maximale, résistance limite et allongement à la rupture.

La machine de traction doit être réglée pour que les mors puissent serrer les échantillons sans les briser en causant de la déformation plastique. Un matériau d'étalonnage est utilisé. Il s'agit d'un matériau qui possède des propriétés mécaniques similaires au matériau d'étude

sans pour autant être identique. Ici, c'est le polyuréthane 8789K82 de chez Mc Master présentant une dureté Shore D de 75 qui est utilisé. Suite au calibrage, les paramètres obtenus sont similaires à ceux des propriétés du matériau de la Figure 33.

Material	Polyurethane
Shape	Sheet and Bar
Texture	Smooth
Thickness	1"
Thickness Tolerance	-0.020" to +0.020"
Width	6"
Width Tolerance	+0.250"
Length	6"
Length Tolerance	+0.25"
Backing Type	Plain
For Use Outdoors	Yes
Temperature Range	-20° to 190° F
Tensile Strength	7,500 psi
Color	Amber
Clarity	Semi Clear to Opaque
Durometer	75D (Extra Hard)
Durometer Tolerance	-5 to +5
RoHS	RoHS 3 (2015/863/EU) Compliant
REACH	REACH (EC 1907/2006) (01/17/2023, 233 SVHC) Compliant
DFARS	Specialty Metals COTS-Exempt
Country of Origin	United States
USMCA Qualifying	No
Schedule B	392099.0000
ECCN	EAR99

Figure 33 : Données matériaux 8789K82, fiche technique de Mc Master

Au vu du modèle Q_i évoqué précédemment, un module de Young de 376 MPa et une limite de rupture de 50 MPa sont définis.

Ce matériau se présente sous la forme d'un bloc dans lequel des éprouvettes de type I sont débitées (Figure 34) selon les données géométriques de la Figure 26. Ces éprouvettes d'étalonnage permettent de régler différents paramètres : la pression des mors, la vitesse de test, le taux de déformation nominal et les paramètres du correcteur.



Figure 34 : Bloc de 8789K82 dans lequel sont débitées 3 éprouvettes de type I selon la norme ASTM D638

- Pression des mors :

La fiche technique de la machine de traction MTS-810 nous donne la formule (15) pour mesurer la pression de mors minimale qui permet une bonne préhension des éprouvettes sans les écraser.

$$P \text{ (MPa)} = \frac{10,4 * L \text{ (kN)}}{A \text{ (cm}^2\text{)}} \quad (15)$$

L = Force maximale à appliquer au spécimen (kN)

A = 66,45 cm²

P = Pression de préhension (MPa)

P = 0,75 MPa.

C'est donc aux alentours de cette valeur que la pression des mors doit être réglée pour emprisonner les éprouvettes de Polyuréthane 8789K82 sans risque de glissement ou d'écrasement.

- Vitesse de test et taux de déformation nominal

Ces paramètres sont importants dans la réalisation des tests puisque de mauvais réglages de ces paramètres peuvent entraîner un échantillonnage biaisé comme l'explique le critère de Nyquist Shanon. La Figure 35 les donne. Les matériaux étudiés sont de type rigide, le type non rigide étant réservé aux matériaux de type élastomère.

Vitesse de test = 5 mm/min

Taux de déformation nominale = 0,1 mm/mm.min

Il faut tout de même avoir un regard critique et prendre en compte qu'il est possible d'adapter la vitesse de test pour obtenir des données plus lisibles et exploitables.

- Réglage des paramètres du correcteur

Le réglage du correcteur est plus complexe que les paramètres précédents puisqu'il n'existe pas de loi ou de valeur de référence. C'est donc grâce aux tests des éprouvettes d'étalonnage qu'il est possible de déterminer les paramètres du correcteur de la machine d'essai en traction.

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^A

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in.-min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15
	V	1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
	Nonrigid	III	50 (2) ± 10 %	1
500 (20) ± 10 %			10
IV		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15

^ASelect the lowest speed that produces rupture in 0.5 to 5 min for the specimen geometry being used (see 8.2).

^BSee Terminology D883 for definitions.

^CThe initial rate of straining cannot be calculated exactly for dumbbell-shaped specimens because of extension, both in the reduced section outside the gage length and in the fillets. This initial strain rate can be measured from the initial slope of the tensile strain-versus-time diagram.

Figure 35 : Désignation des paramètres de tests selon la géométrie d'éprouvette sélectionnée (Zainab, 2019)

Des essais en traction sont visibles à la Figure 36. La déformation des éprouvettes est mesurée à l'aide de l'extensomètre 630.12-50 de la marque MTS. Ce choix est réalisé en s'appuyant sur la fiche technique de l'extensomètre. En effet les éprouvettes utilisées sont de types I ou IV. Dans le cas du type I l'épaisseur sera aux alentours des 7 mm et dans le cas du type IV aux alentours de 4 mm.

Après traitement des résultats en ANNEXE III : Résultats des essais en traction pour les éprouvettes tests, le matériau test présente le module de Young suivant $E = (348,24 \pm 42,1) \text{ MPa}$. Cet intervalle de valeur inclut la valeur théorique obtenue à l'aide du module de Q_i (Tableau 6). Le réglage des paramètres est donc valide.

De plus, en réalisant une série de mesures sur les prises d'escalades, une valeur de dureté Shore D de 73,75 a été mesurée.

Comme évoqué précédemment, cette valeur est à considérer avec prudence. Le modèle de Q_i (Larson, 2019) sous-estime majoritairement le module de Young réel. Au terme de cette mesure de dureté, on peut conclure que le module de Young du polyuréthane est au moins supérieur à 348 MPa. Plus qu'une valeur précise, c'est une estimation de l'ordre de grandeur qui est offerte ici. Elle se situera très certainement aux alentours de 1 GPa. Cette assertion sera par la suite comparée aux résultats expérimentaux.

Après avoir réalisé ces prétests, la machine de traction est utilisée pour tester les éprouvettes fabriquées à partir des prises du commerce et moulées avec le matériau innovant afin d'obtenir les propriétés des matériaux. Les résultats de ces tests de traction sont analysés dans le chapitre 4.1.

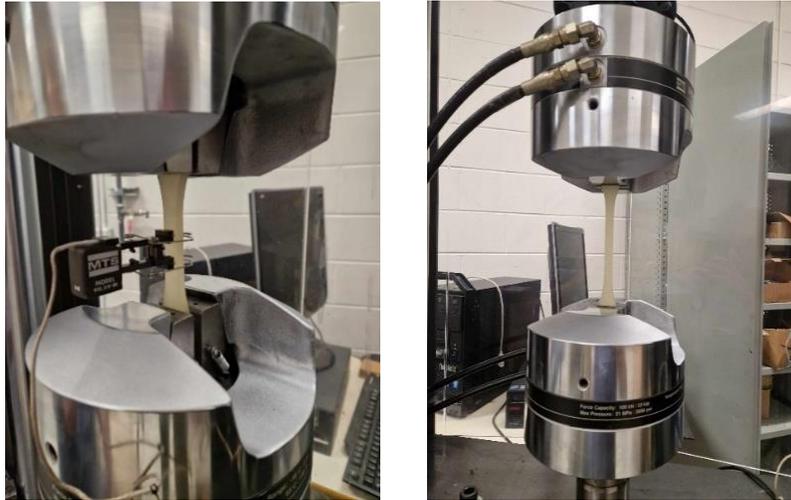


Figure 36 : Essais en traction des éprouvettes de 8789K82

3.2.4 Méthodologie d'obtention des caractéristiques des matériaux

Sur les machines présentées précédemment, deux types d'essais sont réalisés. Pour déterminer le module de Young, la limite élastique et la contrainte maximale, des essais en traction simple sont réalisés. Ces essais sont maintenus jusqu'à rupture totale de l'échantillon.

Dans le cas de l'obtention du coefficient de Poisson, la méthode d'obtention est différente. Une force provoquant une contrainte se situant dans le domaine élastique est sélectionnée. Des essais multiples sont effectués par la suite sur chaque échantillon. Le but est de mesurer les déformations longitudinales et transversales des échantillons. Cela permet ainsi de déduire le coefficient de Poisson se définissant comme suit (16):

$$\nu = - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (16)$$

À noter que dû à l'absence d'un extensomètre biaxial, des séries de mesures sont réalisées avec l'extensomètre axial susmentionné. Entre chaque prise de mesure, l'orientation de l'appareil est modifiée pour mesurer autant la déformation longitudinale que la déformation transversale. Les résultats de ces essais sont développés dans le chapitre suivant.

3.3 TEST DE LA NORME NF EN 12 572-3

Après avoir réalisé les tests de traction pour obtenir les données mécaniques fondamentales des matériaux, les prises d'escalade sont testées selon la norme NF EN 12 572-3 mentionnée auparavant. Cette norme se subdivise en 3 tests précédés d'une préparation thermique. Les étapes et la mise en place des tests sont développées par la suite.

3.3.1 Préparation thermique

La préparation thermique des prises d'escalades dure 10h10. Elle a pour but de fragiliser au maximum les prises d'escalade. Il s'agit littéralement d'un vieillissement thermique des échantillons pour pouvoir par la suite les tester dans le cas le plus défavorable.

Cette préparation thermique s'organise selon le processus de la Figure 38, les échantillons préalablement mouillés vont subir des cycles thermiques entre -30°C (bain de glace carbonique et de sel, Figure 39) et 70°C (étuve, Figure 40). Le but étant que l'eau s'infiltré à l'intérieur de la prise d'escalade et qu'ainsi, cela provoque des fissures en raison de la différence de densité entre l'eau solide et l'eau liquide. La glace étant moins dense que l'eau liquide, son volume est donc plus important. Cela dilate donc les cavités où l'eau s'est infiltrée. Cette même préparation est réalisée sur les prises d'escalades en composites.

Pour garantir une validité de la préparation thermique, un suivi thermique des échantillons a été réalisé. Il ne s'intéresse qu'à la partie froide, car l'étuve est un appareil de mesure vérifié. Sa variation d'environnement est donc négligeable. La température commandée à la machine est dite véridique et invariable. En ce qui concerne le suivi thermique de l'environnement à -30°C , il est présent en ANNEXE IV: Préparation thermique des prises d'escalade en polyuréthane et ANNEXE IX: Préparation thermique des prises d'escalade en Elium® 150 pour le composite et sera analysé dans la partie 4.1.

Les températures sont vérifiées à l'aide de thermocouples (Figure 37). La validation du suivi se traduit par une diminution des températures de surfaces tout en minimisant l'écart entre la température ambiante et celle de contact avec les prises.



Figure 37 : Thermocouple HH802 Omega (type Alumnel - Chromel)

Un autre paramètre à vérifier est l'invariance des paramètres mécaniques du matériau innovant à la préparation thermique mentionnée. Pour cela (Figure 39.b) des éprouvettes sont préparées thermiquement selon le même procédé que celui des prises d'escalade. Les résultats des éprouvettes traitées sont comparés à ceux des éprouvettes non traitées dans le chapitre 4.1. À noter que cette invariance n'est en aucun cas requise par la norme, mais provient d'un choix personnel pour s'assurer de la validité des résultats.

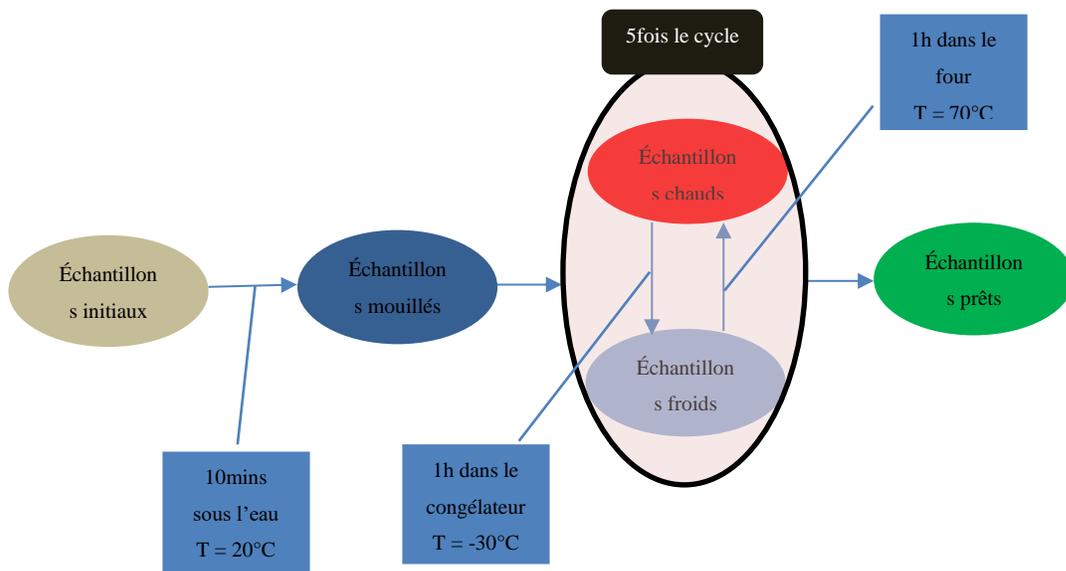


Figure 38 : Processus de préparation thermique des prises d'escalade selon la norme NF EN 12 572-3,(AFNOR, 2009).

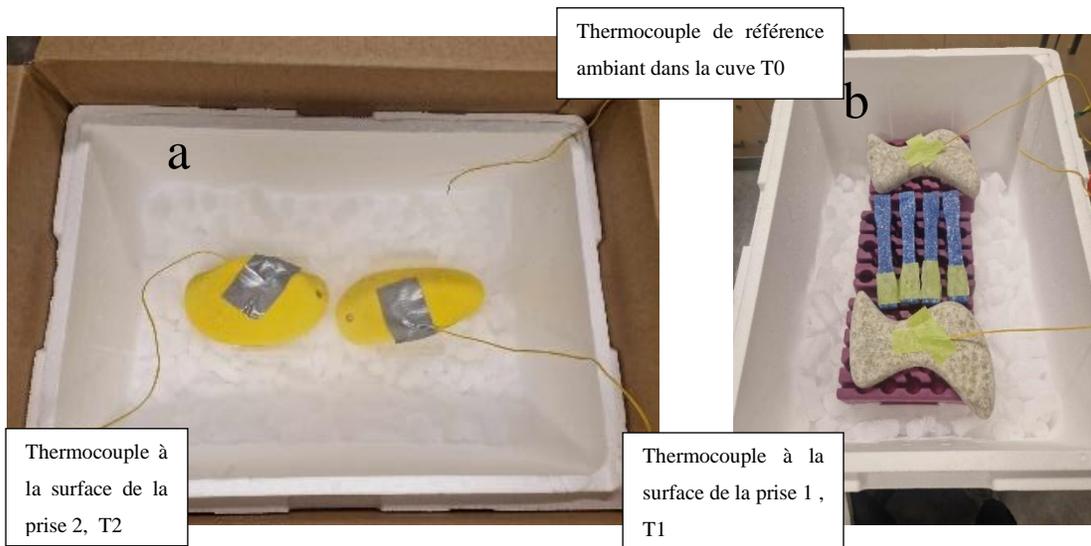


Figure 39 : Prise d'escalade en polyuréthane (a) et composite (b) dans un environnement à -30°C, bain de neige carbonique et de sel

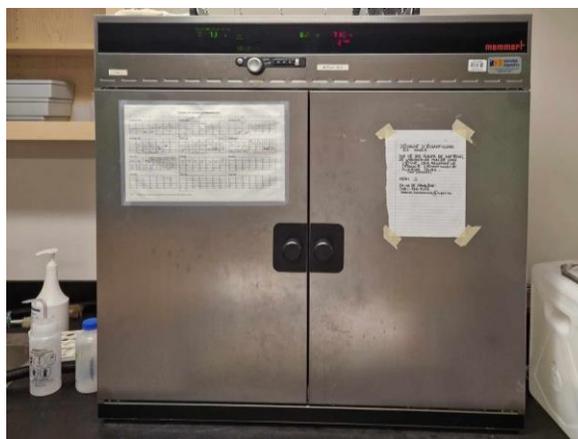


Figure 40 : Étuve de la préparation thermique réglée à 70°C

3.3.2 Les différents tests et leur mise en place

En ce qui concerne les tests de la norme NF EN 12 572 ils doivent être réalisés sur une plaque de bouleau d'au moins 18mm. Ce type de plaque est grandement utilisé dans les salles d'escalade comme les points de fixation des prises. Il paraît donc assez normal que les tests de cette norme se réalisent avec ce même matériau.

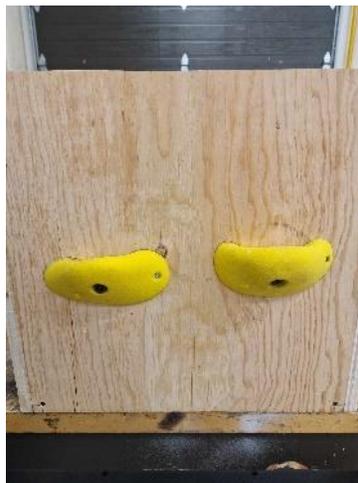


Figure 41 : Prises d'escalade accrochées sur une plaque de bouleau de 18 mm

Trois types de tests sont réalisés en adéquation avec la norme :

- **Fixation**
 - Fixer la vis jusqu'à la limite mise en place par le constructeur. On utilise pour cela une clé dynamométrique même si cela n'est pas requis par la norme
 - Augmenter par la suite la valeur du couple de serrage de 10% par rapport à la valeur requise par le constructeur
 - Vérifier qu'il n'y a aucune défaillance apparente de la prise d'escalade (fissuration)

- **Rotation**

- Fixer la prise à l'aide du boulon, de l'écrou et de la rondelle sur la plaque de contreplaqué (respecter le couple de serrage du fournisseur de la visserie)
- Utiliser la clé dynamométrique pour être sûr que le couple de serrage est correct
- Accrocher le poids de 150 kg au mousqueton
- Placer la planche verticale
- Positionner le crochet le plus loin possible de l'axe de fixation pour qu'il exerce un couple dans le sens antihoraire
- Attendre 1 minute
- Vérifier qu'il n'y a aucune défaillance apparente (fissuration) de la prise d'escalade et aucun déplacement (rotation)

- **Arrachement**

- Fixer la prise à l'aide du boulon, de l'écrou et de la rondelle sur la plaque de contreplaqué (respecter le couple de serrage du fournisseur de la visserie)
- Utiliser la clé dynamométrique pour être sûr que le couple de serrage est correct
- Accrocher le poids au mousqueton
- Placer la planche verticale
- Positionner le crochet de manière à ce que l'effort s'exerce sur la zone la plus susceptible de rompre
- Attendre 1 min
- Vérifier qu'il n'y a aucune défaillance apparente (fissuration) de la prise d'escalade

Pour exercer l'effort sur les prises, un système d'accroche avec un crochet attaché à un plateau lesté avec des sacs de sable est réalisé (cf. Figure 41). Le crochet est conçu de manière à concentrer les efforts en une zone restreinte de contact pour se rapprocher au maximum d'un contact réel entre un doigt et une prise d'escalade. Son design est présent dans la Figure 42 et ses plans sont disponibles en ANNEXE V : Plan du crochet utilisé pour les tests de la norme NF EN 12 572. En fonction du test, c'est simplement le positionnement du crochet et donc de l'effort qui vont être modifiés.

Dans le cas de l'effort de rotation, le crochet est positionné le plus loin possible de l'axe de rotation pour provoquer un moment dans le plan du mur (Figure 43) et à l'inverse, pour l'arrachement, le crochet est positionné sur l'axe d'accroche de manière à provoquer le moment perpendiculairement au mur (Figure 44).



Figure 42 : Système d'accroche lesté avec des sacs de sable



Figure 43 : Crochet d'accroche



Figure 44 : Positionnement du crochet pour réaliser le test de rotation et le test d'arrachement de la norme NF EN 12 572

3.3.3 Détermination des valeurs limites des tests pour le dimensionnement

Dans le but de mettre en place un processus de conception, la quantification de valeur limite est une valeur intéressante pour la modélisation numérique.

Une expérience pour savoir avec quel coefficient de sécurité les prises d'escalades respectent la norme est donc réalisée. Il s'agit d'une donnée importante, car elle traduira la masse limite que peuvent supporter les prises l'escalade avant de rompre.

Le système mis en place se divise en 3 parties :

- La partie supérieure dont une partie est mise dans les mors supérieurs présente un axe pour accrocher le même crochet qu'évoqué précédemment.
- La partie inférieure, dont une partie est fixée dans les mors inférieurs. Elle permet la fixation de la partie centrale de l'installation par un boulon.
- La partie centrale reliée à la structure par le crochet de la partie supérieure accroché à la prise en haut et verrouillé en bas par un trou oblong qui permet de garantir la verticalité de l'effort exercé par le crochet.

La Figure 45 présente l'installation de ce système d'accroche sur la machine de traction. Les plans de ce système de fixation conçu pour l'occasion sont disponibles en ANNEXE VI : Plan du système d'accroche selon la norme NF EN 12 572. À noter que les prises sont montées à l'envers, car l'effort est exercé du bas vers le haut par la machine de traction du fait que seule la partie inférieure de la machine est mobile. Les données obtenues par cet essai sont traitées et analysées ultérieurement dans le chapitre 4.

Le système a pour but de tester les limites des prises d'escalade avec un chargement se situant sur l'axe de fixation de l'écrou des prises d'escalades. Le but de cet essai est de vérifier la concordance du modèle numérique avec les résultats expérimentaux. Ce système présente tout de même une limitation géométrique. En effet, l'effort est exercé verticalement à l'axe de fixation. Ce n'est pas exactement ce que demande la norme. Il faut donc considérer cette

situation lors de la modélisation numérique pour comparer les résultats. Ces conditions aux limites doivent être étudiées.



Figure 45 : Système de test pour obtenir la limite de résistance des prises d'escalade; à gauche en polyuréthane et à droite en composite

3.4 MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Une étape clé du processus est la mise en place d'un modèle numérique. En effet, cela permet d'amorcer la mise en place d'une méthodologie de conception. Ces modèles permettent de prédire le comportement et surtout la validité des prises d'escalades selon des critères sécuritaires.

Dans le cadre des simulations deux types d'essais sont réalisés :

- Ceux concernant la norme ASTM D638 qui modélisent des éprouvettes normées. Ils ont pour but de vérifier la concordance du modèle de comportement choisi vis-à-vis des résultats expérimentaux obtenus lors des essais de traction.

- Ceux concernant les prises d'escalades. Ils ont pour but d'être utilisés lors de la mise en place de la méthodologie de conception.

Dans ce dernier cas, les tests tentent de reproduire au mieux les conditions d'application de la norme NF EN 12 572. L'effort est appliqué de manière à reproduire l'effort appliqué par le crochet (cf. 3.3). L'étude réalisée est donc statique pour deux principales raisons :

- Le chargement est appliqué lentement (pas de simulation à haute fréquence)
- Le nombre de cycles de charge est faible

Pour justifier la deuxième assertion, le nombre d'utilisations d'une prise d'escalade est estimé. Une prise d'escalade est en moyenne sollicitée une fois par chaque personne visitant une salle d'escalade. Son utilisation est relativement courte (en moyenne 5s par utilisation). La référence est une salle de taille moyenne avec un nombre de visiteurs journaliers de 200 personnes qui exercent l'effort réglementaire de 150 kg (voir NF EN 12 572). Il y a donc 16,6 sollicitations de 1 min (décrite dans ladite norme) par jour. Cela représente 6 059 sollicitations par an, soit 30 295 cycles de charge en 5 ans. Comme le nombre de sollicitations est assez faible et que la norme demande d'appliquer une masse de 150 kg, l'approche suivie dans ce travail s'appuie sur des calculs en statique plutôt qu'en fatigue.

3.4.1 Modélisation des spécimens : introduction des propriétés des matériaux

Ayant obtenu des données chiffrées, le but est désormais d'implémenter numériquement ces valeurs dans un logiciel d'éléments finis tel COMSOL®. Le but est d'obtenir une concordance entre les résultats numériques et pratiques pour les éprouvettes dans le cas des tests normés.

- Hypothèses de modélisation :

Le premier choix à faire est celui des hypothèses. Elles sont les suivantes :

- Les matériaux modélisés sont considérés isotropes et homogènes

- La géométrie est parfaite (pas de défauts surfaciques)
- L'étude est quasi statique (vitesse de simulation faible)
 - Matériau :

La loi de comportement du matériau varie en fonction du type du matériau : modélisation bilinéaire (composite, matériau fragile) et modélisation linéaire avec plasticité parfaite (polyuréthane, matériau ductile).

La détermination des différents paramètres est expliquée et décrite dans le chapitre 4.1 ainsi qu'en ANNEXE VIII: Méthode de traitement des essais en traction.

- Géométrie :

On modélise tout d'abord numériquement sur Solidworks les éprouvettes de type I et Type IV qui sont celles utilisées (cf. Figure 46).

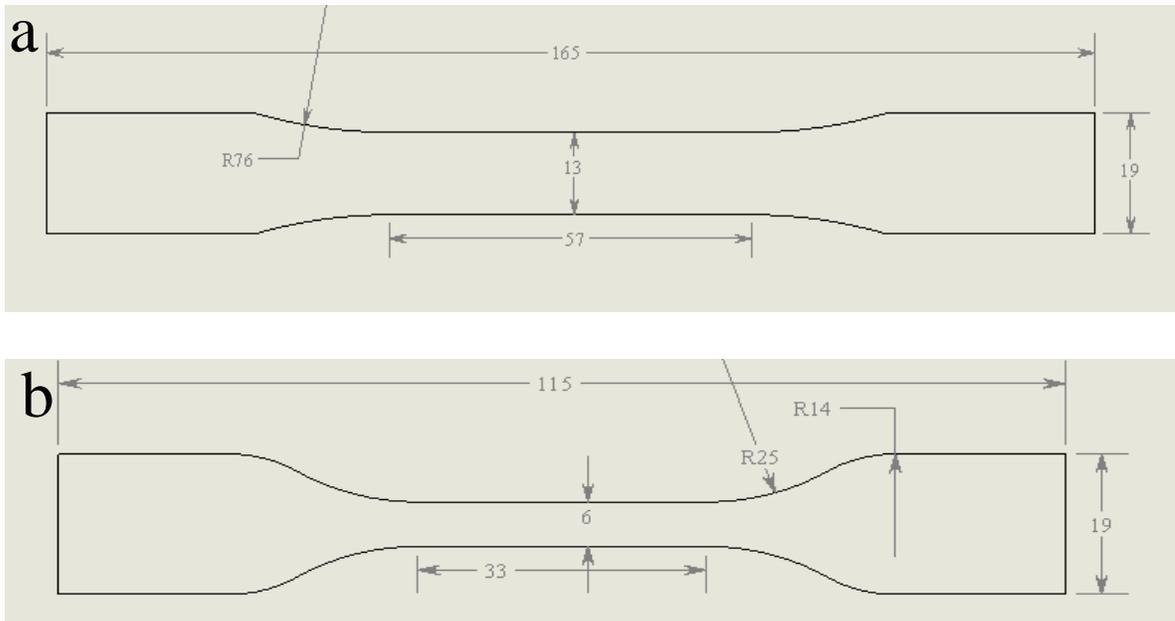


Figure 46 : Extrait de la mise en plan de l'éprouvette de Type I (a) et Type IV (b) sur Solidworks

- Lois de comportements :

Les lois de comportements sont directement implémentées dans COMSOL® et il faut sélectionner celles appropriées pour les matériaux d'étude. COMSOL® demande par la suite les valeurs des paramètres nécessaires selon le modèle choisi. Deux lois sont étudiées ici : modèle élastique avec zone parfaitement plastique (Figure 47a) et modèle élastique avec écrouissage isotrope linéaire (Figure 47b).

Les valeurs de module de Young, coefficient de Poisson et masse volumique sont déterminées expérimentalement (section 4.1). Le type de plasticité mentionnée ci-contre varie en fonction du type du matériau (ductile ou fragile). Il est à noter que la limite élastique n'est pas définie comme la valeur à 0,2% de la déformation, car cette assertion est valable dans le cas des métaux et non des plastiques. La limite élastique est vue comme le point d'intersection des deux droites définissant chaque domaine (élastique et plastique).

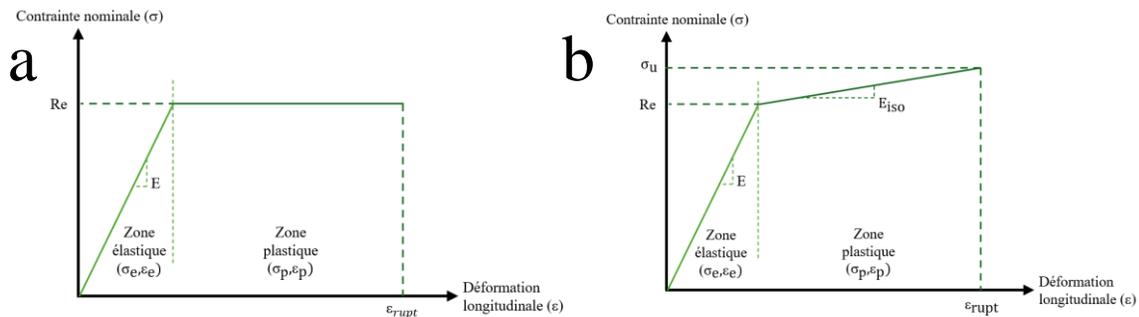


Figure 47 : Lois de comportement, a : Matériau élastique avec zone parfaitement plastique, b : matériau élastique avec écrouissage isotrope linéaire

Dans le cas du polyuréthane qui est ductile, le modèle parfaitement plastique est à privilégier (17). Pour ce type de matériau, seule la zone élastique est importante, car, comme vu précédemment, la limite élastique correspond à la valeur de référence. Ici, la zone plastique permet de se rapprocher plus proche du comportement réel.

$$\sigma_p = Re \quad (17)$$

Avec Re : limite élastique et σ_p : la contrainte plastique

Dans le cas du composite qui est fragile, le modèle d'écrouissage isotrope linéaire est à privilégier (18):

$$\sigma_p = Re + E_{iso} \epsilon_{eq}^p \quad (18)$$

Avec E_{iso} : module d'écrouissage linéaire

Comme précédemment, ces paramètres sont obtenus avec les tests expérimentaux décrits à la partie 3.2.

- Condition aux limites :

La quasi-totalité de la structure est laissée libre, seules les faces latérales sont contraintes : l'une étant fixée et l'autre contrainte avec une force de traction axiale uniformément distribuée.

On implémente les valeurs caractéristiques de matériaux obtenus durant les essais précédents. Le but est d'obtenir de nouveau les courbes d'évolution de la contrainte nominale en fonction de la déformation longitudinale.

- Maillage :

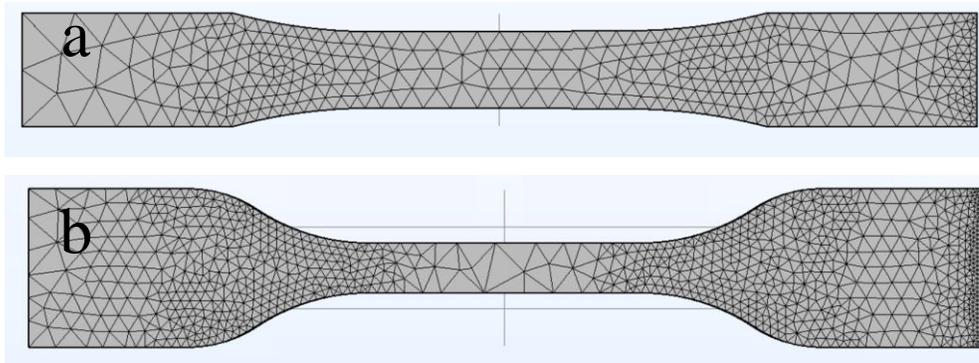


Figure 48 : Maillage raffiné pour éprouvette type I (a) et type IV (b)

Il est à noter que ce maillage est conçu de manière automatisée par le logiciel COMSOL. On observe une concentration des éléments au niveau des changements de section et des zones d'application de la force. Ce sont dans ces zones que les contraintes se concentrent. Cette hétérogénéité a donc un but d'optimisation de temps de calcul pour le logiciel.

Pour vérifier la validité des maillages, une étude de convergence de chacun des deux modèles est réalisée. Cela permet de valider les résultats obtenus. Cette étude de convergence est développée autour de la contrainte maximale obtenue avec le modèle d'éléments finis. Cette valeur de contrainte maximale est calculée pour différentes précisions de maillages enregistrées sur COMSOL®. La densité volumique d'éléments est déterminée pour chaque type de maillage. Ce choix de la contrainte maximale n'est pas fait au hasard. En effet, elle est très utile, c'est elle qui permet de quantifier les différents critères de limitation en statique.

Dans le cas du maillage de la Figure 48.a une densité volumique d'éléments de $0,66 \text{ élément/mm}^3$ est mesurée ce qui correspond bien d'après la Figure 49.a au domaine de convergence de ce maillage. De même pour la Figure 48.b avec une densité de $1,88 \text{ élément/mm}^3$, qui correspond effectivement à une valeur pour laquelle le maillage est convergé selon la Figure 49.b .

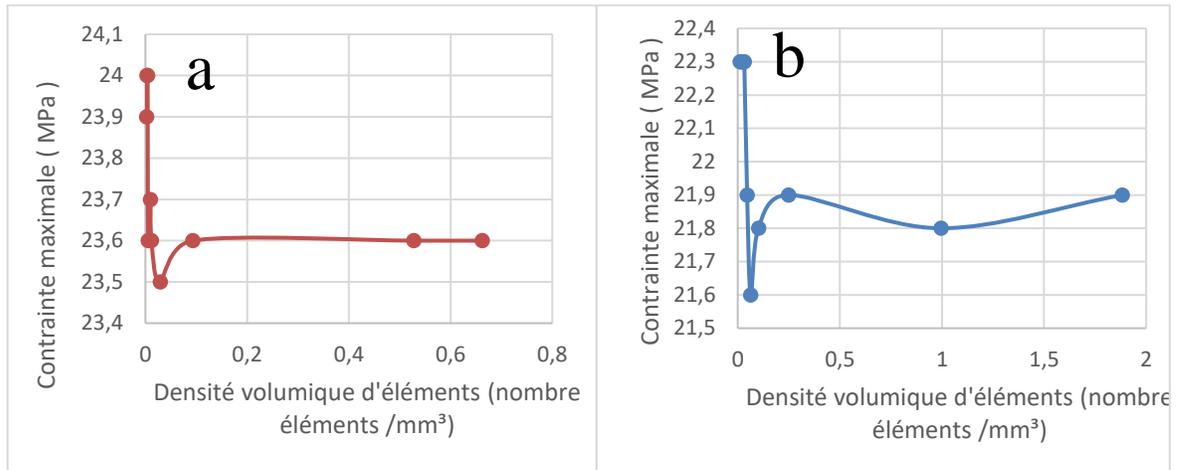


Figure 49 : Étude de convergence du maillage des éprouvettes (a) de type I et (b) de type IV

3.4.2 Modélisation des prises d'escalades (commerciales et innovantes)

En plus de la modélisation des éprouvettes, les prises d'escalades sont modélisées.

- Hypothèses de modélisation :

Les hypothèses d'études sont les mêmes que précédemment avec les éprouvettes

- Les matériaux modélisés sont considérés isotropes et homogènes
- La géométrie est parfaite (pas de défauts surfaciques)
- L'étude est quasi statique (vitesse de simulation faible)

- Matériau:

Les matériaux sélectionnés sont identiques : il s'agit du polyuréthane et du composite à base d'Elium® 150 et de fibres de verre

- Géométrie :

Deux types de géométrie sont étudiés. Elles correspondent à la prise du commerce de l'entreprise Movement Factory (Figure 50) dont la rétro-ingénierie est réalisée et à la prise d'étude développée par l'entreprise Third Hold (Figure 51). La première (Figure 50) est modélisée pour obtenir une forme quasi identique à la prise du commerce. Si l'UQAR avait eu l'équipement, elle aurait pu être scannée. La deuxième (Figure 51) a été développée par l'entrepreneur de Third Hold. Son design est innovant pour se différencier des autres prises d'escalades sur le marché. En ce qui concerne le choix du trou de vis et de contre vis, le but était de se placer dans le cas le plus défavorable. C'est donc pour cela que les trous de vis et de contre vis sont très éloignés. Les autres encoches sur la gauche de la Figure 51 ne sont pas des trous débouchant. Ils ne servent qu'à positionner d'hypothétiques contre vis si l'on choisissait de déplacer les trous de fixation centraux. Cette prise est adaptative. En effet, si le trou de vis se situait sur la partie droite de la prise, il faudrait utiliser un des trous borgnes comme trou de contre vis.



Figure 50 : Modèle numérique d'une reproduction de prise du commerce sur Solidworks;
a : face avant, b : face arrière

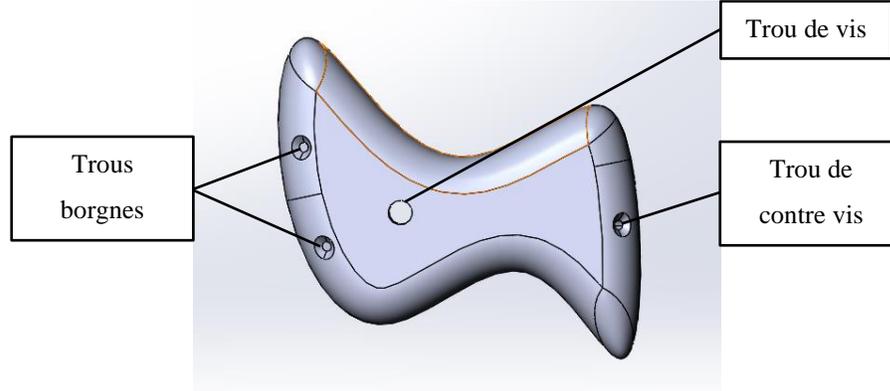


Figure 51 : Modèle numérique de la prise d'escalade d'étude de ThirdHold sur Solidworks

- Étude et lois de comportements

En ce qui concerne les équations d'étude, elles ne sont pas modifiées. Il s'agit toujours d'une étude statique des mêmes matériaux. Les lois de comportements évoquées précédemment sont également identiques avec: un comportement élastique avec zone purement plastique pour la prise du commerce (Figure 50) et un comportement élastique avec écrouissage isotrope linéaire pour la prise d'étude développée (Figure 51).

- Conditions aux limites

Le choix des conditions aux limites est très important. Le chargement réel est assez complexe, faisant intervenir des interactions de frottements entre le matériau de la prise d'escalade et le mur. Le but est de proposer des conditions aux limites plus simples pouvant être implémentées facilement. Pour cela, la pression exercée par la tête de la vis sur la prise d'escalade suite au serrage n'est pas considérée. On s'intéresse au trou de vis dans sa globalité.

1. Prise du commerce

Le chargement de la prise d'escalade du commerce n'est qu'axial (Figure 54) pour pouvoir reproduire au mieux le test expérimental de détermination de limite (3.3.3). Avec ce chargement, deux types de fixations sont modélisés. À noter que les conditions aux limites ont été choisies simples pour pouvoir être implémentées aisément dans la méthodologie de conception. La pression exercée par la tête de la vis suite au serrage n'est pas considérée.

- Le trou de fixation est encastré (aucun déplacement), la face arrière de la prise est en appui plan avec le mur (déplacement normal au mur impossible). Cela correspond à une prise mal serrée. Les efforts sont supportés uniquement par le trou de fixation (Conditions aux limites 1, Figure 52a).
- La face arrière de la prise d'escalade est encastrée (aucun déplacement possible dans toutes les directions) tandis que le trou de fixation est laissé libre. Cela correspond à un cas limite où la prise d'escalade est parfaitement serrée. L'effort est réparti uniformément sur la face arrière de la prise d'escalade (Conditions aux limites 2, Figure 52b).

2. Prise en composite

Avec cette prise d'escalade, deux chargements vont être étudiés : l'un étant axial et l'autre désaxé (Figure 55). Encore une fois, la question du serrage de la vis n'est pas contestée. Dans chacun des cas, trois fixations sont modélisées :

- Le trou de fixation est encastré (aucun déplacement), la face arrière de la prise est en appui plan avec le mur. Cela correspond à une prise mal serrée. Les efforts sont supportés uniquement par le trou de fixation (déplacements imposés 1, Figure 53a).
- La face arrière de la prise d'escalade est encastrée (aucun déplacement possible dans toutes les directions) tandis que le trou est laissé libre. Cela correspond à un cas limite où la prise d'escalade est parfaitement serrée (déplacements imposés 2, Figure 53b).

- Le trou de fixation ne bloque pas les déplacements normaux au plan de fixation, la face arrière est elle toujours en appui plan. De plus, chaque trou (vis et contre-vis) permet la rotation autour de leur axe. C'est la combinaison des deux trous qui empêche la rotation. Ce dernier type de fixation n'est pas possible avec la prise du commerce, car cela entraîne une rotation autour de l'axe de fixation unique. Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir deux points de fixation au moins (déplacements imposés 3, Figure 53c).

Deux chargements sont étudiés dans ce deuxième cas pour différentes raisons (Figure 54 et Figure 55). Le chargement axial reproduit les conditions d'utilisations de l'essai d'effort limite. Le chargement désaxé se place lui dans les conditions décrit par la norme NF EN 12 572. La combinaison de deux chargements avec 3 différentes contraintes de déplacements revient à étudier 6 cas différents pour la nouvelle prise d'étude.

Les résultats de ces différentes conditions aux limites sont développés dans le chapitre 4. Le choix de charger le matériau le plus loin du point de fixation central a pour but de placer la prise dans le cas le plus défavorable. L'ANNEXE X: Choix du chargement le plus contraignant des prises d'escalades, présente la simulation avec la force appliquée plus proche de l'axe de fixation de la vis centrale. Le critère de Coulomb Mohr y est moins limitant.

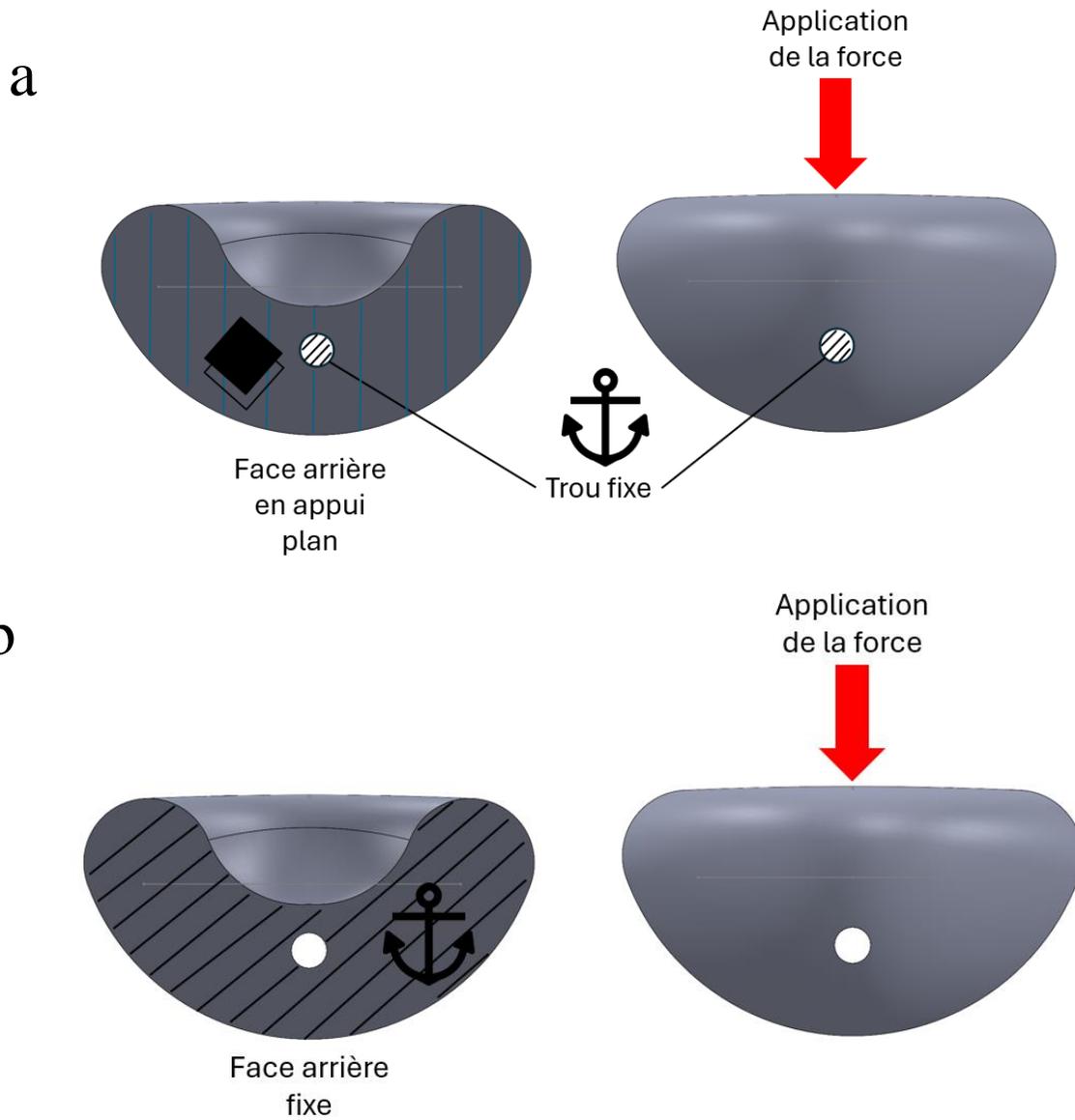


Figure 52 : Représentation visuelle des conditions aux limites pour la prise du commerce;
 a : Conditions aux limites 1, b : Conditions aux limites 2

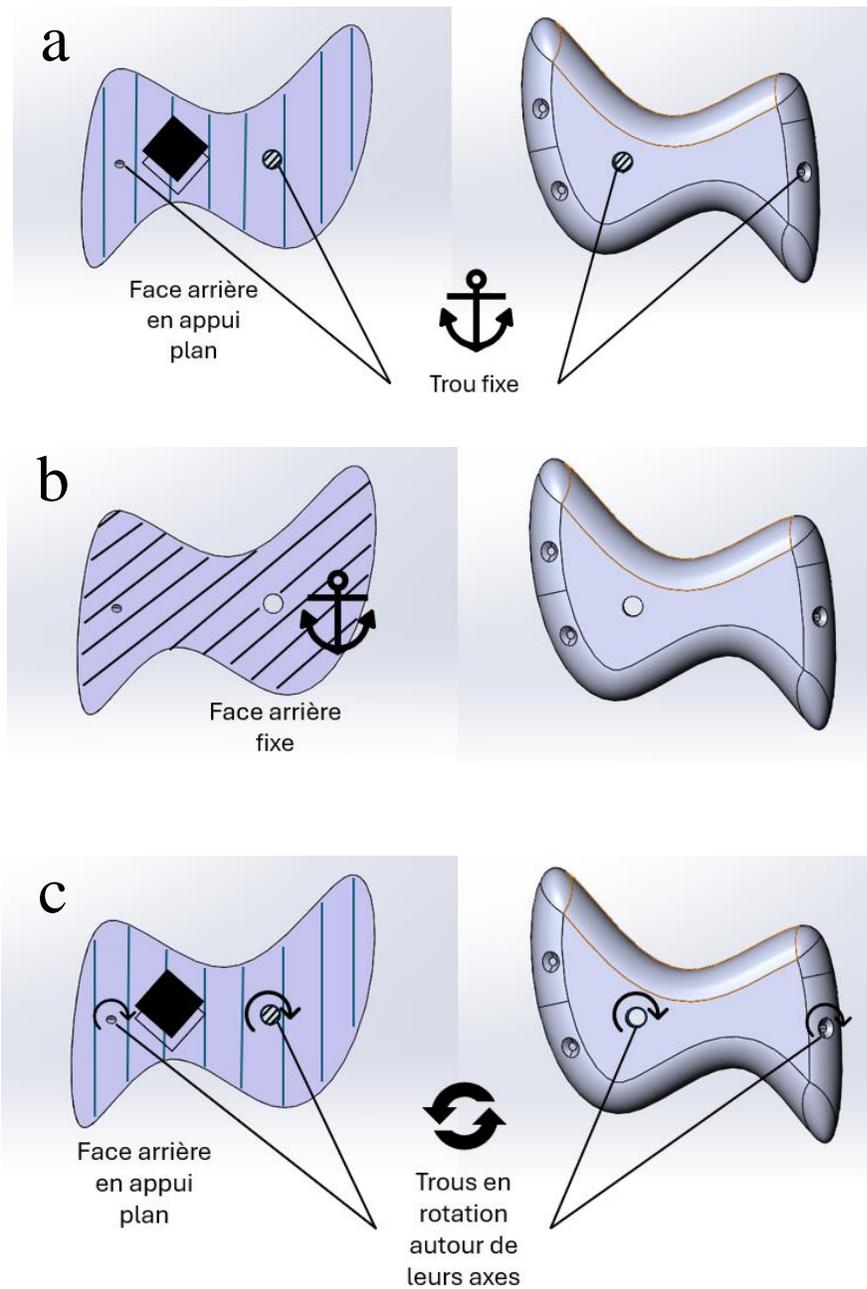


Figure 53 : Représentation visuelle des conditions aux limites pour la prise d'étude;
 a : Déplacements imposés 1, b : Déplacements imposés 2, c : Déplacements imposés 3

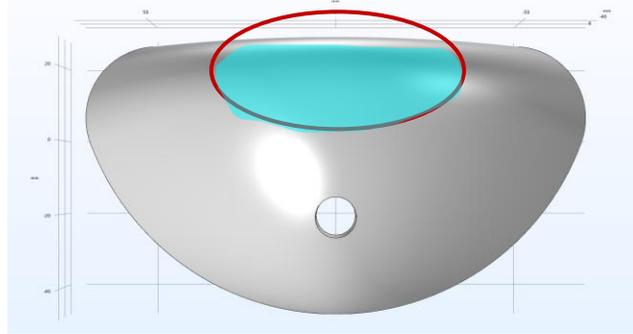


Figure 54 : Prise d'escalade du commerce modélisée sur COMSOL® avec zone d'application de la force

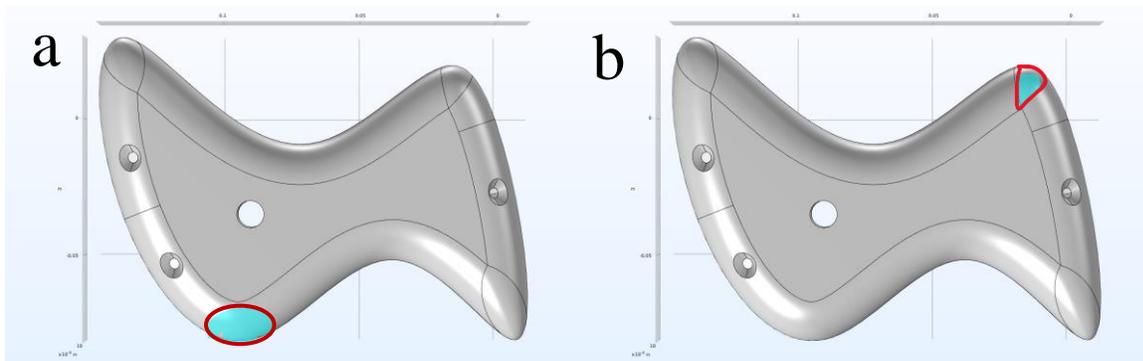


Figure 55 : Prise d'escalade d'étude modélisée sur COMSOL® avec zone d'application de la force : a application axiale de la force ; b application désaxée de la force

- Maillage

Les conditions aux limites ayant été sélectionnées, il reste à définir un maillage des prises d'escalade dans chacun des cas en vérifiant que ce dernier est bien convergé. Pour la prise du commerce, deux maillages sont étudiés tandis que six maillages sont étudiés pour la prise d'étude. Le nombre de maillages étudié correspond au nombre de conditions aux limites. Pour cela, on quantifie la contrainte maximale de Von Mises de la prise en faisant varier la densité volumique du maillage (nombre d'éléments finis par unité de volume).

1. Prise du commerce

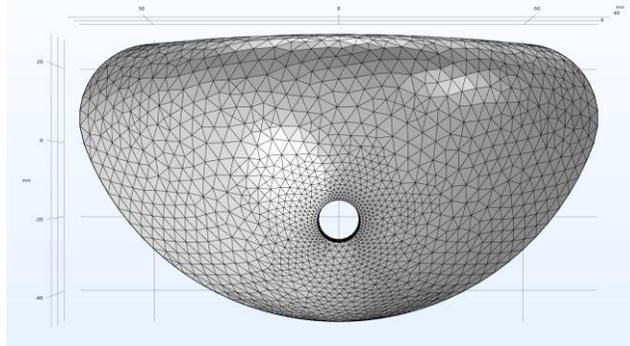


Figure 56 : Maillage de la prise d'escalade du commerce sur COMSOL®

En ce qui concerne la prise du commerce, le maillage du type de la Figure 56 présente une densité volumique de 0,35 élément/mm³ (Conditions aux limites 1) et 0,36 élément/mm³ (Conditions aux limites 2). Au vu de la Figure 57 pour de telles densités, le maillage est convergé. Ainsi le maillage est donc valide et sera utilisé dans les situations précédemment mentionnées.

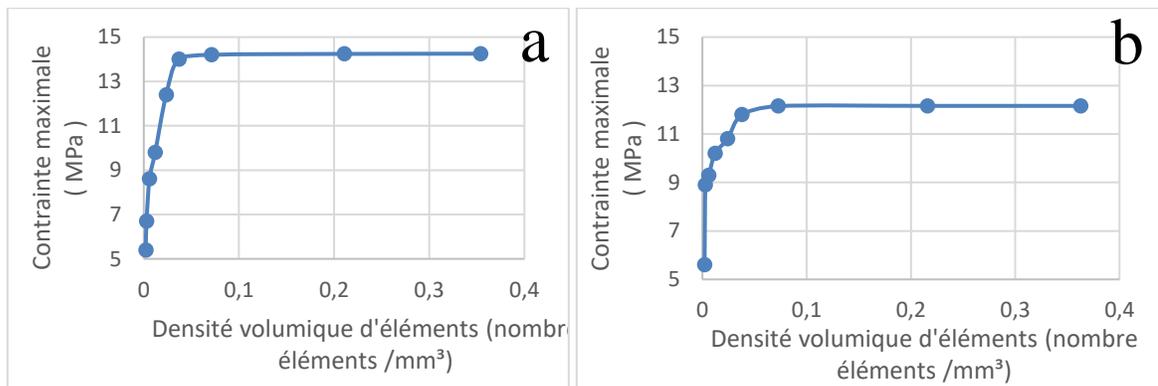


Figure 57 : Étude de convergence du maillage éléments finis pour la prise du commerce, a : Conditions aux limites 1 et b : Conditions aux limites 2

2. Prise d'étude

En ce qui concerne la prise d'étude, deux maillages sont étudiés. Ils correspondent aux deux chargements susmentionnés. Il s'agit du chargement désaxé (Figure 58.a) et du chargement axial (Figure 58.b).

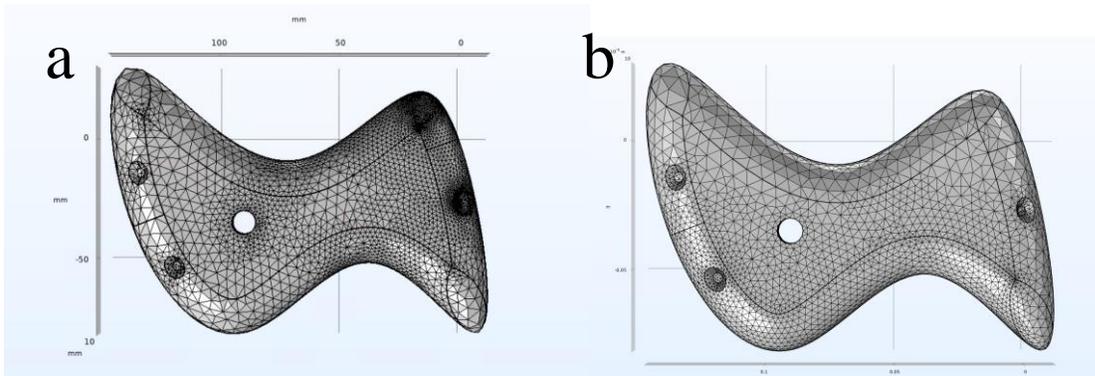


Figure 58 : Maillage de la prise d'escalade sur COMSOL®, a : chargement désaxé et b : chargement axial

Dans chacun des cas, le maillage étudié est du type de la Figure 58. À l'aide de la Figure 59 on peut vérifier que le maillage que l'on utilise dans chacun des cas se situe effectivement dans la zone convergée de la courbe. Les valeurs de densités volumiques du maillage utilisé sont les suivantes dans le cas du chargement axial :

- Conditions aux limites 1 : 0,53 élément /mm³ (Figure 59.a)
- Conditions aux limites 2 : 0,56 élément /mm³ (Figure 59.b)
- Conditions aux limites 3 : 0,58 élément /mm³ (Figure 59.c)

Dans le cas du chargement désaxé, les valeurs sont :

- Conditions aux limites 1 : 0,45 élément /mm³ (Figure 59.d)
- Conditions aux limites 2 : 0,42 élément /mm³ (Figure 59.e)
- Conditions aux limites 3 : 0,52 élément /mm³ (Figure 59.f)

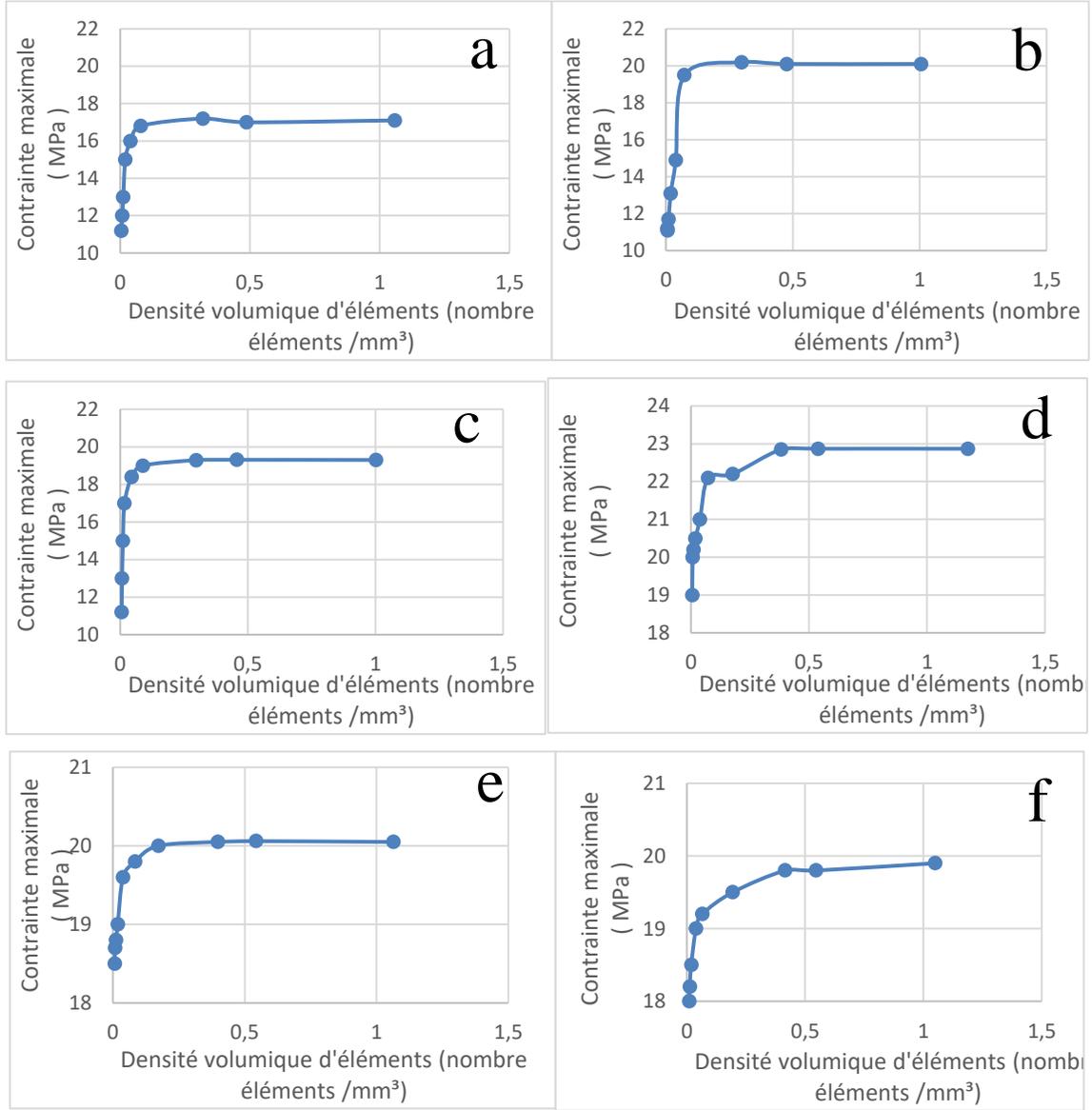


Figure 59 : Étude de convergence du maillage éléments finis de la prise d'escalade dans les différents cas d'étude,

- a : conditions aux limites 1 et chargement axial,
- b : conditions aux limites 2 et chargement axial,
- c : conditions aux limites 3 et chargement axial,
- d : conditions aux limites 1 et chargement désaxé,
- e : conditions aux limites 2 et chargement désaxé
- et f : conditions aux limites 3 et chargement désaxé

3.5 MOULAGE D'UNE PRISE EN COMPOSITE RECYCLABLE

Enfin, pour valider le processus de conception établi, des prises d'escalade sont produites en composite recyclé. Le but est de vérifier si les résultats obtenus numériquement coïncident avec les tests pratiques de la norme NF EN 12 572. Un moule est réalisé, selon les plans de l'ANNEXE VII: Plan du moule de prise d'escalade, en impression 3D en Markforged comme le moule des éprouvettes précédent.



Figure 60 : Moule de la prise d'escalade, à gauche parties inférieures, à droite partie supérieure

Le moule de la prise d'escalade est présenté à la Figure 60. Le moule est en deux parties pour permettre un démoulage plus aisé de la prise d'escalade. Le chapeau, partie supérieure, permet de répartir de manière uniforme la pression lors du moulage.

Les prises qui sont obtenues sont préparées thermiquement selon le processus de la partie 3.3.1. Le test de la norme NF EN 12 572 est réalisé pour vérifier leur validité selon la normalisation. Leur résistance limite est également calculée selon la partie 3.3.3 .

On trouve ci-dessous (Figure 61) une photo des tests réalisés pour les prises d'escalade en composite.



Figure 61 : Test de la norme NF EN 12 572 pour les prises d'escalade en composite

3.6 RÉSUMÉ

Comme son nom l'indique, ce chapitre permet d'expliquer la méthodologie d'étude sélectionnée. Pour cela, des éprouvettes doivent être extraites ou moulées dans les matériaux ainsi que des prises d'escalades. Avec ces éprouvettes, les propriétés mécaniques (Module de Young, Limite d'élasticité, Module d'érouissage isotrope linéaire ...) propres aux deux matériaux d'étude (Polyuréthane et Composite) sont déterminées selon la norme ASTM D638. Par la suite, les tests décrits dans la norme NF EN 12 572 sont réalisés avec les prises d'escalade. Ces tests sont poussés aux limites pour quantifier le coefficient de sécurité avec lequel les prises d'escalade respectent la norme. Ces données numériques sont par la suite implémentées dans un modèle numérique de prises d'escalades. Le but étant de déterminer la meilleure des conditions aux limites offrant des résultats de simulation en adéquation avec les tests expérimentaux pour pouvoir finalement proposer une méthodologie de conception applicable à toutes prises d'escalade.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET ANALYSES

4.1 ESSAI DE TRACTION NORMES ASTM D638

4.1.1 Cas du polyuréthane de Movement Factory

Une prise de mesure sur 3 éprouvettes de polyuréthane extraites de prises d'escalade par usinage est réalisée. Les éprouvettes utilisées sont de types 4, car le volume de matière disponible est limité. Les tests sont réalisés selon la méthode décrite précédemment (chapitre 3.1).

Au vu du comportement du matériau, le choix optimal de comportement pour ce matériau est de type élastoplastique avec zone purement plastique. Le matériau est en effet ductile selon le critère défini précédemment ($\varepsilon_{rupt} > 5\%$) avec $\varepsilon_{rupt} \cong 10\%$.

Les courbes sont analysées pour en déduire le module de Young (E), la contrainte maximale (σ_{max}), la limite élastique (Re) et la valeur de la zone plastique (σ_{plast}). Pour chacune d'entre elles, le coefficient de Pearson (R^2) de la zone élastique est déterminé. L'évolution des données est obtenue à l'aide du module numpy de python en analysant celles-ci selon la méthode de l'ANNEXE VIII: Méthode de traitement des essais en traction. Les courbes d'analyses sont disponibles à la Figure 62 (cas d'un matériau ductile). À noter que 4 essais ont été réalisés avec 3 éprouvettes (une des éprouvettes ayant subi deux essais en traction). On détermine par la suite les valeurs moyennes suivantes avec leurs écarts types respectifs :

$$E = (978,5 \pm 171,1) \text{ MPa (17,49\% d'erreur)}$$

$$\sigma_{max} = (32,32 \pm 3,69) \text{ MPa (11,43\% d'erreur)}$$

$$\sigma_p = Re = (28,61 \pm 7,47) \text{ MPa (7,47\% d'erreur)}$$

$$\epsilon_{rupt} = (10,6 \pm 2,1) \% (19,5\% \text{ d'erreur})$$

Les écarts types ne sont pas négligeables. Une des raisons potentielles de ces écarts peut provenir de la machine d'essai de traction : cette dernière est adaptée pour les matériaux métalliques qui nécessitent de plus grands efforts que les matériaux plastiques. La machine de traction est donc utilisée dans sa limite basse.

Une comparaison intéressante à faire est celle concernant le module de Young obtenu avec le modèle de Qi. Il indique une dureté Shore D de 73,75 soit 348 MPa. Cependant, comme expliqué, le modèle de Qi n'est pas le plus adapté. Dans ce cas il sous-estime grandement le module de Young. Il faut considérer cette valeur comme minimale pour le module de Young.

4.1.2 Cas des éprouvettes en composite (Elium® 150 + fibres de verre)

6 éprouvettes sont moulées avec le matériau composite. Seuls 5 échantillons sont valides, 1 des éprouvettes ayant des fissurations apparues lors de son moulage (défaut de fabrication). Les données initiales sont très bruitées comme on peut le voir. Une méthode de lissage des données, décrite en ANNEXE VIII: Méthode de traitement des essais en traction, est donc mise en place dans le but de déterminer les paramètres utiles à la simulation.

Les courbes après traitement sont celles de la Figure 63. Il est ainsi possible de déterminer les valeurs moyennes et les écarts types des différents paramètres comme précédemment.

$$E = (2\,752,2 \pm 295,3) \text{ MPa } (10,73\% \text{ d'erreur})$$

$$\sigma_u = (28,68 \pm 4,42) \text{ MPa } (15,41\% \text{ d'erreur})$$

$$Re = (18,93 \pm 6,84) \text{ MPa } (36,14\% \text{ d'erreur})$$

$$E_{iso} = (554,2 \pm 135,1) \text{ MPa } (24,38\% \text{ d'erreur})$$

$$\epsilon_{rupt} = (1,9 \pm 0,2)\% (11,9\% \text{ d'erreur})$$

Cette variabilité des résultats est potentiellement due à de multiples facteurs :

- La machine n'est encore pas adaptée à des plastiques (les efforts de simulations se situent dans sa partie basse de fonctionnement)
- Le processus de moulage est artisanal. Même si le processus est identique, une erreur humaine peut s'ajouter expliquant en partie ces différences.
- Des essais en fatigue étaient réalisés le même jour, ce qui induit du bruitage dans le système de distribution de l'huile. Cette hypothèse a d'ailleurs été validée par le responsable du laboratoire.
- En présence d'un matériau de type fragile, la moindre fissure provoque la rupture du matériau.

À noter dans le cas de limite élastique que la méthode d'obtention de cette valeur présente une certaine incertitude vu qu'elle est considérée comme le point d'intersection des deux droites. Heureusement, dans le cas de matériau fragile, c'est la limite ultime qui nous intéresse particulièrement.

Dans ce cas, la comparaison du module de Young avec la méthode de Q_i n'est pas valable puisque le modèle de Q_i ne s'applique qu'aux plastiques et non aux composites.

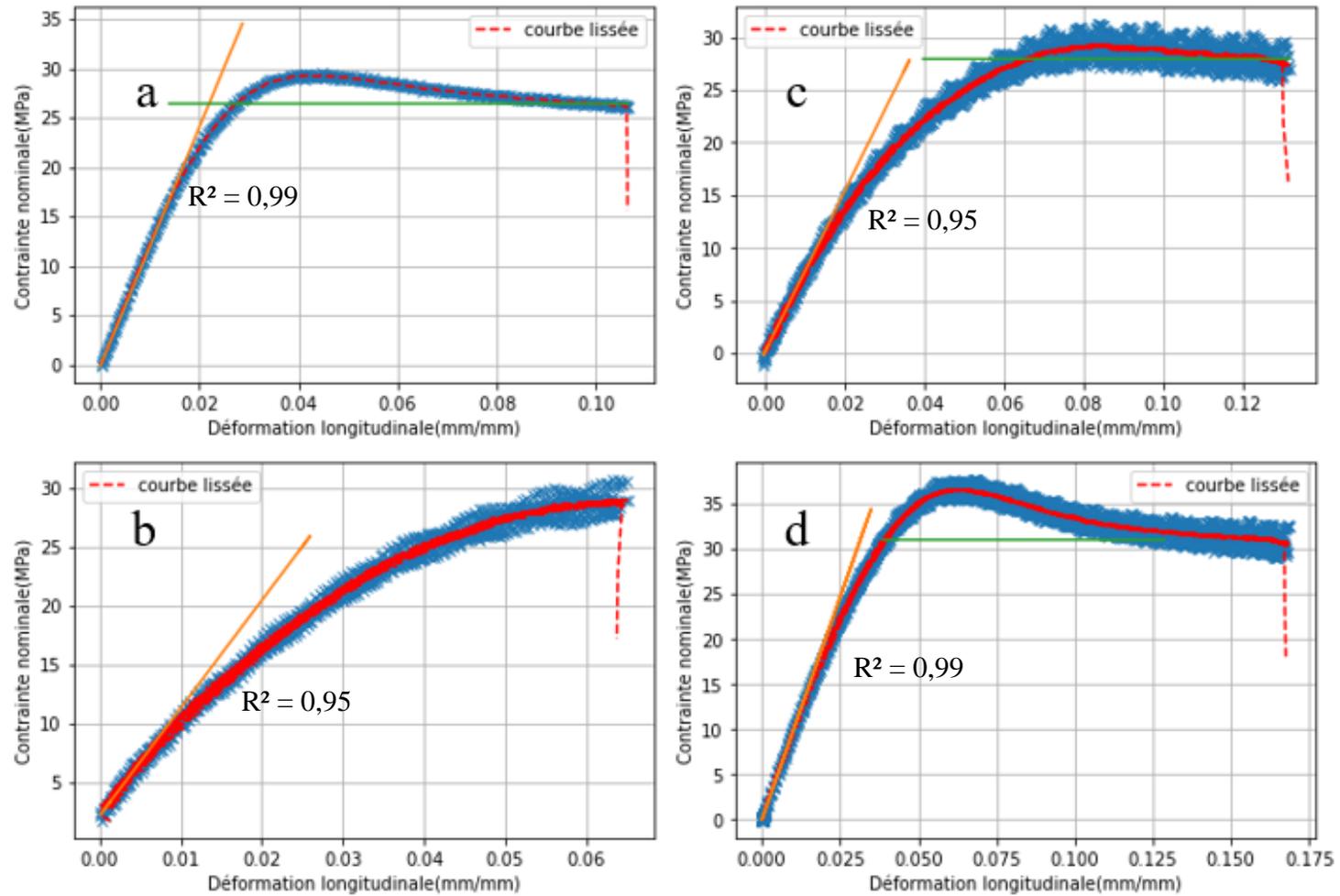


Figure 62 : Tracés de l'évolution de la contrainte nominale (MPa) en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm) des éprouvettes en polyuréthane;
 (a) : éprouvette 1; (b) : éprouvette 2, test 1, sans rupture; (c) : éprouvette 2, test 2 ; (d) éprouvette

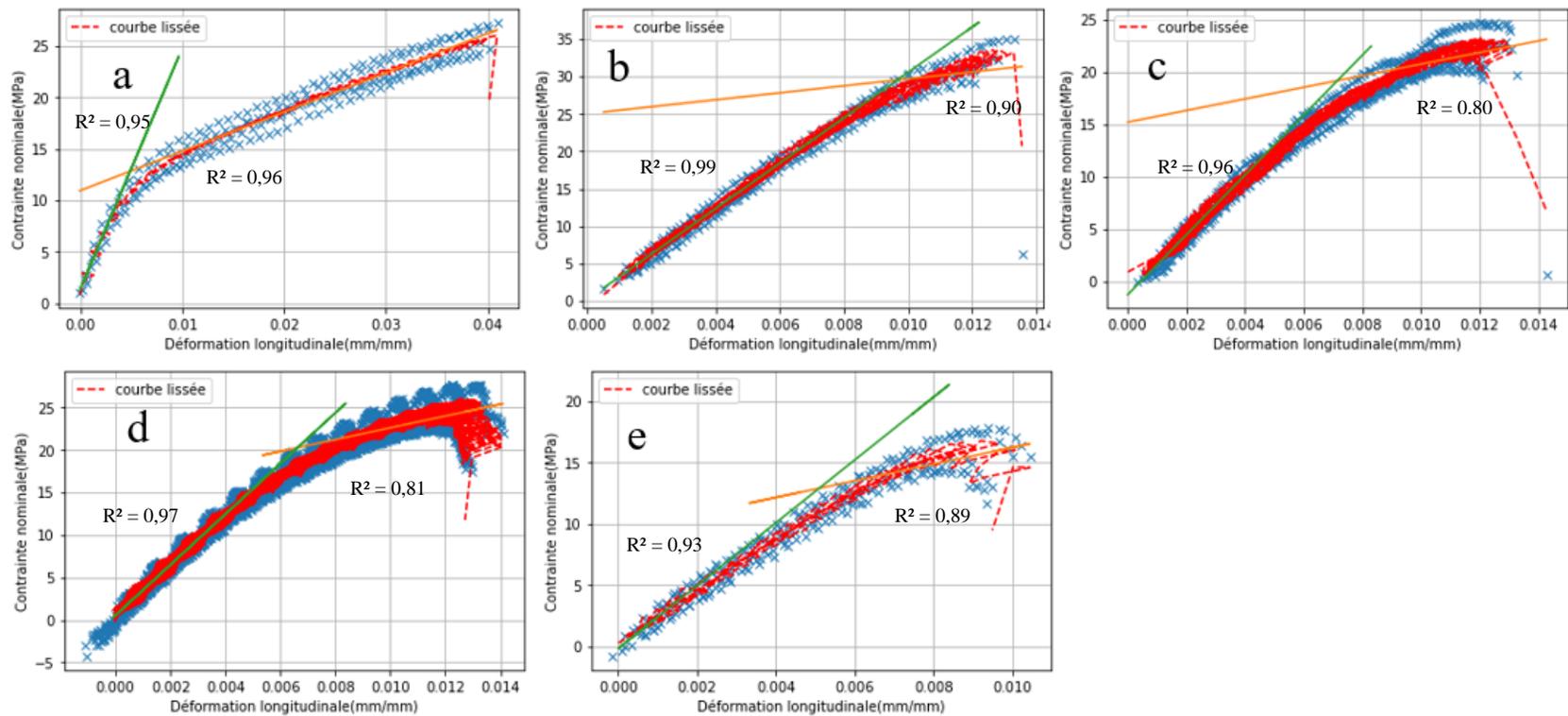


Figure 63 : Tracés de l'évolution de la contrainte nominale (MPa) en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm) des éprouvettes en composite; (a) : éprouvette 1; (b) : éprouvette 2; (c) : éprouvette 3; (d) : éprouvette 4; (e) : éprouvette 5

4.1.3 Détermination du coefficient de Poisson

Un autre paramètre important à déterminer pour les simulations est le coefficient de Poisson. La méthodologie d'obtention est décrite au chapitre 3. Elle consiste en la mesure de la déformation longitudinale et transversale. À cause d'un problème technique, cette mesure n'a pu être réalisée que pour le polyuréthane de MacMaster 8789K82 qui possède comme on l'a vu précédemment une évolution similaire.

Avec la Figure 65 on a : $\nu = 0,191 \pm 0,009$ (5% d'erreur)

Le choix de la valeur du polyuréthane de MacMaster 8789K82 est justifiable, car le coefficient de Poisson n'a pas une grande influence sur la détermination de la limite de résistance des matériaux. Comme on le rappellera par la suite, il serait tout de même intéressant de déterminer cette valeur notamment pour le composite d'étude.

En résumé de cette partie, on retient les valeurs moyennes suivantes (Tableau 7) par la suite :

Tableau 7 : Résumé des propriétés mécaniques des matériaux d'étude

	Module d'Young (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Limite ultime (MPa)	Module d'écrouissage isotrope linéaire (MPa)	Coefficient de Poisson
Polyuréthane du commerce	978,5	28,61	27,5	/	0,191
Composite à base d'Elium® et fibres de verre	2752,2	18,93	28,61	554,2	0,191

4.2 ESSAI SELON LA NORME NF EN 12 572

4.2.1 Cas du polyuréthane de Movement Factory

4.2.1.1 Suivi thermique

Comme expliqué précédemment dans le chapitre 3.1, une préparation thermique est requise dans la norme NF EN 12 572. Cette préparation consiste en une alternance de cycles chauds et cycles froids. Si le cycle chaud est réalisé dans une étuve (environnement contrôlé), le cycle froid est réalisé dans une glacière où les prises d'escalade sont mises en contact avec de la glace sèche. Pour garantir la validité de ces tests, un suivi thermique des cycles froids est réalisé (ANNEXE IV: Préparation thermique des prises d'escalade en polyuréthane). Chaque cycle se présente comme sur la Figure 64, les températures de contact diminuent et convergent vers la température ambiante.

La température à vide est ici de $-38,8^{\circ}\text{C}$ se situant bien en dessous du minimum requis à -30°C (température exigée par la norme). La préparation thermique est donc correcte.

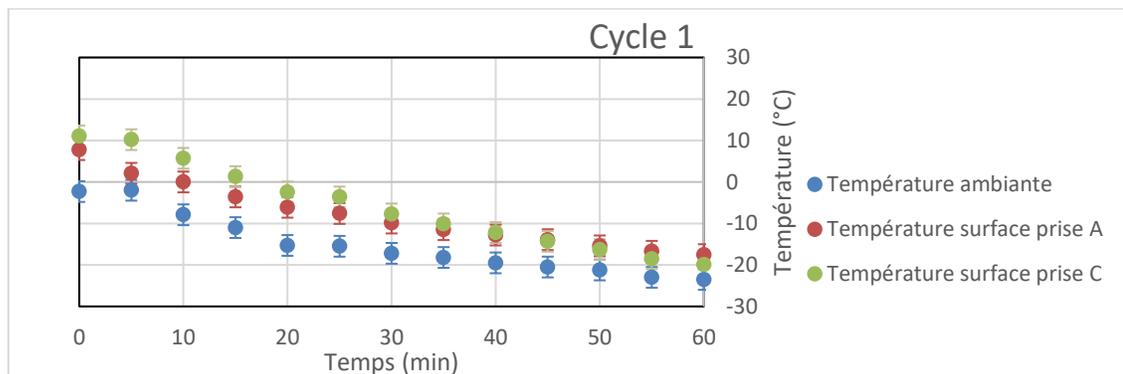


Figure 64 : Suivi thermique des prises d'escalades en polyuréthane de la marque Movement factory, graphique présentant la température en Celsius ($^{\circ}\text{C}$) en fonction du temps en minutes (min)

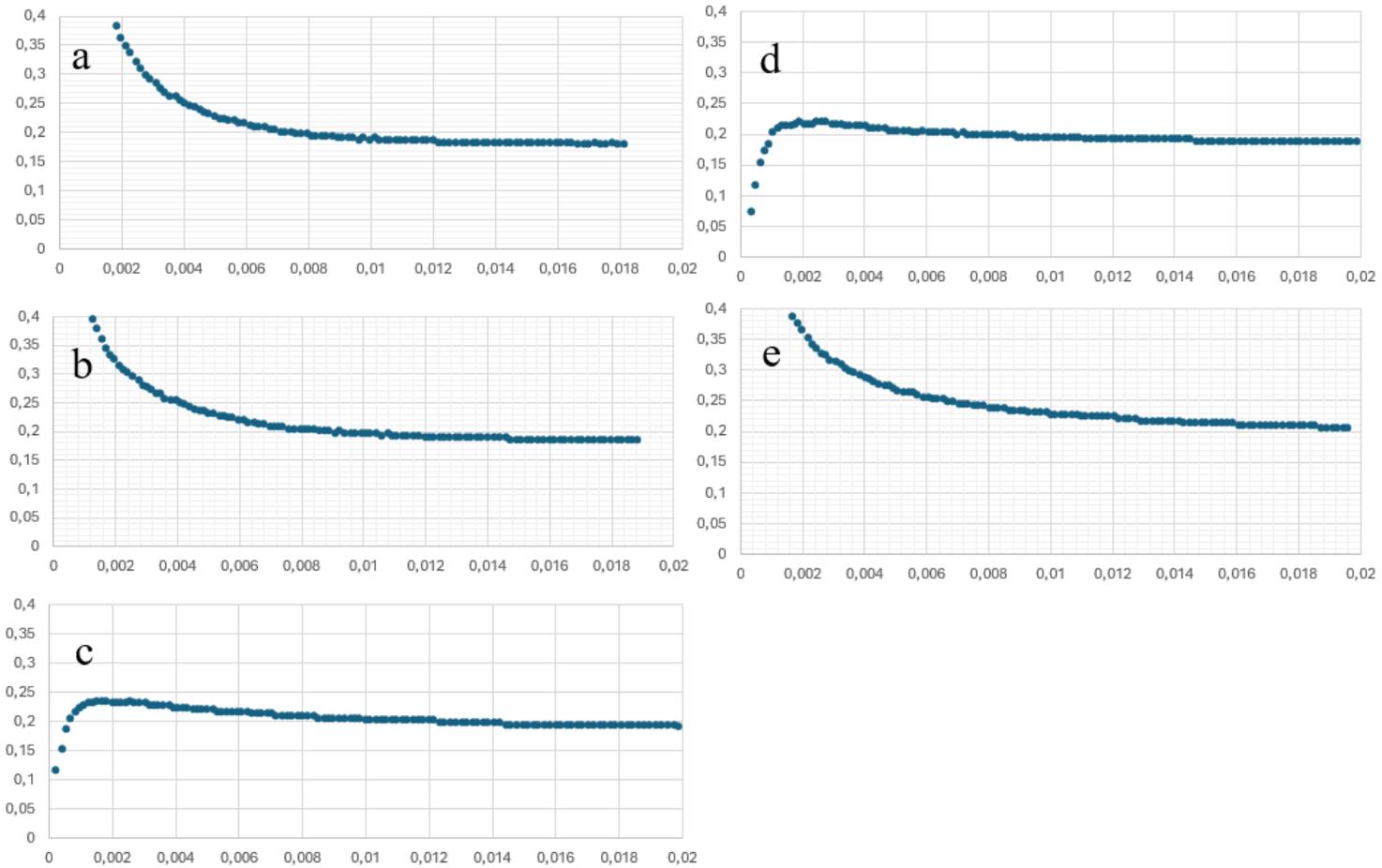


Figure 65 : Valeur du coefficient de poisson des éprouvettes tests en 8789K82 polyuréthane en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm) de ces dernières :

(a) éprouvette 1, (b) éprouvette 2, (c) éprouvette 3, (d) éprouvette 4, (e) éprouvette 5

4.2.1.2 Test mécanique

- Demande de la norme

La norme NF EN 12 572, comme expliquée précédemment, ne requiert pas de valeur limite, mais une validation de différents tests selon des critères. Il faut que les prises d'escalades puissent supporter 150 kg dans la configuration la plus défavorable.

Dans la configuration réglementaire, les tests de la norme ont tous été validés sans aucune apparition de fissure à l'intérieur du matériau (Tableau 8). Il est à remarquer tout de même qu'il est nécessaire d'utiliser la vis de serrage de sécurité pour garantir le test de rotation.

Tableau 8 : État de validation des tests de la norme pour les prises en polyuréthane

Test	État du test
Serrage	Valide
Arrachement	Valide
Rotation	Valide

- Limite

Comme expliqué dans la partie 3.3.3 le montage susmentionné est utilisé pour déterminer la valeur limite de rupture des prises d'escalades du commerce dans la configuration de la Figure 45. On mesure l'évolution de la force exercée sur la prise d'escalade en fonction du déplacement verticale de la machine de traction (Figure 66).

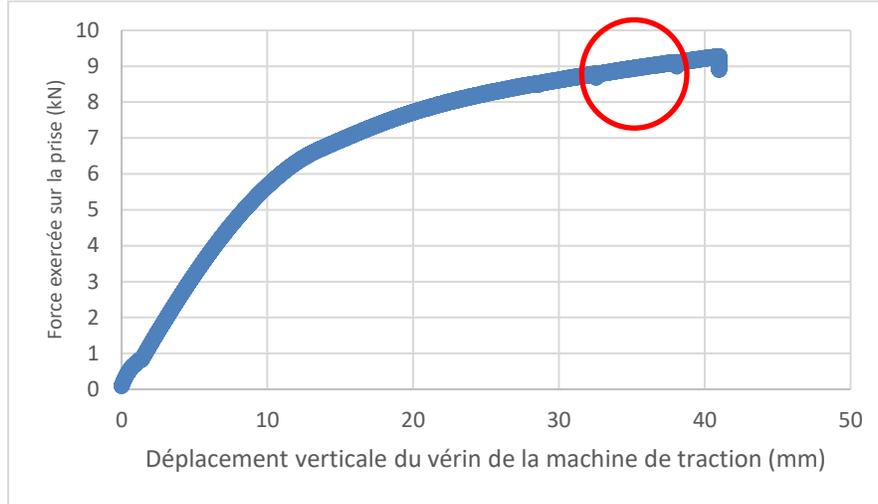


Figure 66 : Évolution de la force exercée sur la prise d'escalade en polyuréthane en fonction du déplacement (mm)

On peut remarquer qu'un phénomène de diminution de la force est observé dans le cercle rouge de la Figure 66. La

Figure 67 présente cette zone plus en détail. Il s'agit d'un phénomène de glissement qui résulte du repositionnement du crochet.

Le point négatif de notre expérience est que la limite de rupture de la prise d'escalade n'a pas pu être atteinte. Cependant, ce test nous informe tout de même d'une chose. Les prises d'escalades en polyuréthane peuvent supporter un effort d'au moins **9 290 N** lors d'un chargement vertical à leur axe de fixation. Cette valeur est à voir non pas comme une valeur limite, mais comme une valeur seuil. L'effort traduit donc une masse exercée de 946 kg, soit un coefficient de 6,31 de sécurité minimum vis-à-vis de la norme NF EN 12 572 qui exige une masse de 150 kg. Une explication plausible pour expliquer le fait que la prise ne s'est pas brisée est que le crochet a atteint sa limite élastique. On entre ainsi dans son domaine plastique.

Comme on peut le remarquer, la prise d'escalade a réussi à supporter des efforts élevés. Une explication quant à la valeur élevée de cette force provient du fait que la prise ne subit pas qu'une force verticale : en effet, le chargement est combiné. Une partie des efforts sont par exemple dissipés par le crochet.

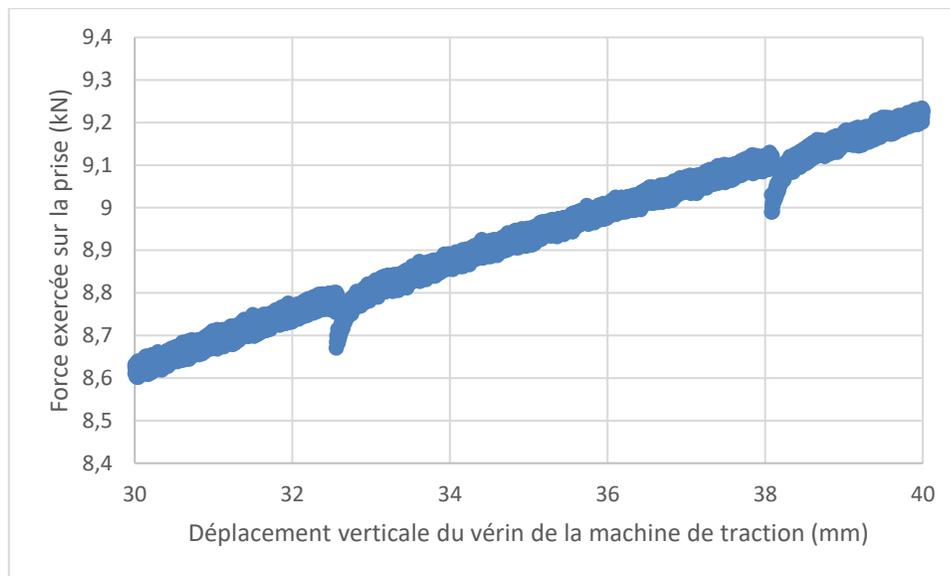


Figure 67 : Zoom sur l'évolution de la force exercée sur la prise d'escalade en polyuréthane en fonction du déplacement (mm)

4.2.2 Cas du composite (Elium® 150 + fibre de verre)

4.2.2.1 Suivi thermique

De même qu'expliqué à la partie 4.2.1.1 le cycle thermique de préparation des prises d'escalade (Figure 68) en composite est réalisé. Des éprouvettes en composite (cf. Figure 39) sont également soumises à ce test pour vérifier l'invariance thermique du matériau. Le but avec cette expérience est de savoir si les cycles thermiques affectent les propriétés du matériau.

Pour cela, on utilise des éprouvettes en composite ayant subi le traitement thermique. Elles sont soumises aux mêmes tests de traction que celles n'ayant pas subi ce traitement. On

utilise le processus de traitement des données de l'ANNEXE VIII: Méthode de traitement des essais en traction. La Figure 69 est ainsi obtenue pour les deux éprouvettes ayant subi ce test thermique. On en déduit ainsi les paramètres présentés dans le Tableau 9. Ces paramètres se situent à l'intérieur de l'intervalle de sécurité déterminé précédemment ou bien à sa limite. Cela justifie ainsi le parti pris concernant cette invariance thermique. Le traitement thermique n'a pas d'influence sur les propriétés mécaniques du composite.

$T_0 = -31,1^{\circ}\text{C}$

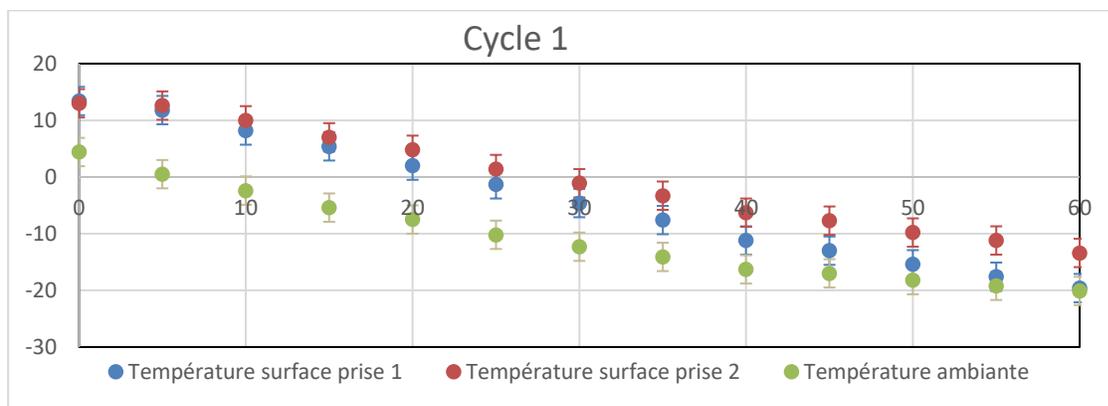


Figure 68: Suivi thermique des prises d'escalades en composite à base d'Elium® 150, graphique présentant la température en Celsius ($^{\circ}\text{C}$) en fonction du temps en minutes (min)

Tableau 9 : Tableau des paramètres pour les essais en composite ayant subi le traitement thermique

	$E(\text{MPa})$	$\sigma_{max}(\text{MPa})$	E_{Tiso}	Re
Test 1	2707	23,59	585	20,37
Test 2	2929	30,79	554	27,1

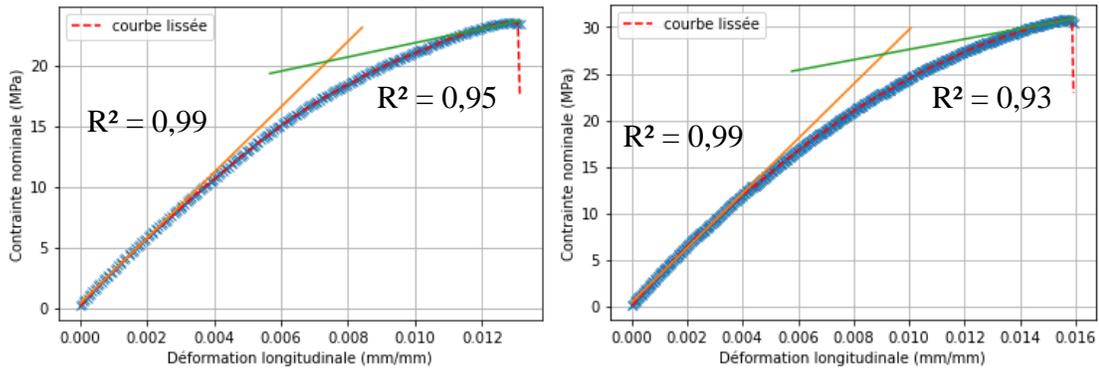


Figure 69 : Tracés de l'évolution de la contrainte nominale (MPa) en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm) des éprouvettes en composite ayant subi le traitement thermique

4.2.2.2 Test mécanique

- Demande de la norme

Comme dans le parti 4.2.1.2 les tests expérimentaux selon la norme NF EN 12 572 ont été réalisés. Comme on voit dans le Tableau 10, l'entièreté des tests a été validée.

Tableau 10 : État de validation des tests de la norme pour les prises en composite

Test	État du test
Serrage	Valide
Arrachement	Valide
Rotation	Valide

- Limite

Comme à la section 4.2.1, l'évolution de la force exercée sur la prise en composite en fonction du déplacement a été mesurée. Le phénomène de glissement apparaît sur ces prises (cf. Figure 70). Ce phénomène est grandement visible à la Figure 71.

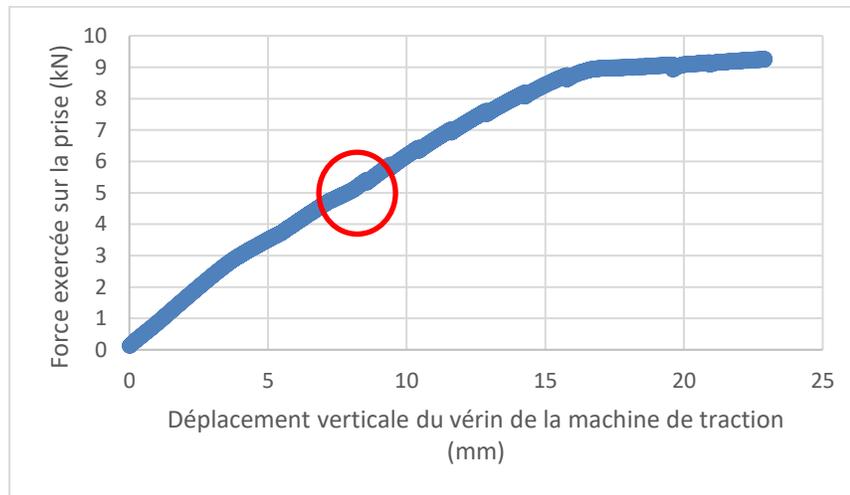


Figure 70 : Évolution de la force exercée sur la prise d'escalade en composite en fonction du déplacement (mm)

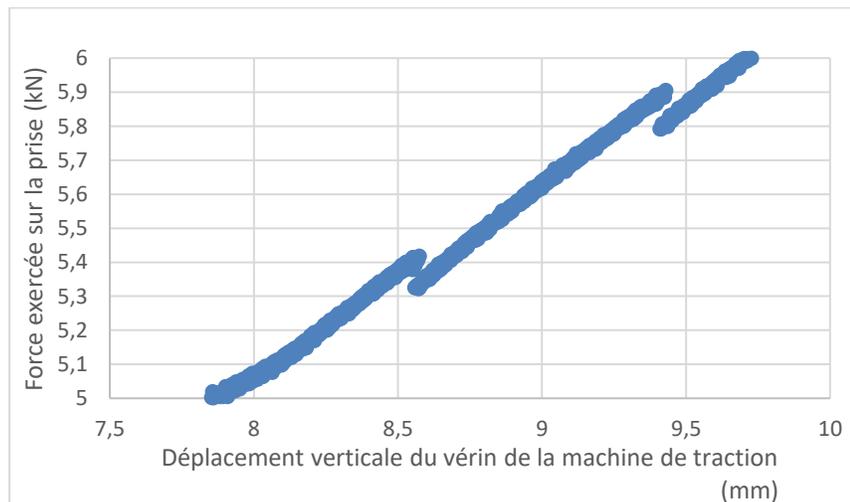


Figure 71 : Zoom sur l'évolution de la force exercée sur la prise d'escalade en composite en fonction du déplacement (mm)

Encore une fois, la rupture n'a pas eu lieu avec la prise d'escalade en composite à base d'Elium®. Les conclusions à en tirer sont les mêmes que précédemment, avec l'existence d'une valeur seuil avec cette prise-ci de **8 990 N** soit une masse de 916 kg exercée verticalement à la vis de fixation. De nouveau, le facteur de sécurité est élevé avec une valeur de 6,11 au minimum. À noter que l'on peut remarquer que l'essai s'est terminé à des charges similaires à l'essai sur les prises du commerce. Cet arrêt a été provoqué par une déformation excessive du crochet. Cela conforte ainsi notre hypothèse sur le fait que la raison pour laquelle les tests de limite de rupture ne sont pas arrivés à la limite est que le crochet a atteint sa limite élastique.

4.3 MODELISATION NUMERIQUE

Plus que la simple validation des tests de la norme NF EN 12 572 la détermination de facteurs de sécurité pour garantir la sécurité d'utilisation des prises est au cœur de notre étude. Comme expliqué précédemment les éprouvettes sont modélisées pour vérifier la validité du modèle matériau choisi ainsi que les prises d'escalade pour quantifier la limite de rupture. Le but est d'également pouvoir simuler les prises d'escalade sur COMSOL® pour comparer les résultats expérimentaux et numériques.

4.3.1 Test normé de traction (ASTM D638)

4.3.1.1 Éprouvette en Polyuréthane

Dans le cas du polyuréthane qui est considéré comme un matériau ductile, il est modélisé comme ayant une zone élastique et une zone parfaitement plastique. On simule par la suite l'éprouvette avec une force de 650 N. Cette dernière permet de réaliser une contrainte équivalente à la limite élastique. On obtient la répartition de contrainte de Von Mises suivant (cf. Figure 72).

Plus que la répartition de contrainte, c'est la courbe de traction qui est intéressante. La Figure 73 présente cette courbe dans le domaine élastique du polyuréthane d'étude.

La plastification d'un matériau ductile (dépassement de la limite élastique) entraîne la déformation permanente de ce dernier. Dans ce cas, cela reviendrait au fait que les prises d'escalade se déforment sous l'effet du grimpeur. Ce n'est pas envisageable.

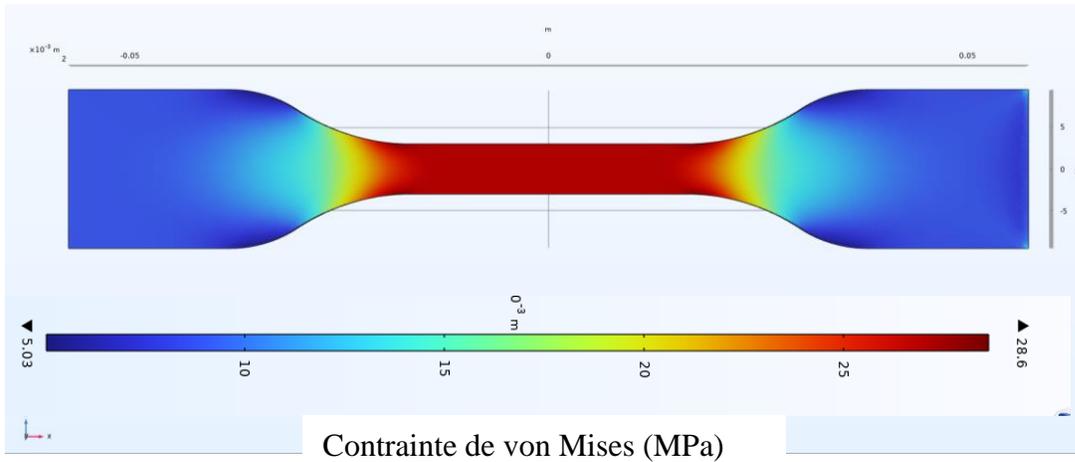


Figure 72 : Répartition de la contrainte de Von Mises dans une éprouvette de Type IV en Polyuréthane soumise à une force de traction de 650 N

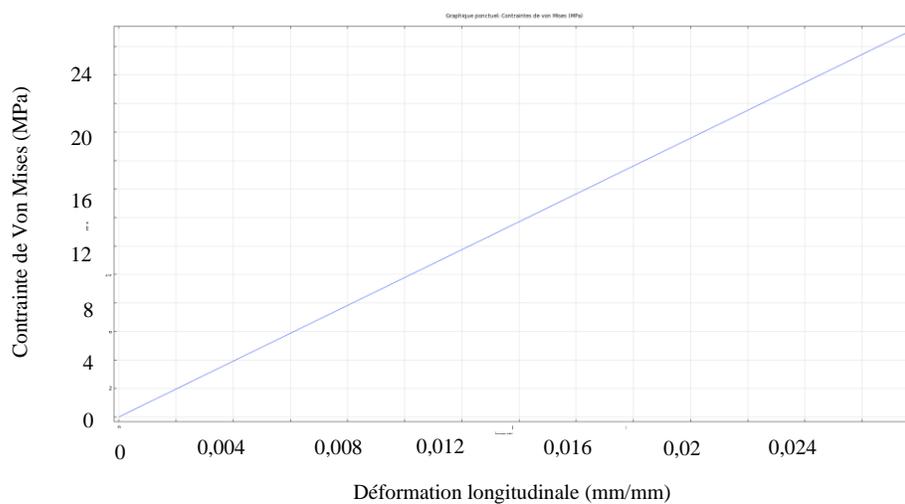


Figure 73 : Courbe de traction du polyuréthane de la zone élastique obtenu par modélisation d'une éprouvette de Type IV

En addition des contraintes, le critère de Von Mises est déterminé dans le matériau. Ce critère s'applique dans le cadre de matériau ductile, ce qui est exactement le matériau utilisé. L'effort sollicitant l'éprouvette est choisi à la limite du domaine élastique ($F = 650 \text{ N}$). Après application du critère, ce dernier se concentre dans la zone centrale de l'éprouvette. Cela est cohérent avec le fait que dans le cas d'une éprouvette la rupture ait lieu dans la zone utile. La répartition du critère de Von Mises est la suivante (cf. Figure 74). Une contrainte de 28,61 MPa entraîne donc un facteur de sécurité selon le critère de Von Mises de 1. Les résultats expérimentaux et numériques sont donc les mêmes.

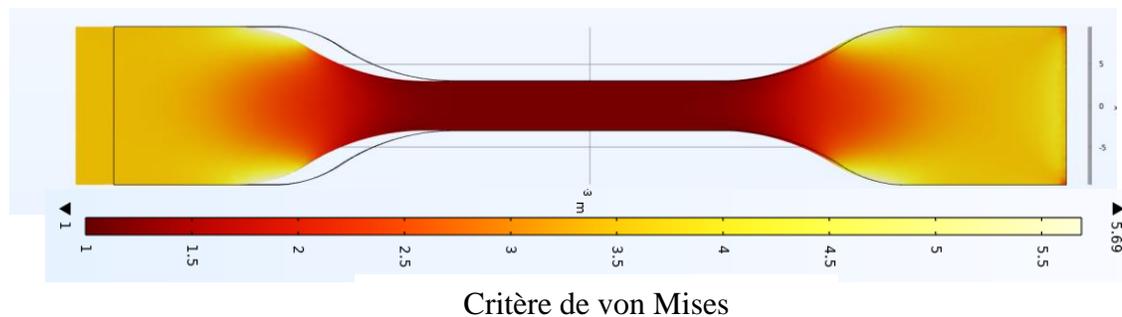


Figure 74 : Répartition du critère de Von Mises dans une éprouvette de Type IV en polyuréthane pour une sollicitation d'une force de traction de 650 N

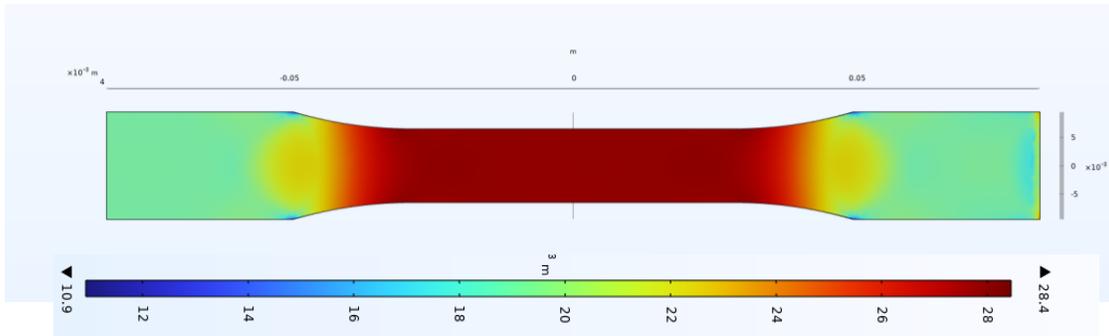
4.3.1.2 Éprouvette en Composite

Selon la même démarche, le matériau innovant en composite fait à base de résine Elium® 150 et de fibres de verre avec des éprouvettes de type I de 7 mm est étudié. Au vu des résultats des tests de la partie 4.2 il s'agit cette fois-ci d'un matériau fragile. Son comportement est choisi comme ayant une loi de comportement bilinéaire.

Comme précédemment, la courbe de traction du matériau est déterminée pour la comparer aux courbes expérimentales obtenues afin de savoir si le modèle est cohérent. Au vu de la Figure 76, le comportement correspond parfaitement à celui de la Figure 63.

Encore une fois, c'est la quantification d'un critère de limitation en statique qui est intéressante pour pouvoir quantifier l'existence d'une rupture. Ici, c'est un matériau fragile, comme expliqué dans le chapitre 2.1, le critère de Coulomb-Mohr est donc à privilégier. Ce

dernier nécessite le calcul non pas des contraintes de von Mises mais, des contraintes principales dont on cherche celle avec la différence en valeur absolue la plus élevée. Cette dernière se prénomme la contrainte de Coulomb-Mohr (Figure 75). On illustre la répartition de contrainte pour la valeur de 2 550 N de force exercée. Cette dernière valeur n'a pas été choisie au hasard, elle génère une valeur de critère de 1.



Contrainte de Coulomb-Mohr (MPa)

Figure 75 : Répartition de la contrainte de Coulomb-Mohr dans une éprouvette de Type I en composite pour une sollicitation d'une force de traction de 2 550 N

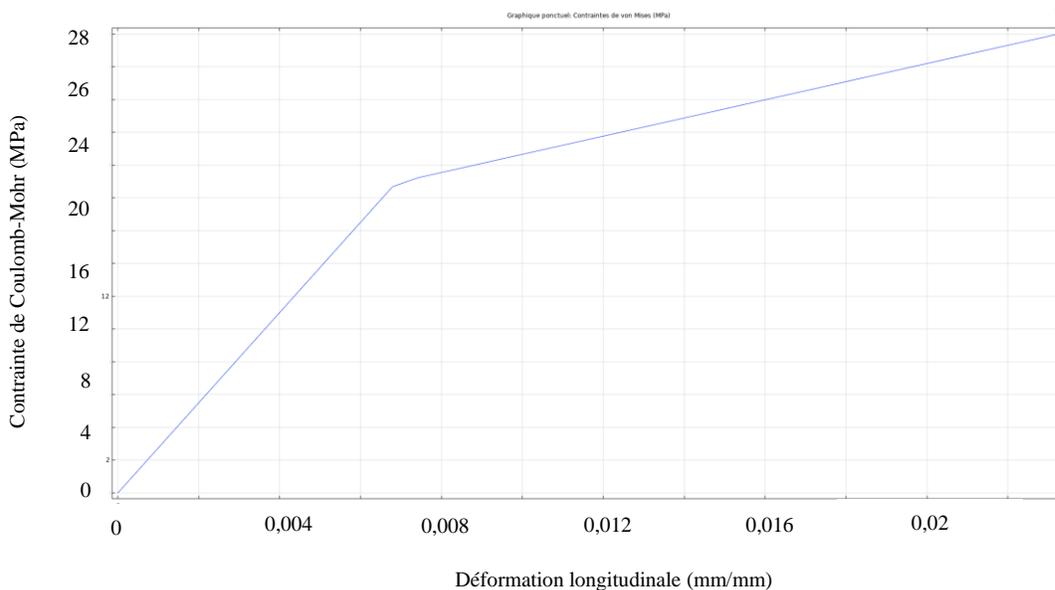
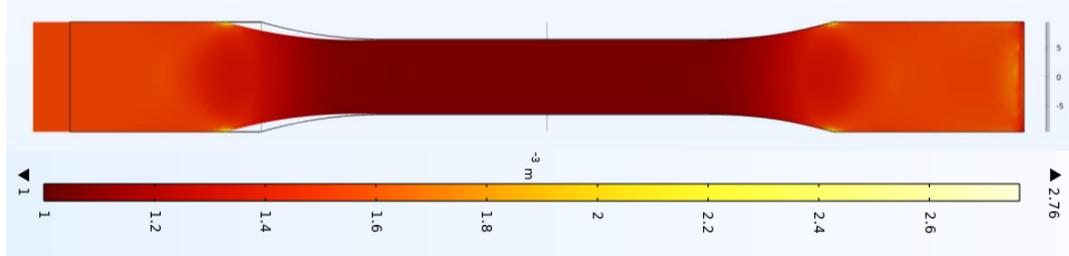


Figure 76 : Courbe de traction du composite obtenu par modélisation d'une éprouvette de Type I en composite



Critère de Coulomb-Mohr

Figure 77 : Répartition du critère de Coulomb-Mohr dans une éprouvette de Type I en composite pour une sollicitation d'une force de traction de 2 550 N

De la contrainte de Coulomb-Mohr, il est possible de déduire le critère illustré ci-dessus (Figure 77). Cette dernière valeur est totalement cohérente puisqu'elle indique un critère de Coulomb-Mohr de 1 pour une contrainte de 28,61 MPa (limite ultime du composite)

Ces tests permettent de vérifier que le choix de loi de comportement réalisé est correct. Les résultats étant similaires à ceux expérimentaux, il est possible de s'intéresser à la modélisation des prises d'escalade.

4.3.2 Simulations sur les prises d'escalade

4.3.2.1 Prise en polyuréthane

Pour continuer le travail de rétro-ingénierie, la prise du commerce en polyuréthane a été reproduite sur le logiciel d'éléments finis COMSOL®. Comme expliqué précédemment, 2 conditions aux limites sont étudiées dans ce cas-ci (Figure 54). Le chargement est dans les deux cas surfacique et placé verticalement à l'axe de fixation.

Le but est de quantifier le critère de Von Mises (utilisé dans le cas des matériaux ductiles) dans le but de comparer les résultats à ceux expérimentaux de la norme NF EN 12 572 obtenu à 4.2.1.2 . La limite de référence est la limite élastique.

Pour déterminer cette valeur limite, on charge progressivement la prise avec une force croissante et on détermine le critère de Von Mises (Figure 78).

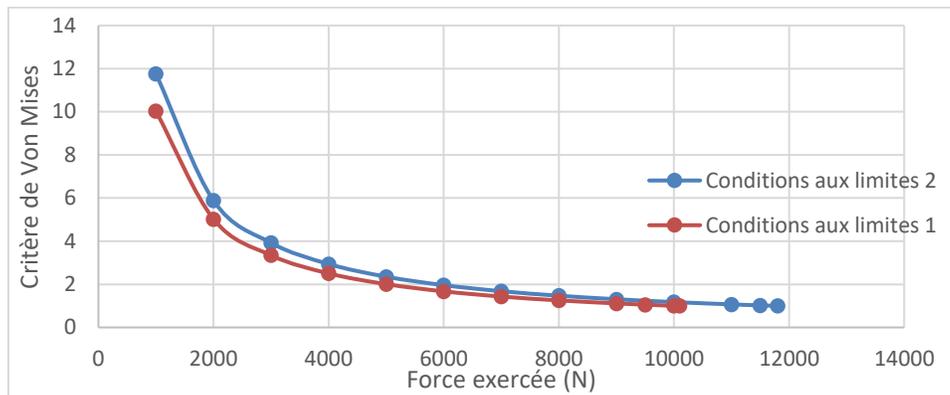
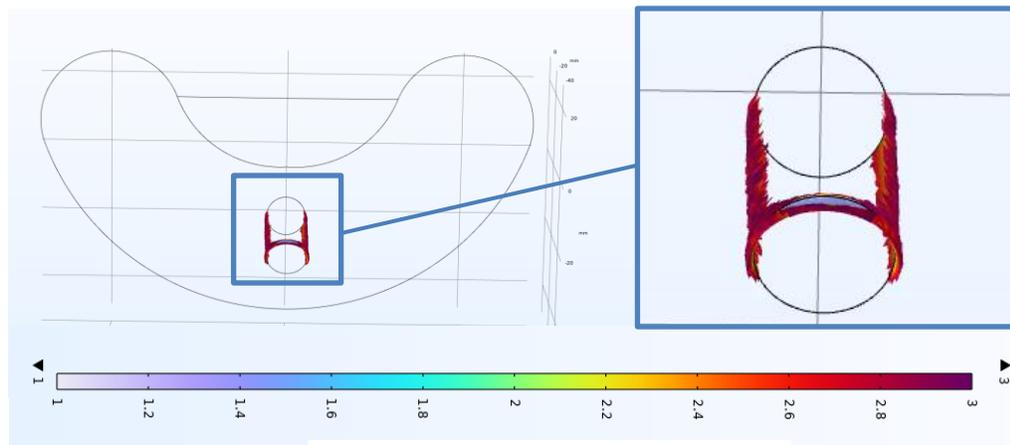


Figure 78 : Évolution du minimum du critère de Von Mises en fonction de la charge exercée

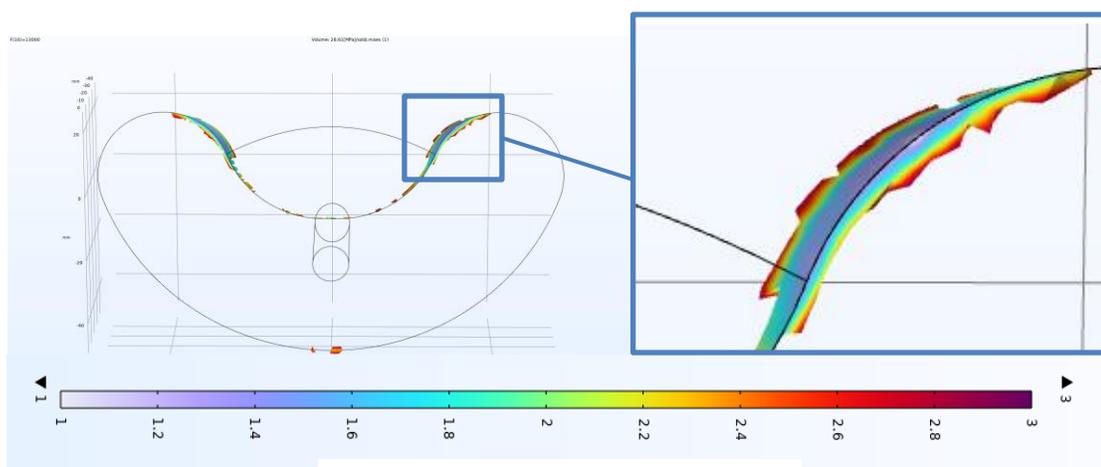
Les valeurs seuils qui correspondent à un critère de von Mises de 1 sont ainsi obtenues. La première condition aux limites détermine une valeur critique de 10 000 N soit 1019 kg. Dans le deuxième cas, c'est une valeur de 13 000 N soit 1325 kg. Il est à noter que dans chacun des cas les résultats sont en adéquation avec la détermination de l'effort seuil (4.2.1.2) qui est de 946 kg. La valeur du coefficient de sécurité est de plus déterminée dans chacun des cas : elle est de 6,79 pour conditions aux limites 1 et 8,83 pour Conditions aux limites 2. Il ne faut pas perdre de vue que l'essai visant à déterminer la charge limite ne s'est pas rendu à la défaillance de la prise.

Pour discuter des résultats, la répartition du critère de von Mises est déterminée dans chacun des cas (Figure 79 et Figure 80). Pour une simplicité de compréhension des résultats, seules les valeurs de coefficient de sécurité faible sont affichées (échelle allant de 1 à 3). Le reste de la prise ayant un coefficient de sécurité supérieur à 3. Dans le cas des conditions aux limites 1, c'est autour de l'axe de fixation que se concentre le facteur critique (zoom de la Figure 79), plus spécifiquement sa partie supérieure. Pour les conditions aux limites 2, c'est la partie supérieure de la prise en contact avec la face arrière qui subit le facteur de sécurité critique (zoom de la Figure 80).



Critère de von Mises

Figure 79 : Répartition du critère de Von Mises sur la prise du commerce pour une force exercée de 10 000 N (Condition aux limites 1)



Critère de von Mises

Figure 80 : Répartition du critère de Von Mises sur la prise du commerce pour une force exercée de 11 800 N (Condition aux limites 2)

À noter que la réalité se place entre ces deux valeurs limites qui représentent elles-mêmes des cas limites. La symétrie des résultats provient de la symétrie du chargement et de la symétrie de la prise d'escalade. On comprend ainsi que l'encastrement du trou de vis (CL1) est une condition plus contraignante que l'encastrement de la face arrière (CL2). En effet la

zone sur laquelle se concentre les efforts est beaucoup plus réduite (partie supérieure du trou de fixation à l'avant pour la Figure 79), alors que ce facteur est réparti de manière plus homogène dans la Figure 80 (zone supérieure de contact entre la prise et le mur).

4.3.2.2 Prise en composite

Ayant vu dans la partie précédente que le modèle matériau du composite est validé, la modélisation du comportement des prises d'escalade est étudiée. Le but est, comme précédemment, de quantifier le critère de Coulomb-Mohr. On va pour cela étudier 3 conditions aux limites selon deux chargements distincts. Le premier chargement est situé sur l'axe de fixation pour reproduire les conditions d'essais expérimentales tandis que le deuxième est situé le plus loin possible de l'axe de ce dernier, créant ainsi le cas le plus défavorable et contraignant.

Étant ici dans le cas d'un matériau fragile, la moindre apparition d'une valeur de 1 pour le critère de Coulomb-Mohr provoque l'amorce d'une fissure dans le matériau qui va se répandre et provoquer ainsi la rupture de la prise.

1) Chargement sur l'axe de fixation

Comme précédemment, la force est appliquée de manière progressive pour déterminer la force limite créant une valeur du critère de Coulomb-Mohr de 1. L'évolution du critère en fonction de la force est illustrée ci-dessous :

Selon la Figure 81, il est possible de déterminer la force limite dans chacun des cas. Elles sont :

- 7 400 N soit 754 kg pour les déplacements imposés 1
- 31 000 N soit 3160 kg pour les déplacements imposés 2
- 9 000 N soit 917 kg pour les déplacements imposés 3

Selon ces valeurs, seules les conditions aux limites 2 et 3 respectent le test expérimental de la partie 4.2.2.2 avec la valeur seuil de 816 kg. Les déplacements imposés 3 donnent une condition de force plus limitante que les déplacements imposés 2.

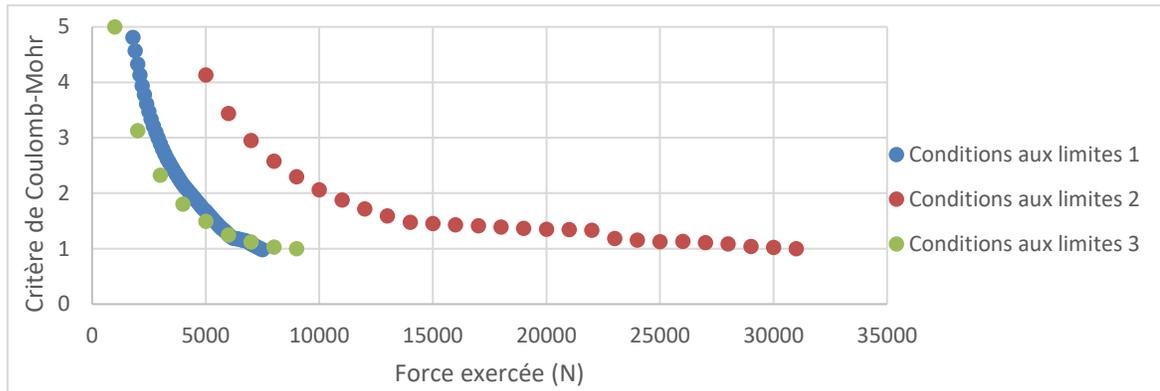
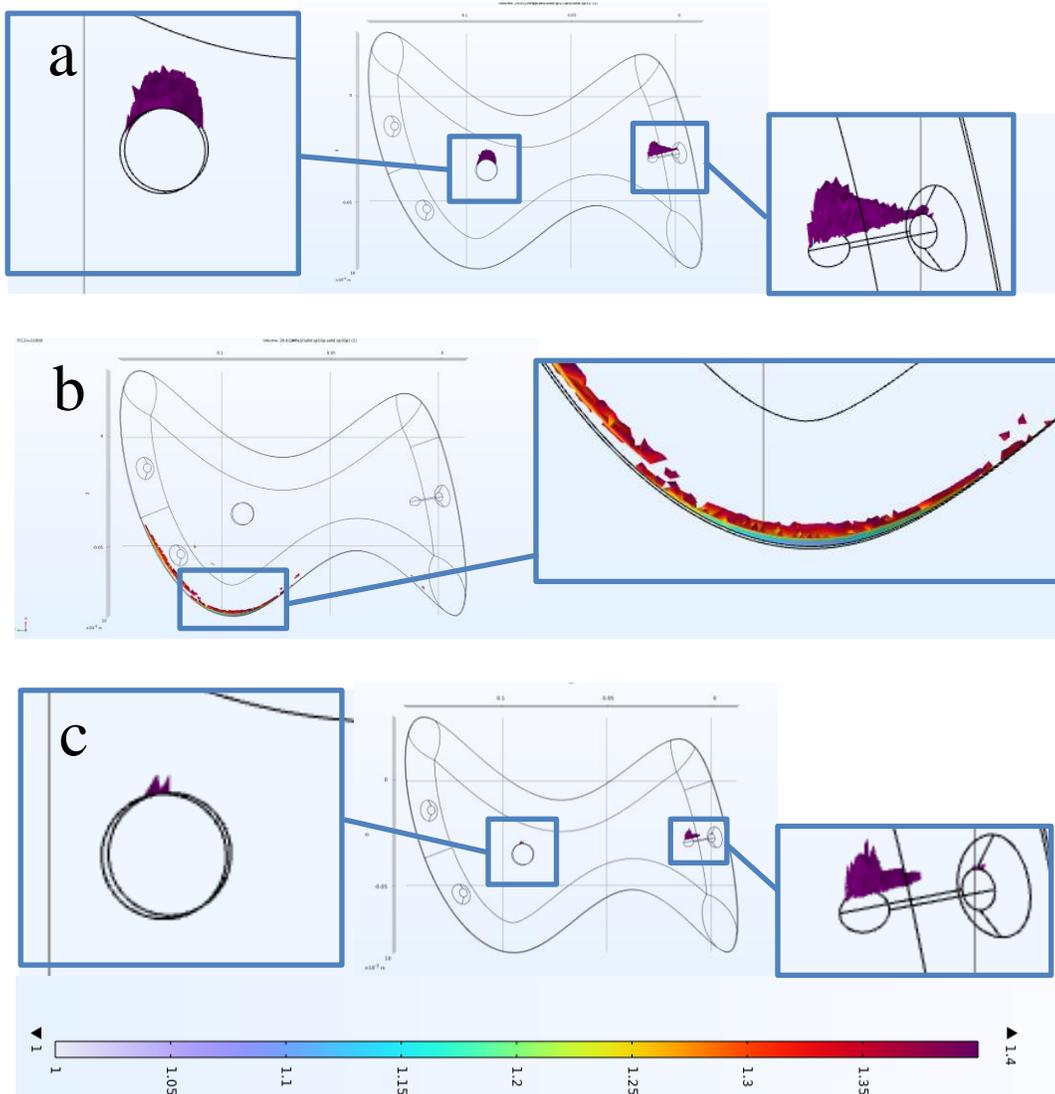


Figure 81 : Évolution du minimum du critère de Coulomb-Mohr en fonction de la charge exercée avec un chargement axial

Il est à remarquer que les déplacements imposés 1 et 2 encadrent la contrainte de déplacements imposés 3. En effet, comme on le voit à la Figure 82, les contraintes sont beaucoup plus concentrées dans le cas 1 que dans le cas 2. Pour illustrer ces écarts, on utilise la Figure 82. Pour un souci de lisibilité, seules les valeurs critiques sont représentées (c'est-à-dire celle avec un critère de Coulomb-Mohr de 1 à 1,4). Les autres zones ont une valeur supérieure.

Dans le cas des conditions aux limites 1 qui sont les plus limitantes, la valeur critique du critère se situe autour des points de fixations (Figure 82.a) tandis que pour les conditions aux limites 2 cette valeur limitante se retrouve sur la partie inférieure de contact entre le mur et la prise d'escalade (Figure 82.b). On remarque que les contraintes sont beaucoup plus concentrées dans le cas 1, ce qui explique le fait que ce dernier atteint la valeur critique de 1 plus rapidement. Pour ce qui concerne les conditions aux limites 3, les zones de chargement critiques sont sensiblement identiques à celles des conditions 1 (Figure 82.c). C'est la libération de la rotation qui augmente la valeur pour lequel le critère est de 1.

Ici, le cas 3 est plus approprié, car il permet de tenir compte de la concentration de contrainte comme dans le cas 1 tout en limitant la contrainte excessive en encastrement dans les trous de fixation.



Critère de Coulomb-Mohr

Figure 82 : Répartition du critère de Coulomb-Mohr sur la prise d'étude pour une force limite exercée avec un chargement axial avec zooms intéressants;
a : Conditions aux limites 1 $F = 7\,400\text{ N}$, b : Conditions aux limites 2 $F = 31\,000\text{ N}$
et c : Conditions aux limites 3 $F = 9\,000\text{ N}$

2) Chargement le plus loin possible de l'axe de fixation

Même si les résultats précédents permettent de comparer la modélisation aux tests expérimentaux, ce n'est pas le chargement le plus limitant en termes de détermination de coefficient de sécurité. Pour se placer dans ce cas on réalise une étude similaire en appliquant la force le plus loin possible de l'axe principal de fixation de la prise d'escalade. On commence par tracer l'évolution du critère de Coulomb-Mohr en fonction de la force appliquée (Figure 83).

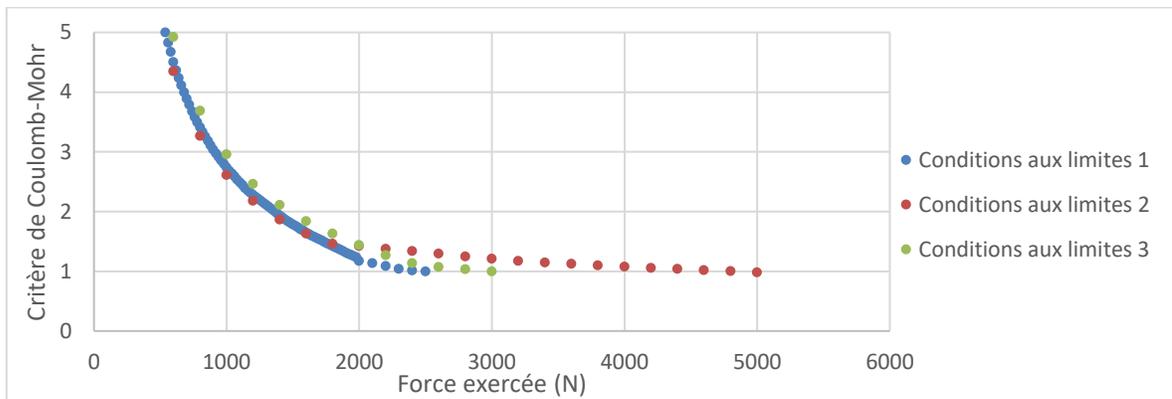


Figure 83 : Évolution du minimum du critère de Coulomb-Mohr en fonction de la charge exercée avec un chargement désaxé

Selon la Figure 83, il est possible de déterminer la force limite dans chacun des cas. Elles sont :

- 2 550 N soit 259 kg pour les conditions aux limites 1.
- 4 800 N soit 489 kg pour les conditions aux limites 2
- 3 000 N soit 306 kg pour les conditions aux limites 3

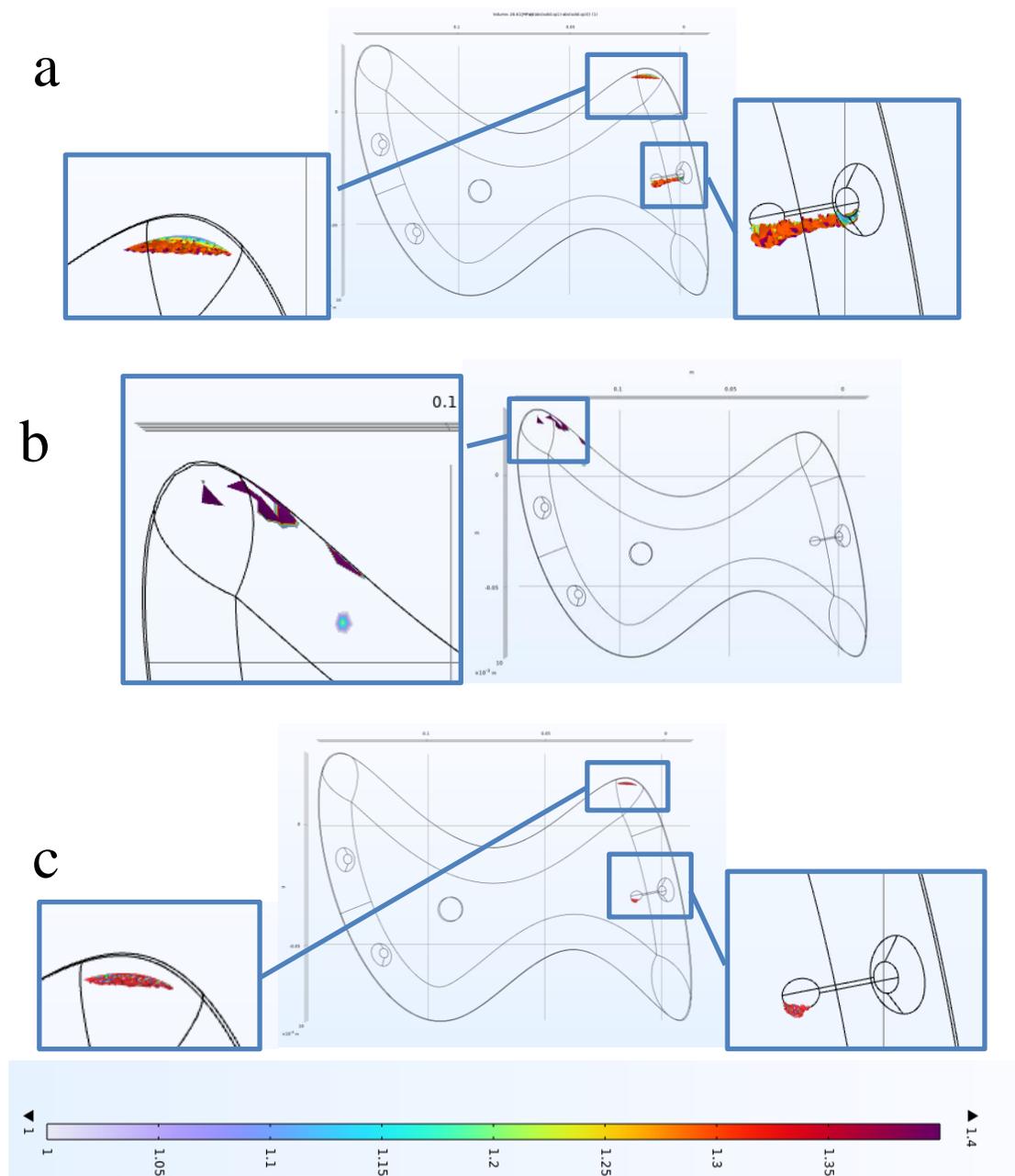
Au vu de ces résultats, on peut remarquer que les valeurs critiques sont nettement inférieures à celles obtenues avec un chargement axial. On peut donc supposer que si le test de rupture avait été mené dans cette configuration, la prise aurait brisé pour des charges inférieures. La rupture aurait donc eu lieu avant la déformation plastique du crochet d'essai.

De même que précédemment, on ne représente que les valeurs du critère de Coulomb-Mohr limitantes (1 à 1,4). Les zones transparentes présentent donc un critère supérieur.

Les commentaires à faire sur cette étude sont sensiblement identiques à ceux faits dans le cas d'un chargement axial. Le cas le plus limitant au vu de la Figure 83 est celui des conditions aux limites 1. L'effort y est concentré autour du trou de fixation de la contre vis et de la zone d'application de la force (Figure 84.a). Les conditions aux limites 2, à l'inverse, présentent un critère de Coulomb-Mohr de 1 à la zone supérieure de contact entre la prise et le mur (Figure 84.b). On comprend que dans ce deuxième cas, les contraintes sont beaucoup moins concentrées, ce qui explique que l'effort limite (Figure 83) est plus grand. Encore une fois, ce sont les conditions aux limites 3 qui offrent un compromis entre les deux. Elles traduisent la concentration des contraintes autour du trou de la contre-vis (Figure 84.b) tout en permettant d'atteindre un effort limite supérieur (Figure 83). Même si, à l'inverse de la partie précédente, il n'est pas possible de comparer les résultats numériques avec des résultats expérimentaux. On peut admettre par extrapolation que les mêmes conclusions sont possibles. Les conditions aux limites 3 sont les plus appropriées dans ce cas.

À la suite de ces modélisations, on peut déduire que :

- Dans le cas d'un point de fixation simple, la condition aux limites d'encastrement du trou de fixation est la meilleure (Condition aux limites 2 de la partie 4.3.2.1). Elle est la plus appropriée.
- Dans le cas d'existence de vis et contre-vis, il est préférable de bloquer le déplacement normal de la face arrière et de permettre la rotation des vis autour de leur axe de fixation (Contrainte de déplacements imposés 3 de la partie 4.3.2.2) pour limiter le surdimensionnement.



Critère de Coulomb-Mohr

Figure 84 : Répartition du critère de Coulomb-Mohr sur la prise d'étude pour une force exercée avec un chargement désaxé:
 a : Conditions aux limites 1 $F = 2\,550\text{ N}$, b Conditions aux limites 2 $F = 4\,800\text{ N}$
 et c Conditions aux limites 3 $F = 3\,000\text{ N}$

4.4 MISE EN PLACE DE LA METHODE DE CONCEPTION

Pour mettre en place cette méthodologie de conception, les critères de rupture utilisés sont décrits en fonction du type de matériau :

- Matériau ductile

Ici un facteur de sécurité de 1 présente un changement d'état élastique à plastique. En outre, atteindre localement en un point une valeur de facteur 1 n'est pas critique puisque cela n'amorce pas un phénomène de plastification dans la pièce entière. Ainsi, il paraît envisageable de déterminer la force limite comme étant la force faisant apparaître un coefficient de sécurité de Von Mises de 1. Il n'y a aucun risque si la pièce atteint localement cette valeur.

- Matériau fragile

Pour déterminer la valeur limite de force admissible, il ne faut donc qu'en aucun point la valeur limite de 1 soit atteinte. Elle représente le fait que la contrainte ultime est atteinte localement, ce qui amorce une fissure. Une valeur de référence de 1,5 pour le critère de Coulomb-Mohr est suggérée (tout en sachant que la norme exige déjà une charge de 150 kg) . Cette précaution supplémentaire vient du fait qu'un sous-dimensionnement peut mettre en danger une vie. Dans ce cas, un léger surdimensionnement ne sera donc pas de trop.

Au vu de tous les résultats évoqués précédemment, il est possible de définir une méthodologie de conception pouvant s'appliquer au développement de nouvelles prises d'escalade. Il a été possible de confirmer une concordance relative des résultats. Les tests expérimentaux n'ayant pas été menés avec un chargement désaxé sur la prise d'étude.

Comme expliqué auparavant, la conception des prises est pour l'instant artisanale et basée sur l'expérience des shapers. Ci-dessous (Figure 85), un processus quantifiable pouvant s'appliquer à la conception de futures prises est développé.

Ce processus s'organise en 9 étapes détaillées ci-contre :

1. **La conception numérique de la prise d'escalade** : C'est l'étape primordiale, car c'est sur ce modèle que toutes les simulations vont se réaliser. Le modèle numérique est conçu sur un logiciel de CAO type Solidworks. À noter qu'il est nécessaire de déterminer le nombre de points de fixation de la prise d'escalade avec le mur.
2. **Le choix du matériau** : C'est ici que l'imagination du concepteur est mise à l'épreuve. Son choix est réalisé selon ses propres critères comme réduire l'impact carbone d'un matériau (exemple de l'Elium® 150)
3. **La catégorisation du matériau** : Par des recherches dans la littérature ou des essais mécaniques en traction, on détermine le type du matériau (Fragile ou ductile) selon son allongement à la rupture. Les essais mécaniques doivent être menés selon la norme ASTM D638 avec des éprouvettes de type I ou type IV en fonction du volume de matériau disponible.
4. **La détermination des caractéristiques du matériau** : Selon le type du matériau, on détermine un modèle de comportement bilinéaire (matériau fragile) ou linéaire avec plateau plastique (matériau ductile). Dans certains cas, les résultats expérimentaux des essais de traction peuvent être bruités, un filtrage (comme décrit dans l'ANNEXE VIII: Méthode de traitement des essais en traction) peut être nécessaire. Les paramètres déterminés sont le module de Young (E), la limite d'élasticité (Re) et la limite ultime. Dans le cas de matériaux fragiles, le module d'écroutissage isotrope linéaire (E_{iso}) est à déterminer en plus.
5. **La modélisation** : À l'aide des données du matériau et du modèle CAO, on modélise par éléments finis la prise d'escalade sur un logiciel type COMSOL®. Pour cela, on sélectionne les conditions aux limites selon le nombre de points de fixation de la prise.

S'il n'y a qu'un point de fixation, ce trou est encasté dans le modèle numérique. S'il y en a plus de 2, la rotation autour de l'axe normale au plan de la prise est laissée libre. Dans ce dernier cas, la face arrière de la prise d'escalade est en appui plan avec le mur d'escalade. Un maillage est sélectionné en fonction de la condition précédente et sa convergence est validée.

6. **La définition du critère** : Encore une fois, selon le type du matériau, on quantifie deux critères : celui de Coulomb-Mohr pour les matériaux fragiles et celui de Von Mises pour ceux ductiles.
7. **La définition de l'effort limite** : Dans chacun des cas, on quantifie l'effort limite qui correspond à une valeur de 1,5 pour le critère de Coulomb-Mohr et 1 pour le critère de Von Mises. Cette différence provient du fait que la valeur de référence diffère en fonction du type du matériau : limite ultime pour les matériaux fragiles et limite élastique pour ceux ductiles.
8. **La vérification** : L'effort mesuré permet d'obtenir l'effort d'une masse limite qui est comparée à la valeur de la norme NF EN 12 572 qui exige de soutenir l'effort d'une masse de 150 kg. Le coefficient de sécurité est défini comme le rapport entre la masse supportable par la prise et la masse de référence de 150 kg. À partir d'une valeur supérieure à 1, la prise est dite convenable en termes de sécurité et il est pertinent de passer au prototypage et aux tests physiques.
9. **Le prototypage** : La prise ayant réussi les tests quantitatifs, on peut la produire par moulage ou autre pour la tester en salle et connaître le ressenti des grimpeurs

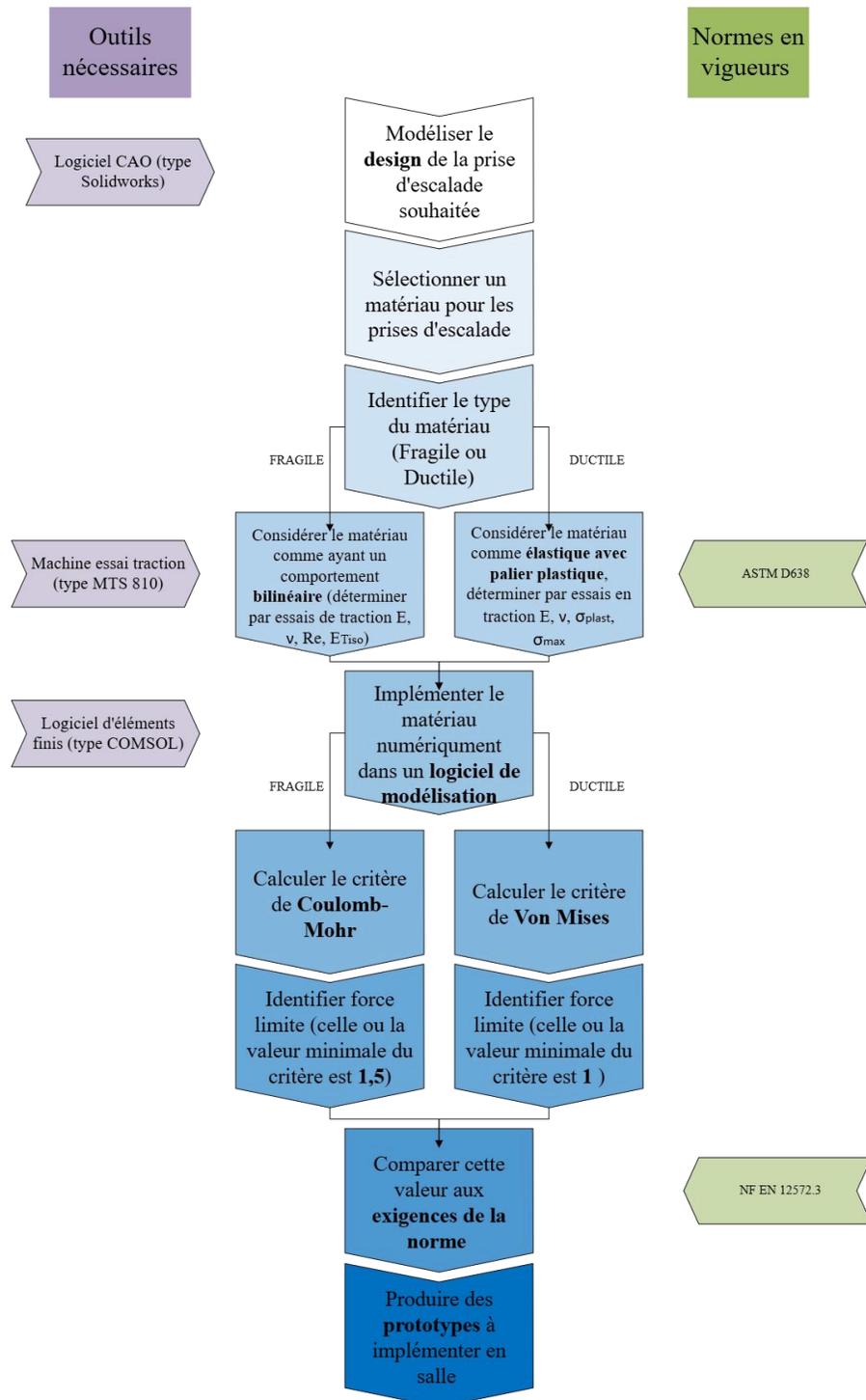


Figure 85 : Processus de conception normée de prises d'escalades

4.5 RÉSUMÉ

Ce chapitre a pour but de mettre en lumière les différents résultats obtenus dans ce mémoire qui ont permis d'aboutir à la mise en place de la méthodologie de conception susmentionnée. Ce qu'il faut retenir c'est que la mise en place de cette méthode permet de limiter le prototypage expérimental en se concentrant sur l'implémentation numérique. Dans notre cas, à l'aide du polyuréthane couramment utilisé et du composite innovant, il a été possible de tester deux matériaux avec des propriétés bien différentes. Dans les deux cas, les résultats ont été satisfaisants, car la méthodologie employée permet de valider l'utilisation sécuritaire d'une prise. De plus, le composite à base d'Elium® est un bon candidat à la production de prises d'escalade par sa validation du critère normée NF EN 12 572 en termes de sécurité.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La mise en place d'un processus pour concevoir des prises d'escalade a été au cœur de cette étude. Le but étant de résoudre deux problèmes : le manque de prédictibilité lors de conception de prises d'escalades ainsi que l'impact carbone des prises d'escalade. Cette dernière est donc totalement novatrice en la matière, car pour le moment aucune méthodologie n'existait sur le sujet. Les prises d'escalades étaient conçues par des shapers selon leur expertise personnelle. Dans le but de mettre en place ce processus, un matériau composite fait d'un mélange de fibres de verre à mâts coupés recyclés et de résine biodégradables Elium® 150 a été étudié. Ce composite novateur a été développé pour l'occasion par l'entreprise Third Hold afin de mener à bien ce projet et ainsi pouvoir proposer un processus de conception fiable et viable. Une méthode de rétro-ingénierie a été utilisée durant ce mémoire. En effet, n'ayant que très peu de données de références, ces dernières ont été déterminées sur des prises du commerce de l'entreprise Factory Hold qui font partie d'une marque de grande qualité sur le marché actuel.

L'étude s'est déroulée de la façon suivante : la loi de comportement de chaque matériau a été déterminée dans le but de quantifier certains paramètres clés (module de Young, limite élastique ...). Il est à noter que la détermination du type de matériau est très importante (fragile ou ductile), car les paramètres à quantifier varient conséquemment. Pour pouvoir déterminer les propriétés du composite, des moules d'éprouvettes ont dû être imprimées en 3D. Pour réaliser une étude complète, la limite d'arrachement des prises d'escalade, comme décrite dans la norme NF EN 12 572, a aussi été déterminée. En parallèle, pour pouvoir mettre en place une méthodologie de conception viable, des modèles numériques ont été développés pour pouvoir prédire selon différents critères (Coulomb Mohr ou von Mises) la sécurité ou non des prises d'escalades. Par la suite, la comparaison des limites de rupture modélisées et réelles permet de valider l'utilisation de la méthodologie de conception basée sur un modèle numérique.

En effet, la rupture des prises d'escalades est bien quantifiée par le modèle numérique. Cela est une sécurité, car en suivant cette méthodologie il est possible d'affirmer ou d'invalider avec certitude la validité sécuritaire de la prise d'escalade sans mettre en danger la vie du grimpeur. Le mémoire aboutit donc à la conclusion que le composite développé par l'entreprise Third Hold semble être un bon candidat pour produire des prises d'escalades. On ne doit cependant pas négliger la variabilité des résultats des tests expérimentaux que l'on a pu observer. Pour la suite du développement de ce produit, le procédé de production va devoir être industrialisé et mieux contrôlé pour réduire l'écart sur la variabilité des propriétés mécaniques. Le matériau n'en reste pas moins un bon candidat. Malgré sa fragilité observée lors de l'étude de matériau, il a pu supporter des efforts nettement supérieurs aux exigences de la norme. Son aspect recyclable en fait un bon candidat pour réduire l'utilisation du polyuréthane dans le domaine sportif des prises d'escalade.

En ce qui concerne l'objectif global de mise en place d'une méthodologie de conception, ce dernier a aussi été validé puisque les résultats numériques sont en adéquation avec les résultats expérimentaux. Ce processus peut donc être utilisé par la suite pour valider la sécurité de prise d'escalade avant l'élaboration de prototypes.

Pour poursuivre l'étude, il serait tout d'abord pertinent de réaliser plus de tests expérimentaux pour valider les paramètres mécaniques des différents matériaux d'étude. Il serait également pertinent de s'intéresser à la texturation en surface des prises d'escalades en composite. Il serait intéressant pour cela de tester différentes méthodes utilisées pour texturer (attaque chimique, moulage par niveau avec ajouts de composants granuleux solubles...) et de connaître le ressenti de grimpeurs de différents niveaux. Cela permettrait de détailler la méthodologie développée en y ajoutant cette étape. L'approximation ayant été faite dans le mémoire, il serait également intéressant de déterminer le coefficient de Poisson du composite pour affiner le modèle en ne l'approximant pas dans un souci de simplification à celui du polyuréthane. Même si cette valeur n'a pas un impact significatif sur les critères de rupture, cela permettrait de mieux connaître le composite d'étude.

Le mémoire est la première étude scientifique dans cette industrie qui est pour le moment artisanale. Il ouvre le champ à d'autres études dans ce domaine. Cette étude comprend tout de même certaines limites, comme le fait que les prises d'escalades n'ont pu être poussées à la rupture avec le système d'essai. Il serait intéressant de concevoir un crochet plus solide et de refaire ces tests. Il faudrait d'ailleurs questionner les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de la détermination de limite de rupture. Le chargement étudié n'était qu'axial. Il serait intéressant d'étudier expérimentalement ce chargement désaxé et voir si les contraintes limites sont bien inférieures comme déterminées numériquement. De plus, la question des conditions aux limites a aussi été importante lors de la modélisation des prises d'escalades. Il serait intéressant de tenter de reproduire des conditions de friction (en déterminant ainsi le module de Coulomb de frottement solide) qui se rapprochent des conditions réelles. Il faudrait pour cela déterminer d'une manière le coefficient de frottement entre la prise d'escalade et le mur. La méthode de conception définie précédemment pourrait ainsi être améliorée en affinant la définition du modèle numérique.

ANNEXE I : QUANTIFICATION DU NIVEAU EN ESCALADE

Pour bien comprendre les différents travaux sur l'escalade, il semble judicieux d'expliquer le système de notation en escalade. L'escalade se divise tout d'abord en 2 grandes pratiques : l'escalade en voie (escalade avec présence d'assurage avec corde et baudrier) et l'escalade de bloc (escalade sans assurage, hauteur plus réduite). Dans chacun des cas, le système de notation est subjectif : il est réalisé par des grimpeurs expérimentés qui notent leur ressenti selon la difficulté des prises, leur enchaînement et l'endurance nécessaire.

- Escalade en voie

On peut identifier 5 systèmes de notations :

- Français (aussi système international)
- UIAA (Allemagne, Italie et Europe de l'Est)
- Américain (appelé YDS, Yosemite Decimal System)
- Anglais (divisé en deux : la première colonne indique la dangerosité de la voie et la seconde le niveau du mouvement le plus complexe)
- Australien (utilisé en Australie et Nouvelle-Zélande)

Français	UIAA	YDS	Anglais		Australien	Niveau ressenti
1	I	5	3a			Novice
2	II	5.1/5.2	3b		11	
3	III	5.3/5.4	3c		12	
4a	IV	5.5	4a	VD	13	Débutant

4b	IV+	5.6	4b	S	14	
4c	V	5.7	4c	HS	15	
5a	V+	5.8		VS	16	
5b	VI-	5.9	5a	HVS	17	Intermédiaire
5c	VI	5.10a		E1	18	
6a	VI+	5.10b	5b		19	
6a+	VII-	5.10c		E2	20	
6b	VII	5.10d	5c		21	
6b+	VII+	5.11a		E3	22	Avancé
6c	VIII-	5.11b			23	
6c+	VIII	5.11c	6a	E4	24	
7a	VIII+	5.11d			25	
7a+	IX-	5.12a		E5	26	
7b	IX- IX	5.12b	6b			Expert
7b+	IX	5.12c		E6	27	
7c	IX IX+	5.12d	6c		28	
7c+	IX+	5.13a		E7	29	

Tableau 11 : Correspondance des niveaux entre chaque pays d'escalade en voie

- Escalade de blocs

Dans ce cas-là seuls deux systèmes de cotations existent :

- Fontainebleau (système français encore une fois international)
- Hueco (utilisé en Amérique)

Fontainebleau	Hueco	Niveau ressenti
3	VB	Novice
4-	VO-	
4	VO	
4+	VO+	Débutant
5	V1	
5+	V2	
6A	V3	
6A+		
6B	V4	Intermédiaire
6B+		
6C	V5	
6C+		
7A	V6	Avancé
7A+	V7	
7B	V8	
7B+		
7C	V9	Expert
7C+	V10	

Tableau 12 : Correspondance des niveaux entre chaque pays d'escalade en bloc

ANNEXE II : PLAN DES MOULES DES ÉPROUVETTES

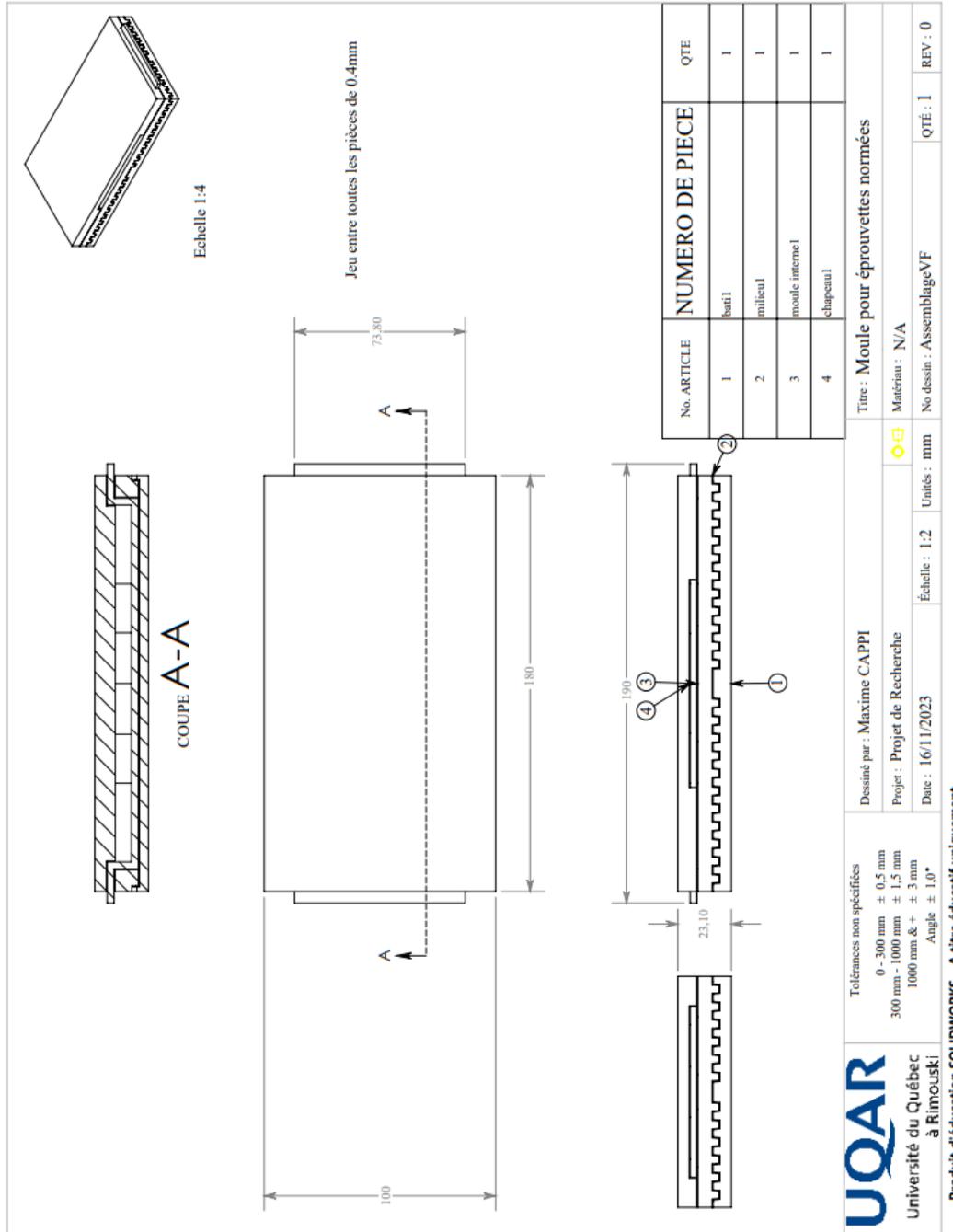


Figure 86 : Plan d'assemblage du moule des éprouvettes

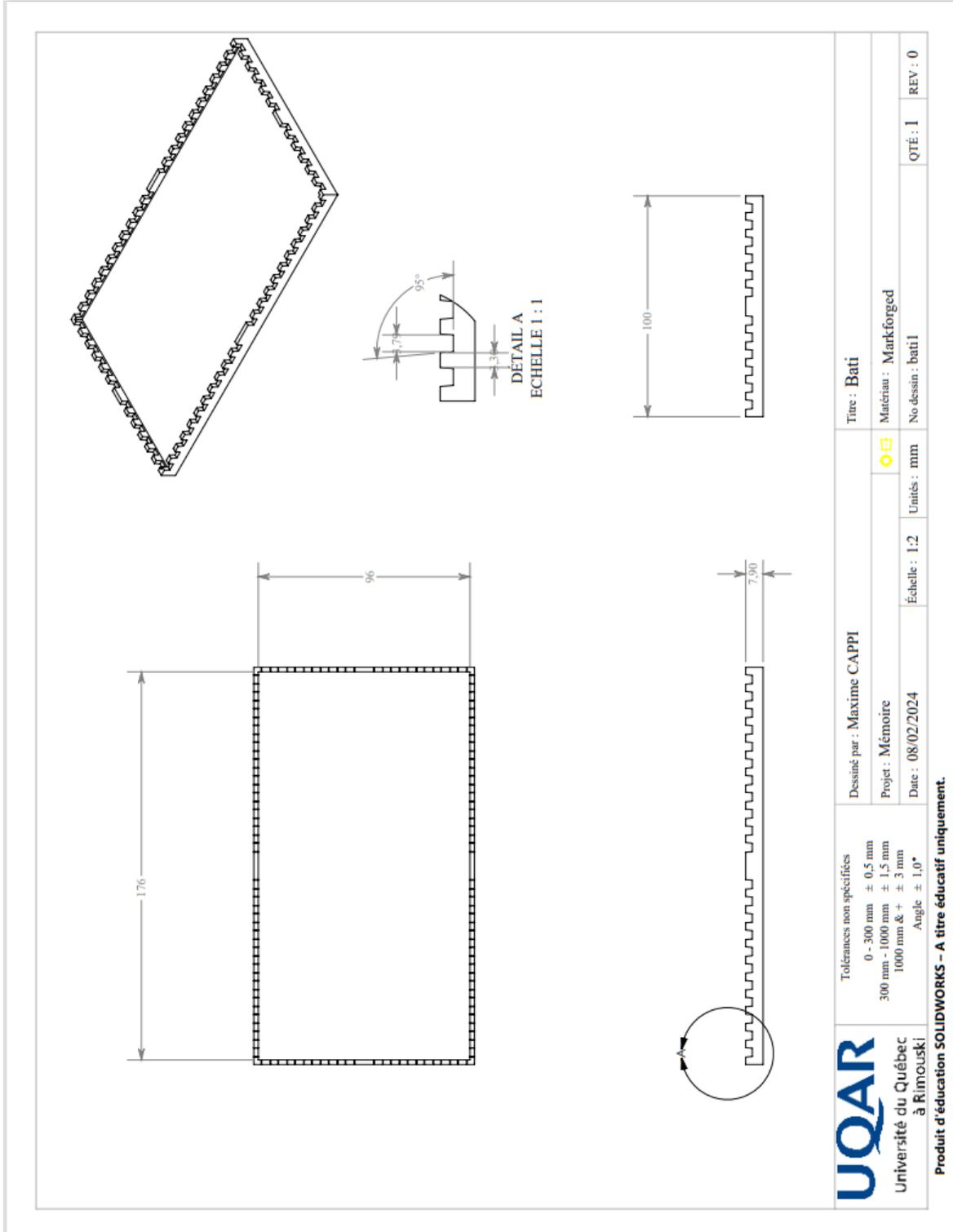


Figure 87 : Plan de la partie inférieure du moule des éprouvettes de type I

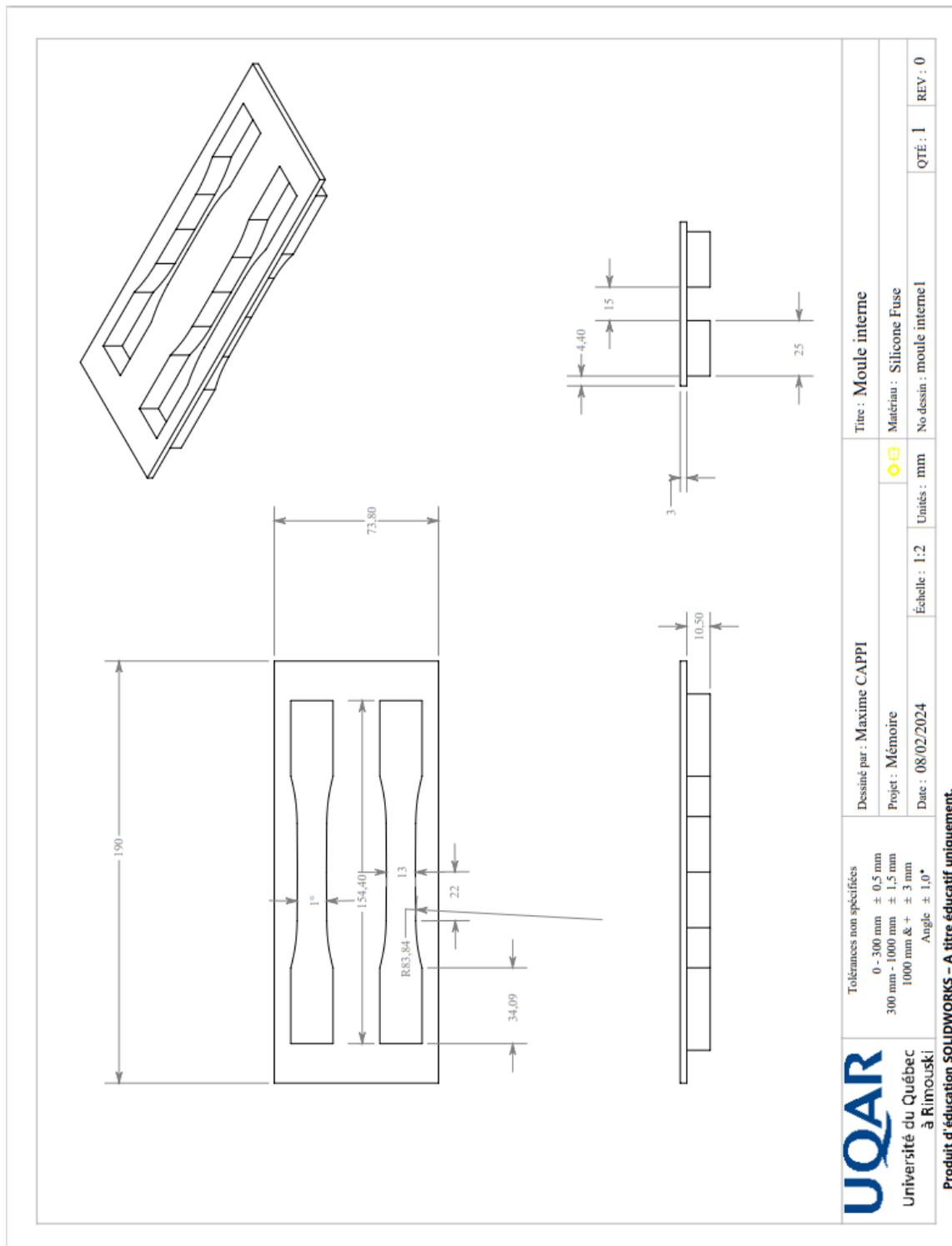


Figure 88 : Plan de la partie flexible du moule des éprouvettes de type I

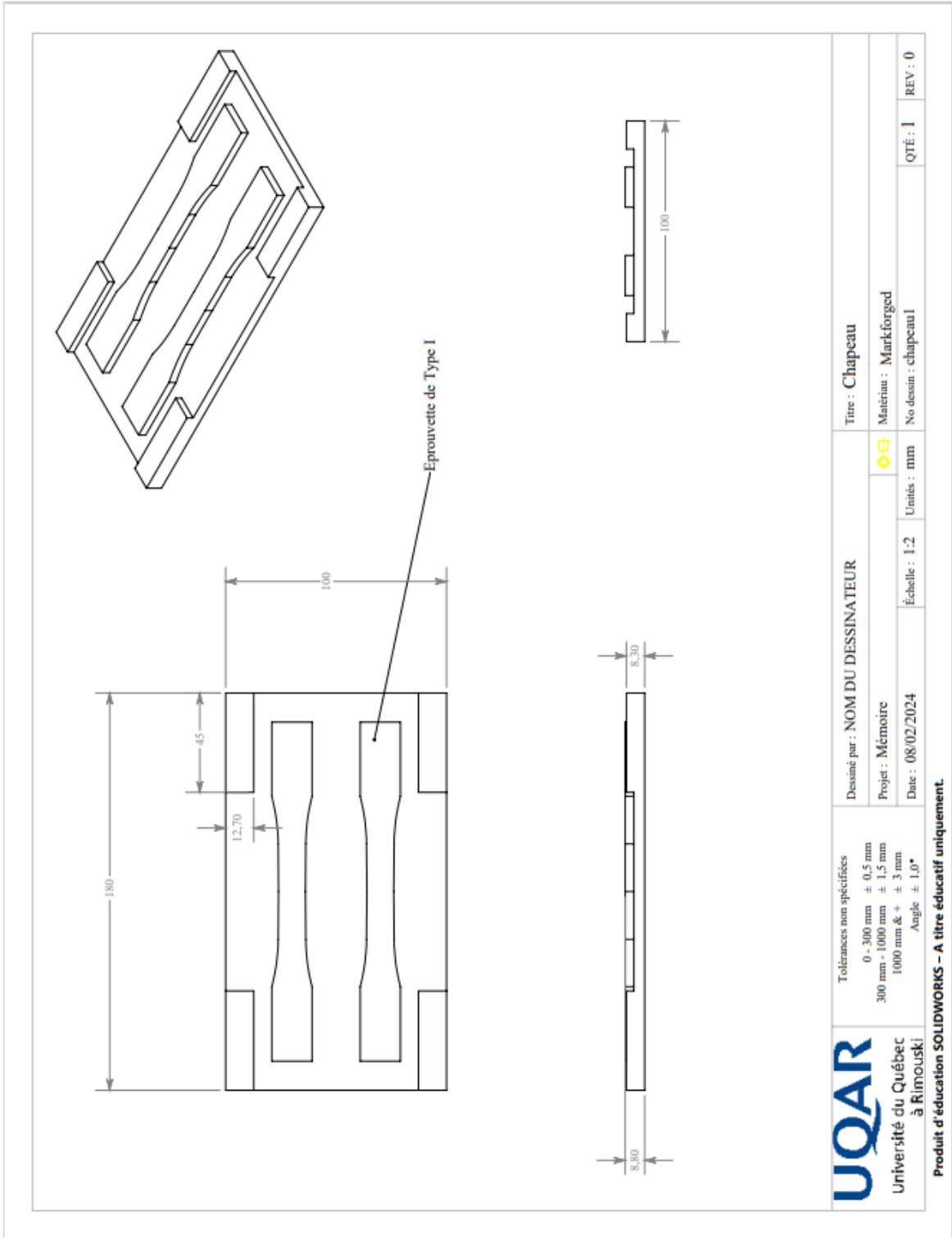
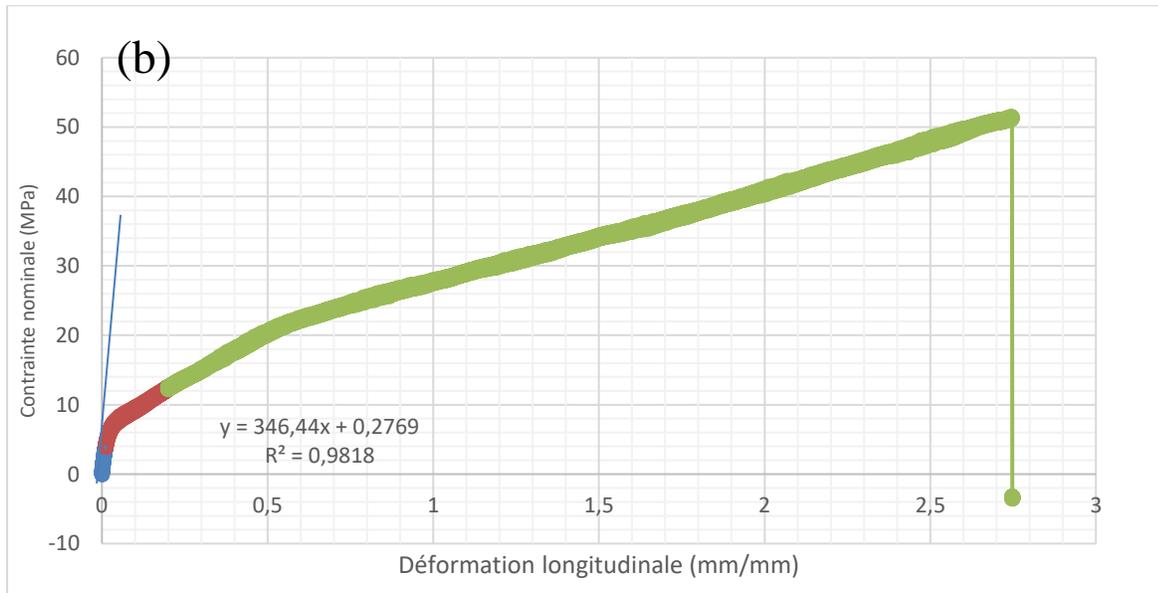
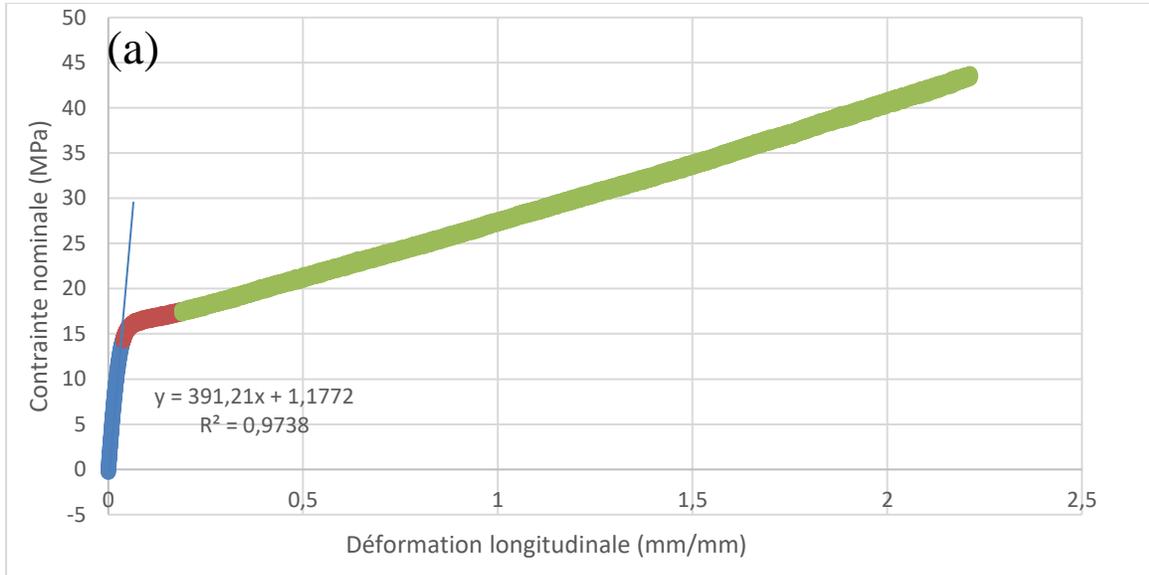


Figure 89 : Plan de la partie supérieure du moule des éprouvettes de type I

ANNEXE III : RÉSULTATS DES ESSAIS EN TRACTION POUR LES ÉPROUVETTES TESTS

Résultats des 3 éprouvettes tests présentant la contrainte (MPa) en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm).



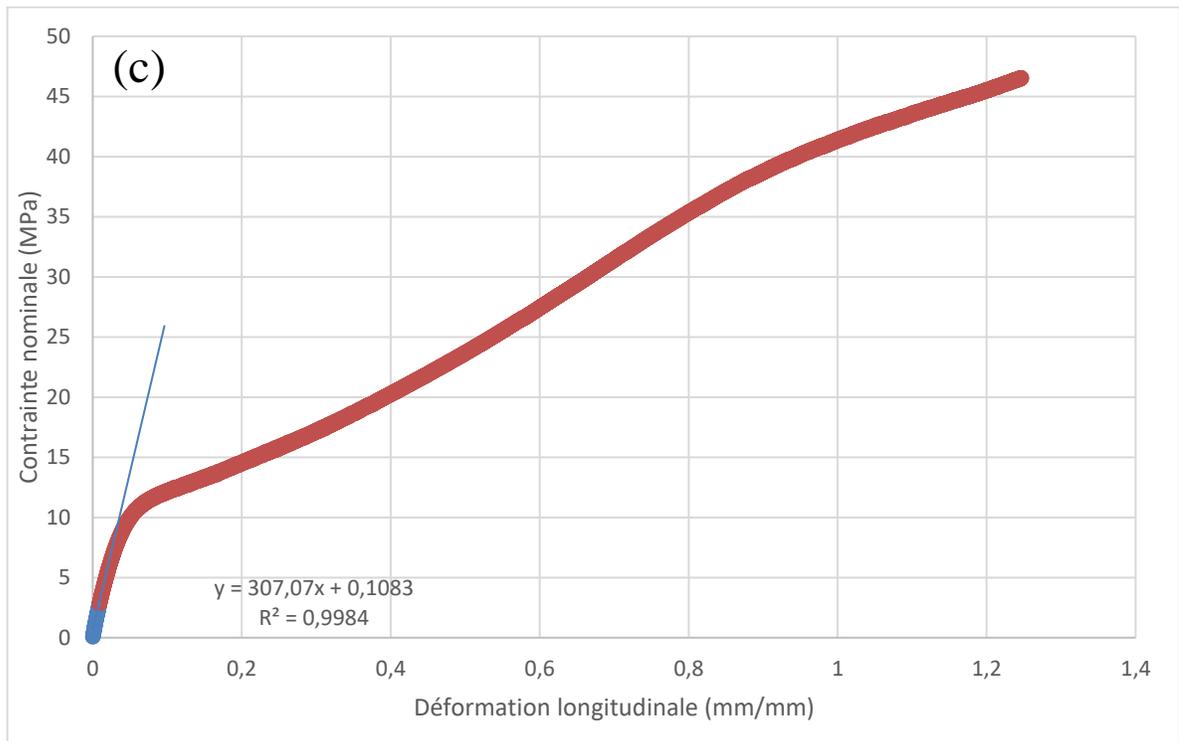
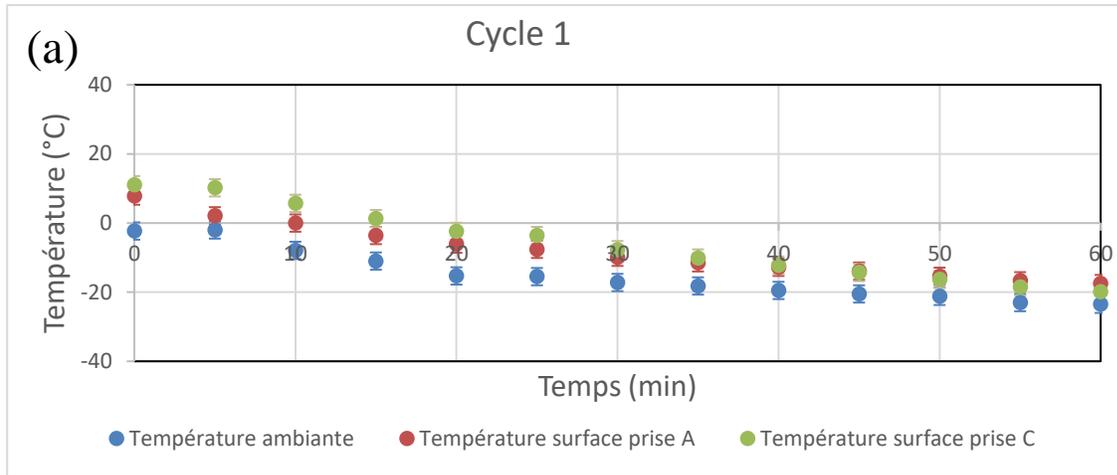


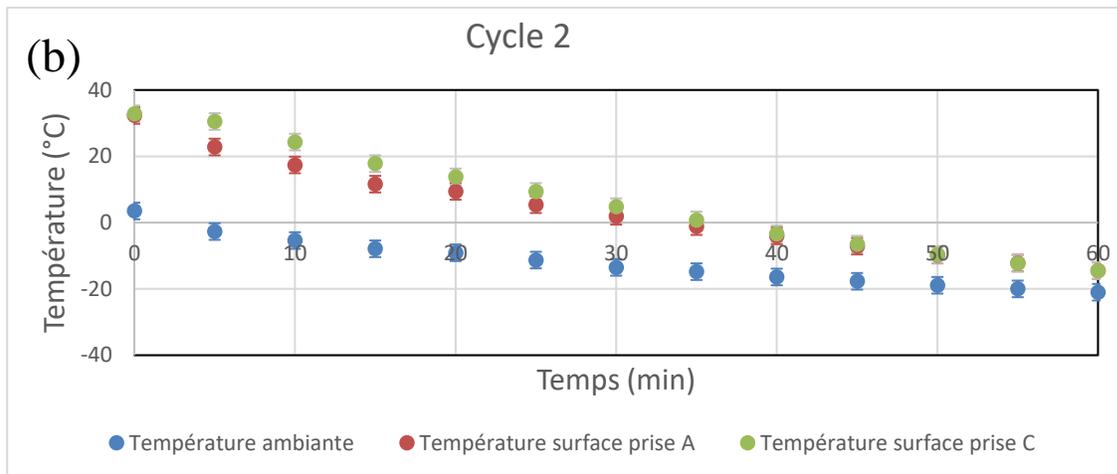
Figure 90 : Tracé de l'évolution de la contrainte nominale (MPa) en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm) pour 3 éprouvettes (a), (b) et (c) de type I en 8789K82

ANNEXE IV: PRÉPARATION THERMIQUE DES PRISES D'ESCALADE EN POLYURÉTHANE

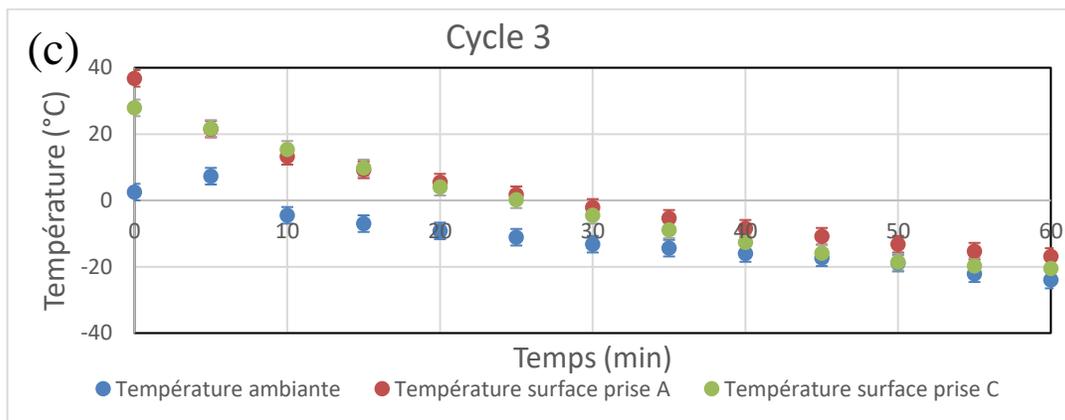
T0 = -38,8°C



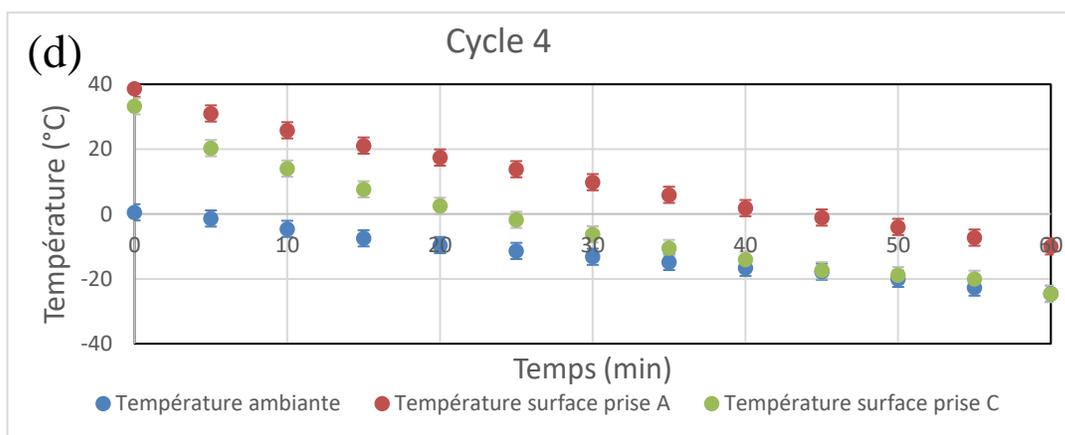
T0 = -32,2°C



T0 = -30°C



T0 = -28,9°C



T0 = -28,5°C

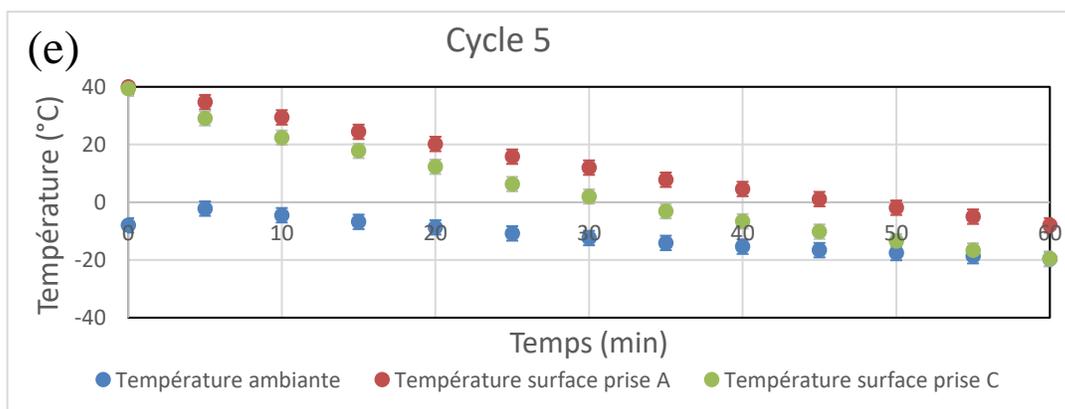
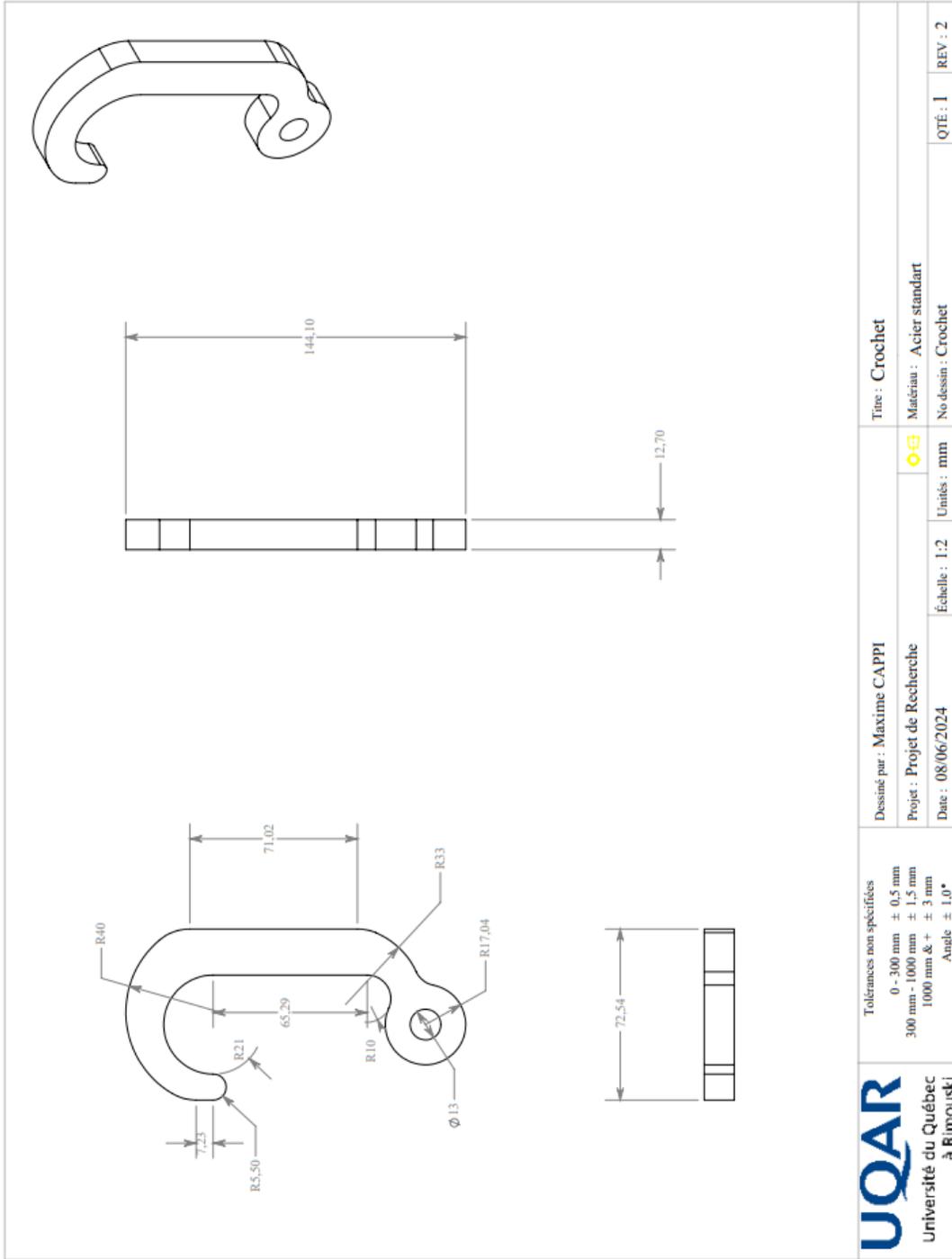


Figure 91 : Tracés de l'évolution de la température des thermocouples (°C) en fonction du temps (min) pour des prises d'escalade en polyuréthane

ANNEXE V : PLAN DU CROCHET UTILISÉ POUR LES TESTS DE LA NORME NF EN 12 572



ANNEXE VI : PLAN DU SYSTÈME D'ACCROCHE SELON LA NORME NF EN

12 572

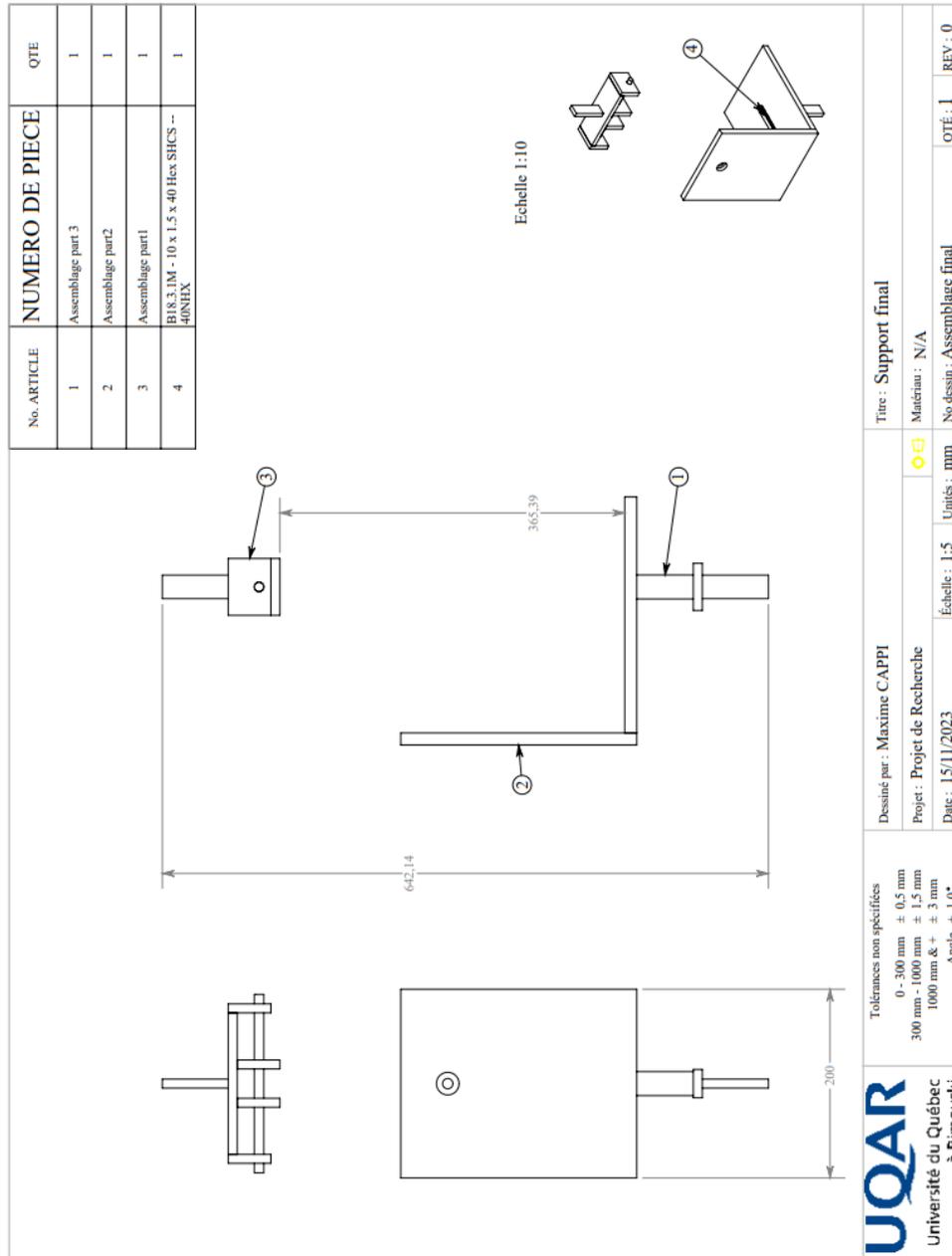


Figure 92 : Plan d'assemblage du système d'accroche des prises d'escalades pour test de limite de rupture

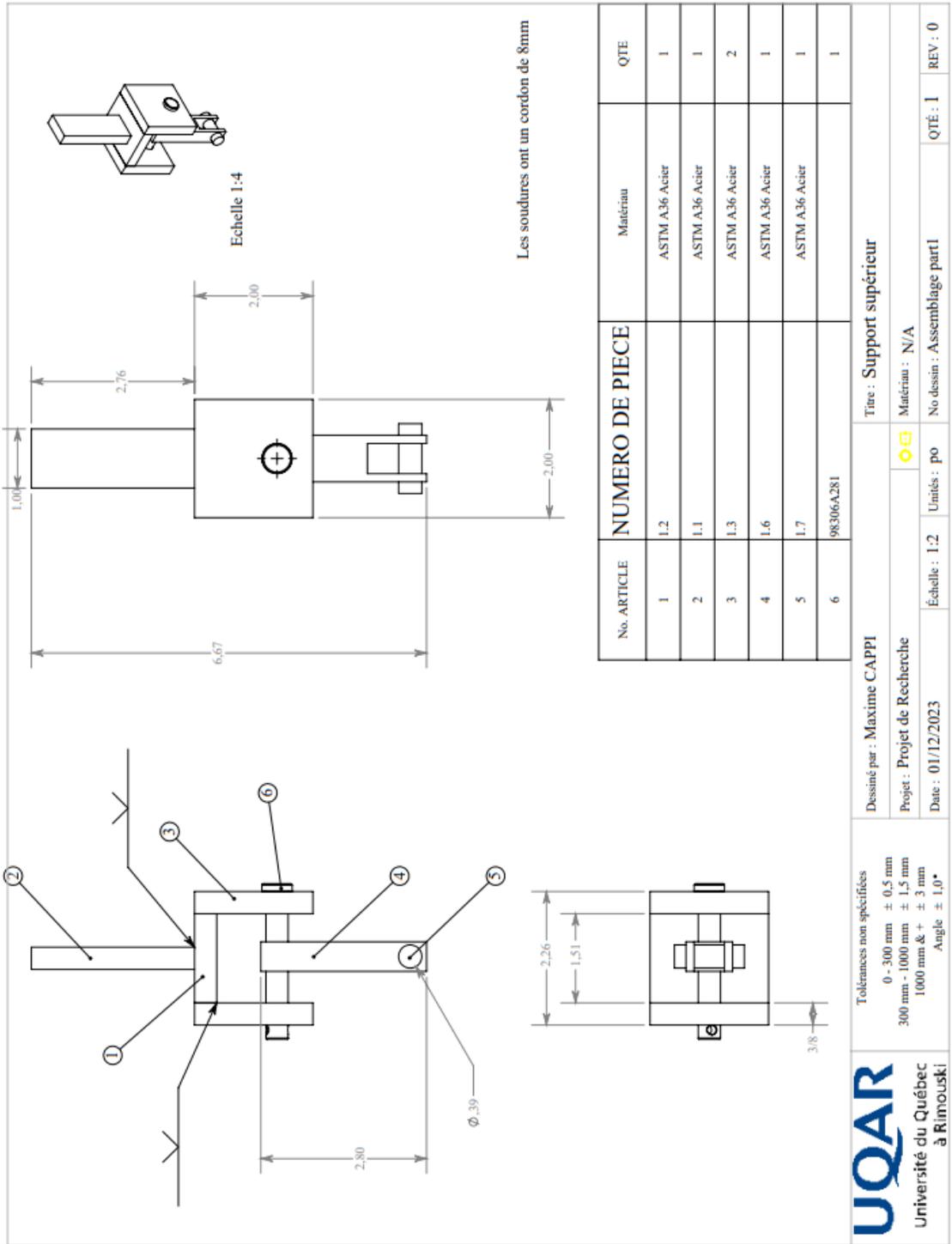


Figure 93 : Plan de la partie supérieure du système d'accroche

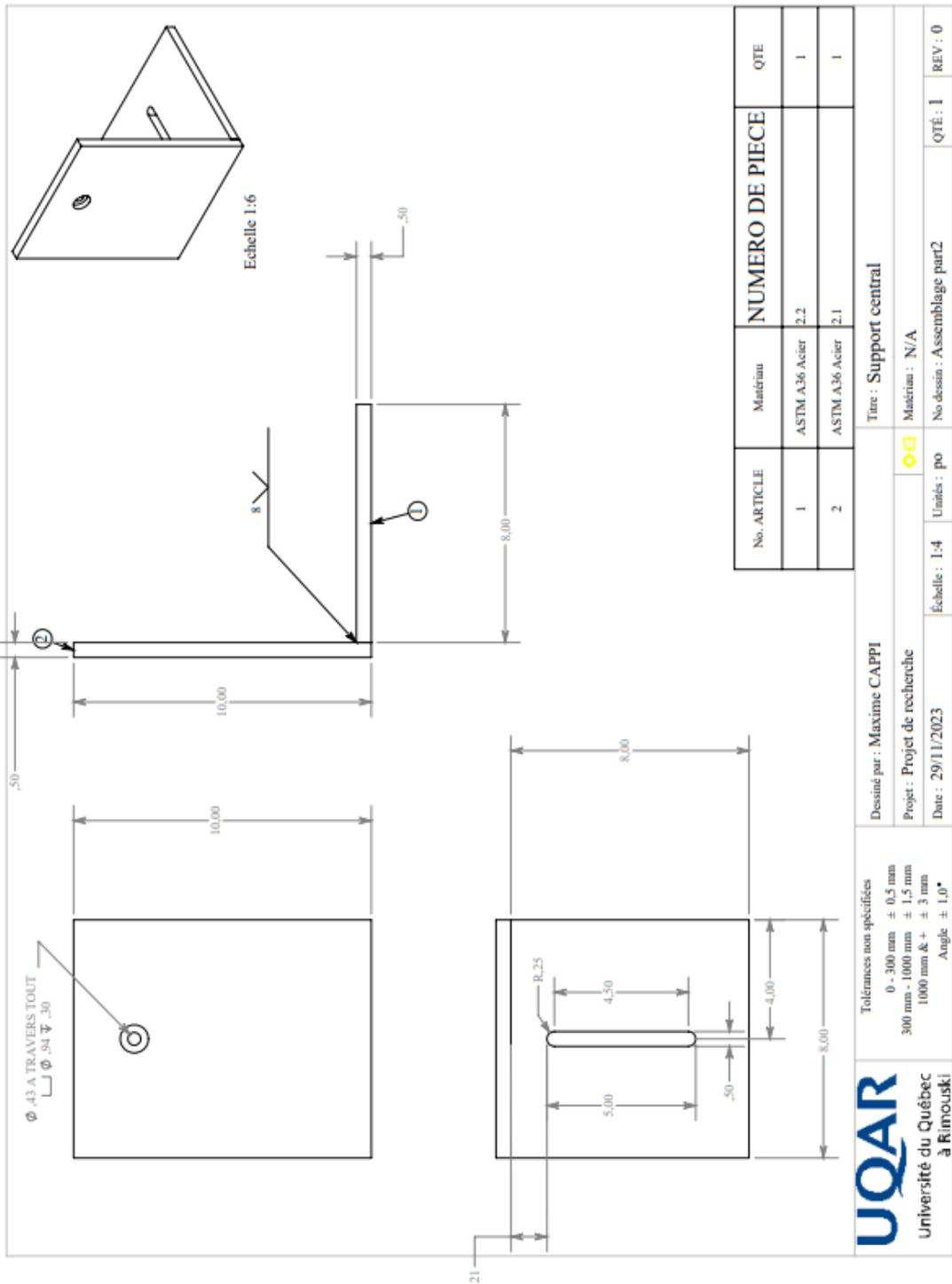


Figure 94 : Plan de la partie intermédiaire du système d'accroche

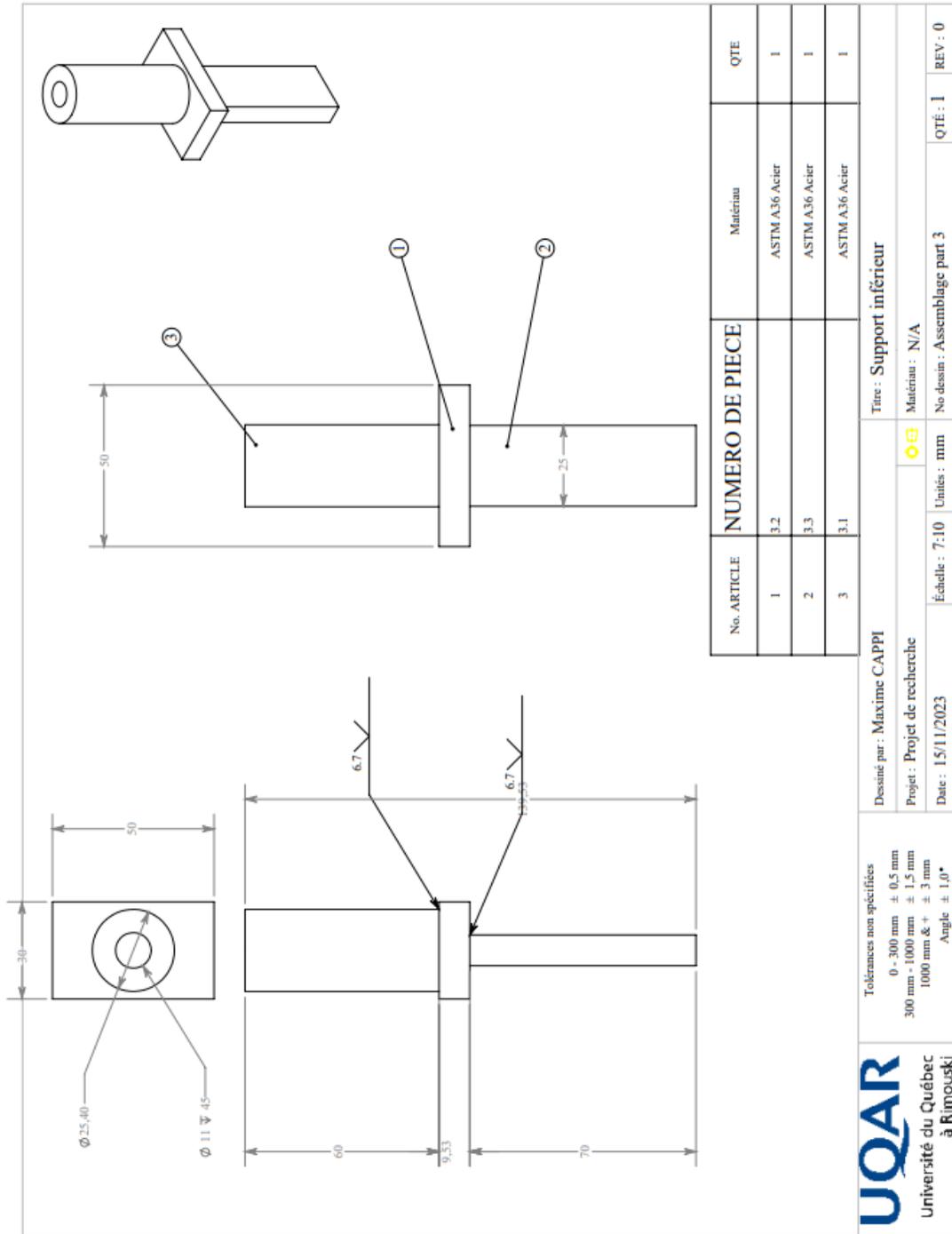


Figure 95 : Plan de la partie inférieure du système d'accroche

ANNEXE VII: PLAN DU MOULE DE PRISE D'ESCALADE

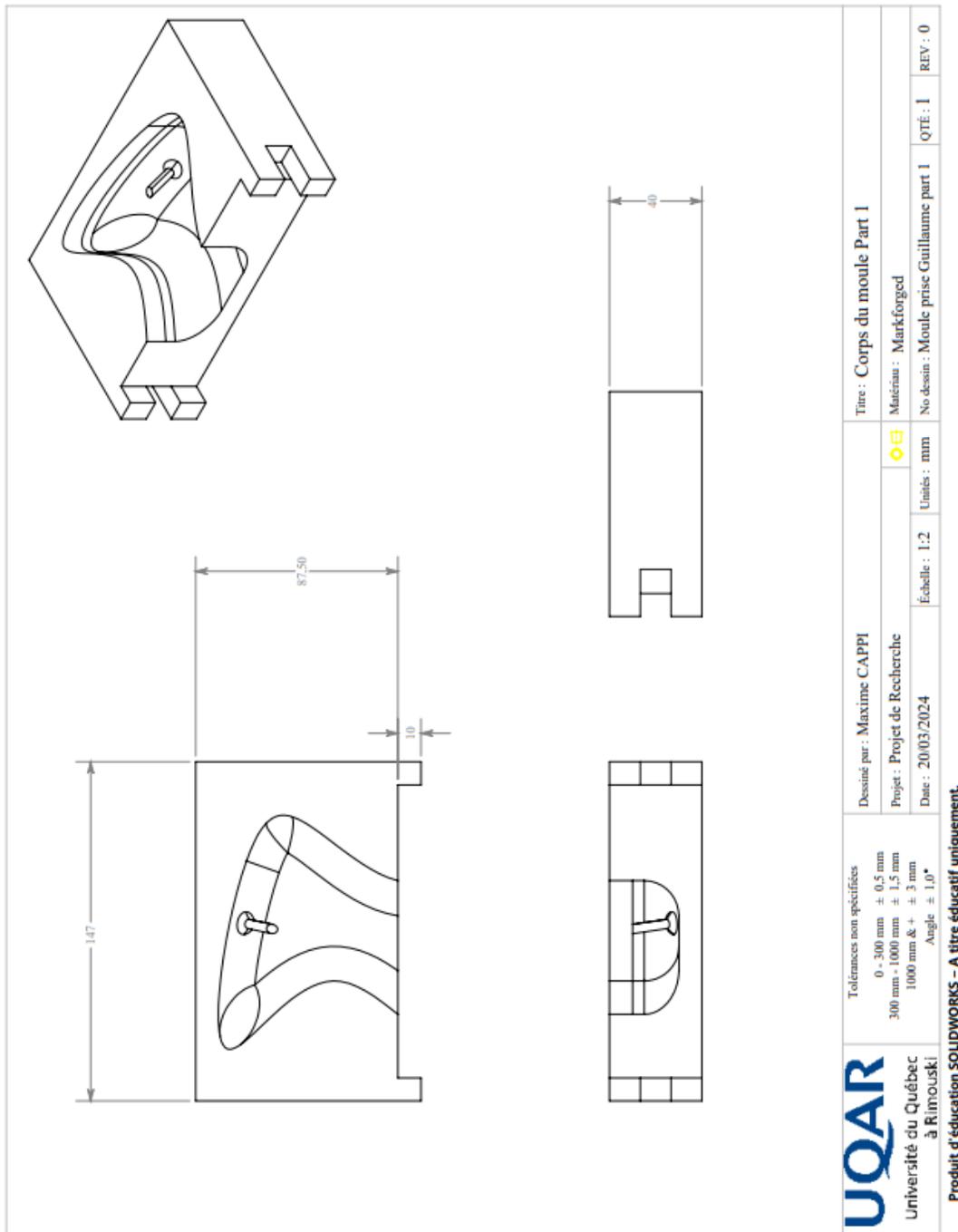


Figure 96 : Plan de la 1^{ère} partie du moule à prises d'escalade

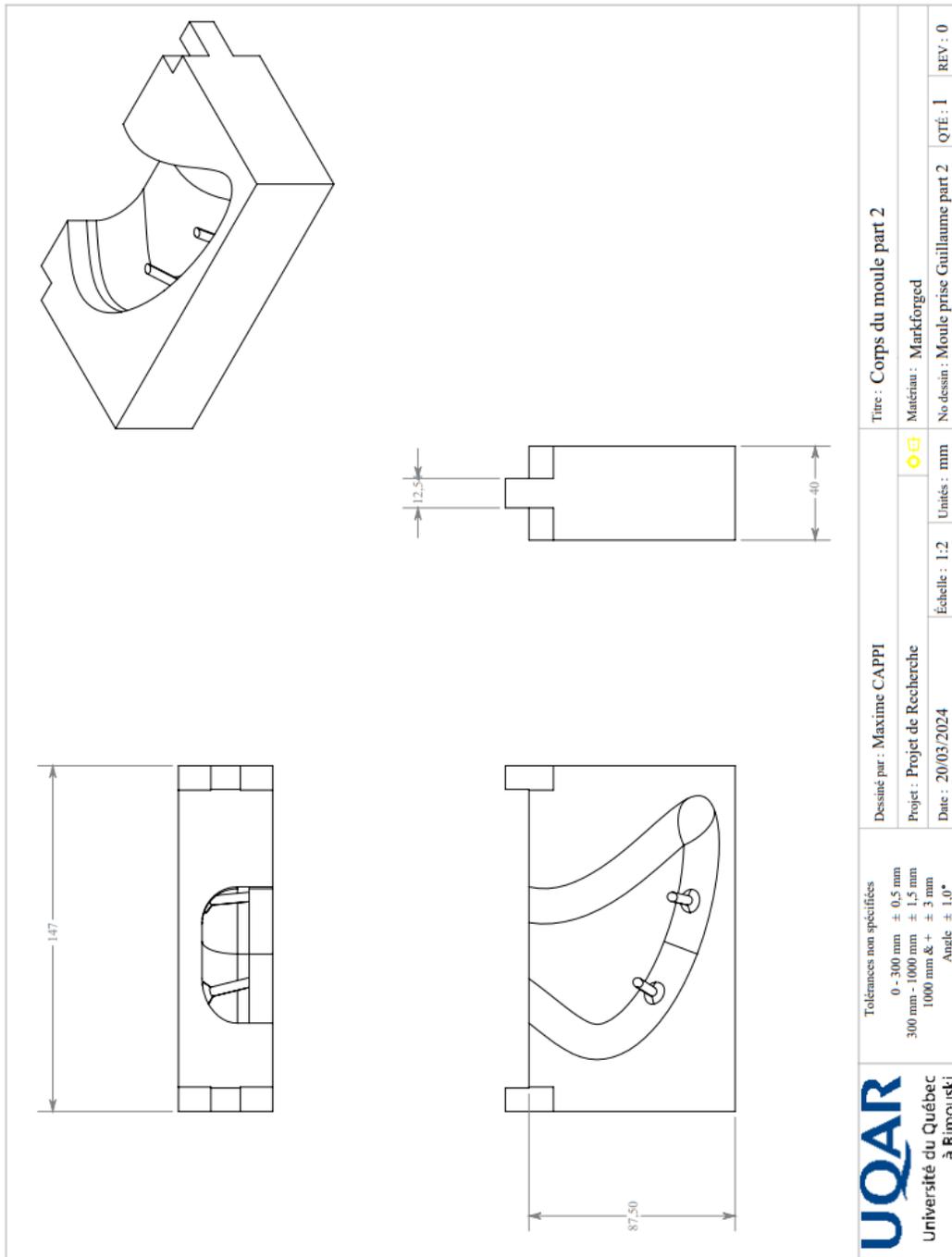


Figure 97 : Plan de la 2^{ème} partie du moule à prises d'escalade

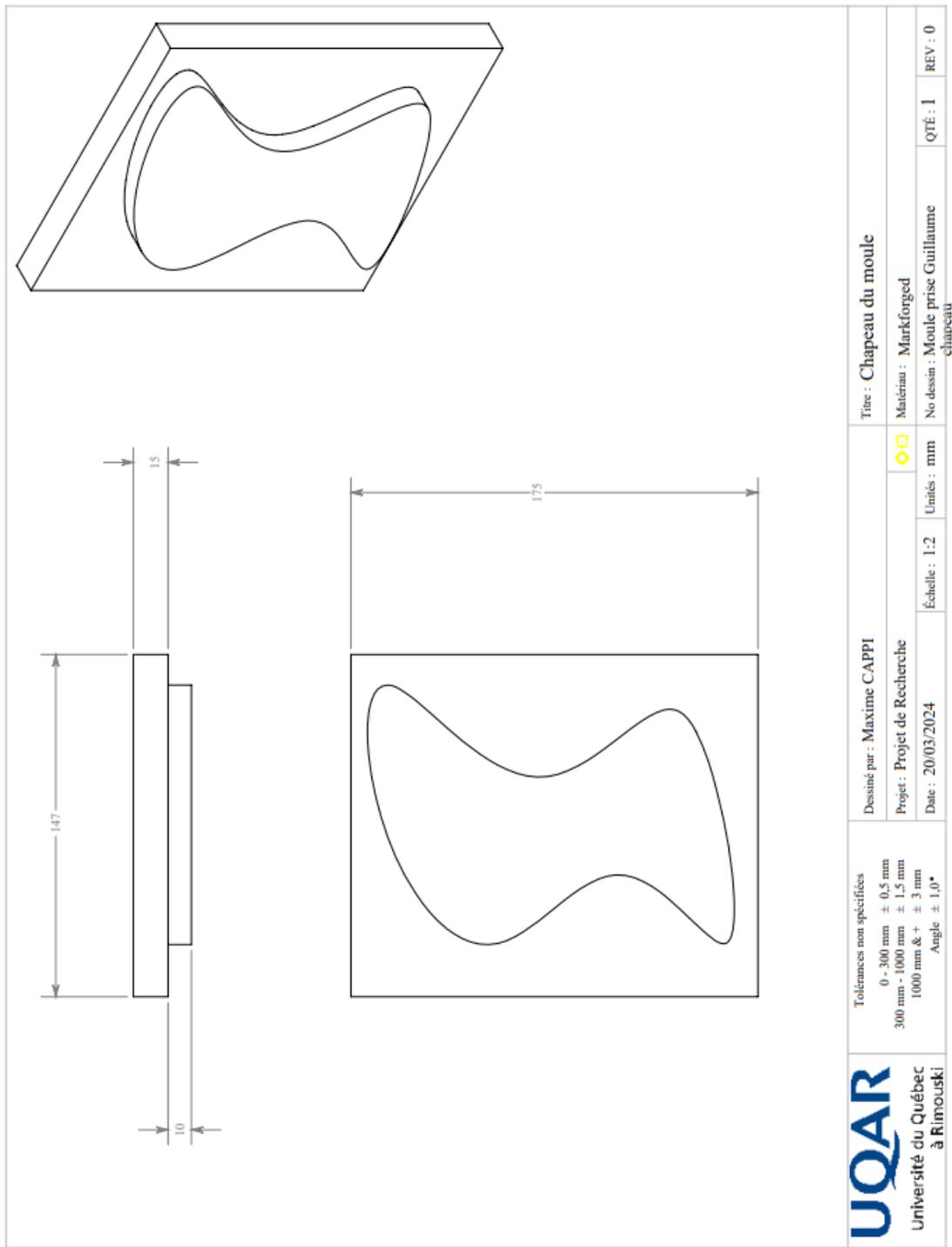


Figure 98 : Plan de la partie supérieure du moule à prise d'escalade

ANNEXE VIII: MÉTHODE DE TRAITEMENT DES ESSAIS EN TRACTION

Comme expliqué précédemment, un traitement des tests est nécessaire pour pouvoir étudier les courbes d'essais en traction des échantillons. La méthode utilisée est détaillée à l'aide d'une série de mesures. Il s'agit de l'essai 1 pour le composite Elium® développée à l'aide d'un code python.

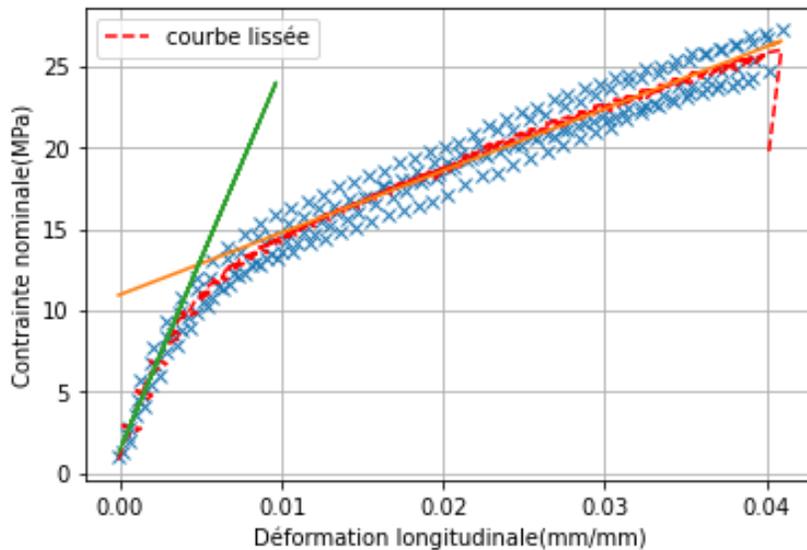


Figure 99 : Tracés de l'évolution de la contrainte nominale (MPa) en fonction de la déformation longitudinale (mm/mm) d'une éprouvette en composite

La courbe bleue est la série initiale tandis que la courbe rouge correspond à l'essai post traité.

Étape 1 : Obtention des paramètres d'étude

Les capteurs de la machine de traction donnent accès à l'effort exercé (F en newton) et au déplacement du vérin (d en mm). On en déduit ainsi la contrainte nominale (σ_N en MPa) et la déformation longitudinale (ε en mm/mm) selon ces formules :

$$\sigma_N = \frac{F}{S_0}$$

S_0 étant la surface d'étude initiale en mm^2

$$\varepsilon = \frac{d}{L_U}$$

L_U étant la longueur utile initiale en mm

Étape 2 : Suppression des points aberrants

Travaillant dans les limites de fonctionnement de la machine, des efforts négatifs (compression) qui sont incohérents peuvent apparaître dans le début de l'essai. On supprime ces points de la série de mesure pour ne pas qu'ils faussent le lissage.

Étape 3 : Lissage de la série de mesure

Pour déterminer le type de lissage on réalise une étude des coefficients de la série de Fourier du signal. On considère le signal comme étant une période d'étude.

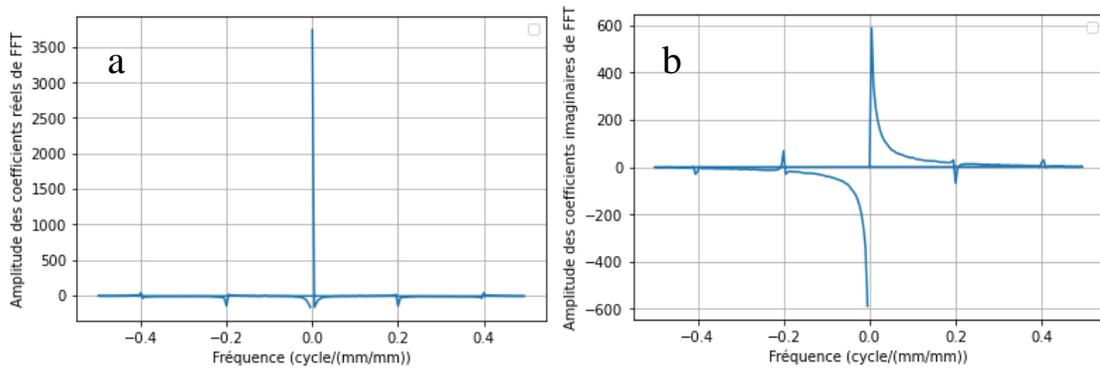


Figure 100 : Coefficients de la série de Fourier (a) réelle et (b) imaginaire en fonction de la période du signal

L'analyse de Fourier effectuée montre que le signal ne présente pas de réels bruits (absence d'harmoniques à haute fréquence avec une amplitude non négligeable). Un filtrage basse fréquence n'est donc pas la méthode optimale à employer.

Pour traiter la série de mesures on a recours à une méthode de moyenne glissante à pas variable (méthode convolve). Cette méthode a pour technique de remplacer un point de la

série de mesure par sa valeur moyennée sur ses voisins. On réduit ainsi l'écart relatif entre des points consécutifs.

Cette méthode présente deux limitations majeures :

- Trop peu de valeurs n'ont aucun effet sur la série de mesure (pas de lissage)
- Beaucoup de valeurs biaisent les variations en créant de fausses valeurs

Il s'agit donc d'une méthode itérative qui a pour but de minimiser l'écart relatif entre deux valeurs consécutives.

Étape 4 : Détermination des paramètres d'étude

Pour savoir quels sont les paramètres à déterminer, on définit tout d'abord le type de matériau :

- Ductile ($\epsilon_{rupture} > 5\%$) => Modèle linéaire avec plateau plastique

À l'aide de cette courbe lissée on peut donc déterminer les paramètres matériaux essentiels à la modélisation numérique. Ayant choisi une modélisation linéaire avec plateau plastique dans le cas du polyuréthane, on doit déterminer la pente à l'origine ainsi que la valeur à l'infini. On utilise pour cela au minimum 10% des valeurs situées aux extrémités pour réaliser ces calculs. On emploie une méthode d'interpolation polynomiale qui vise à minimiser l'erreur quadratique entre les valeurs de mesures et les valeurs prédites du polynôme (méthode polyfit du module numpy). On obtient ainsi le module de Young et la valeur de plasticité.

La limite élastique est déterminée en fonction du point d'intersection de ces deux courbes. Le maximum est déterminé à l'aide de la fonction (max de python).

On obtient ainsi l'ensemble des paramètres requis pour la simulation.

- Fragile ($\epsilon_{rupture} < 5\%$) => Modèle bilinéaire

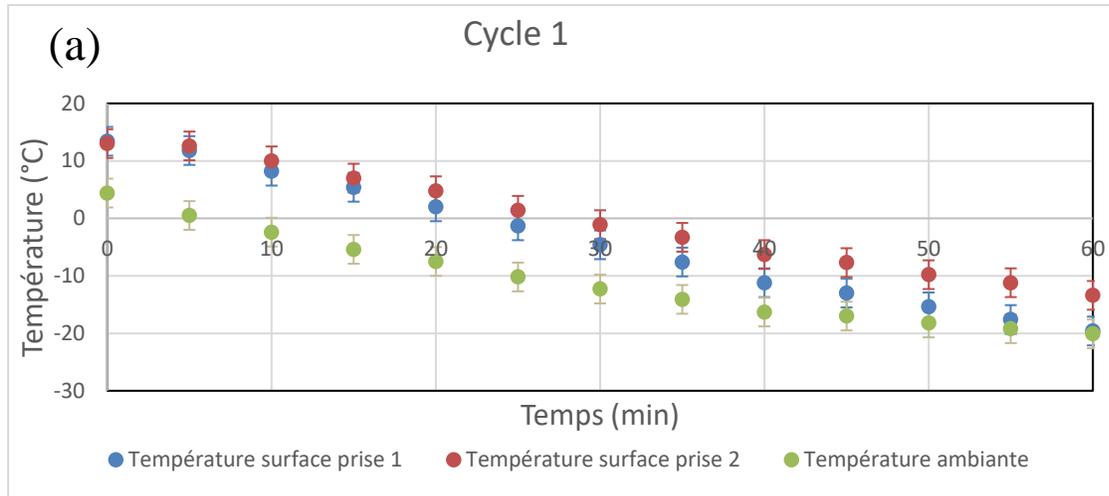
À l'aide de cette courbe lissée on peut donc déterminer les paramètres matériaux essentiels à la modélisation numérique. Ayant choisi une modélisation bilinéaire dans le cas du composite Elium® 150, on doit définir la pente à l'origine ainsi que la pente théorique à l'infini. On utilise pour cela au minimum 10% des valeurs situées aux extrémités pour réaliser ces calculs. On emploie une méthode d'interpolation polynomiale qui vise à minimiser l'erreur quadratique entre les valeurs de mesures et les valeurs prédites du polynôme (méthode polyfit du module numpy). On obtient ainsi le module de Young et le module de plasticité.

La limite élastique est déterminée en fonction du point d'intersection de ces deux courbes. Le maximum est déterminé à l'aide de la fonction (max de python).

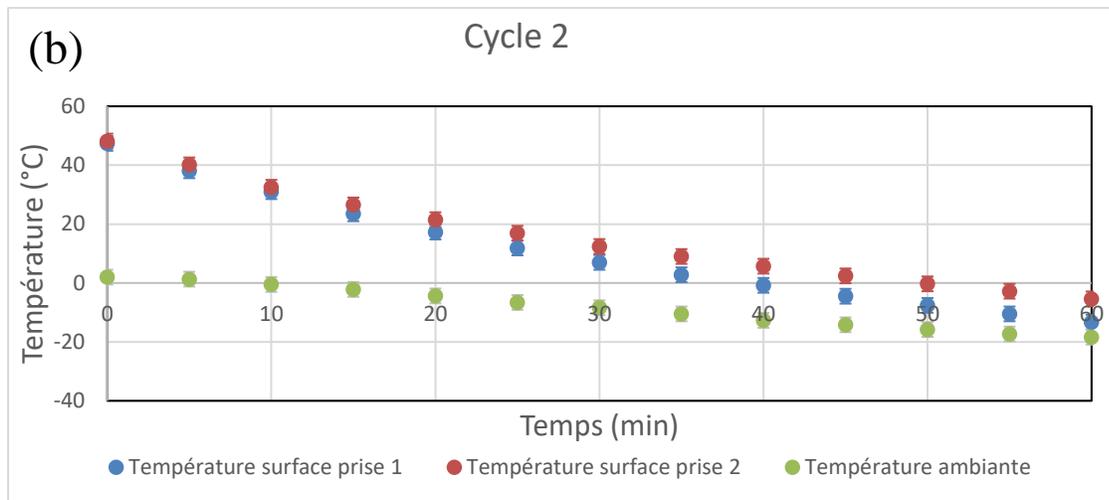
On obtient ainsi l'ensemble des paramètres requis pour la simulation.

ANNEXE IX: PRÉPARATION THERMIQUE DES PRISES D'ESCALADE EN ELIUM® 150

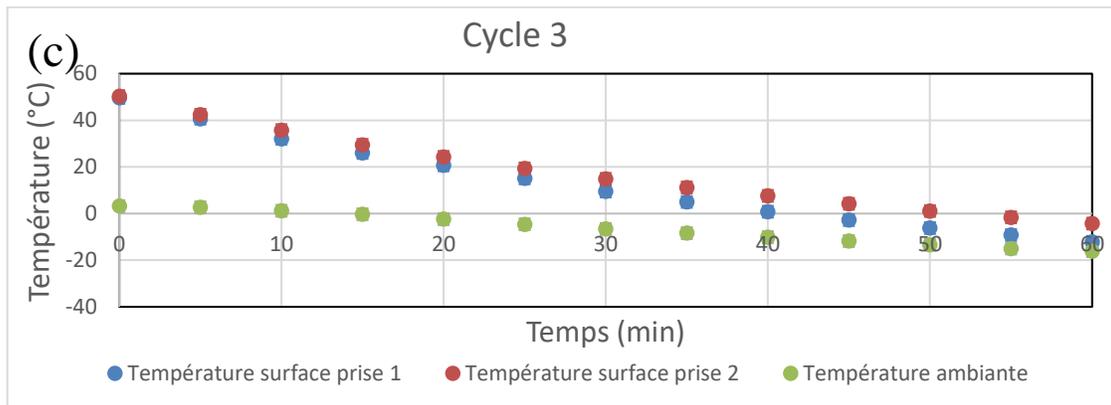
T0 = -31,1°C



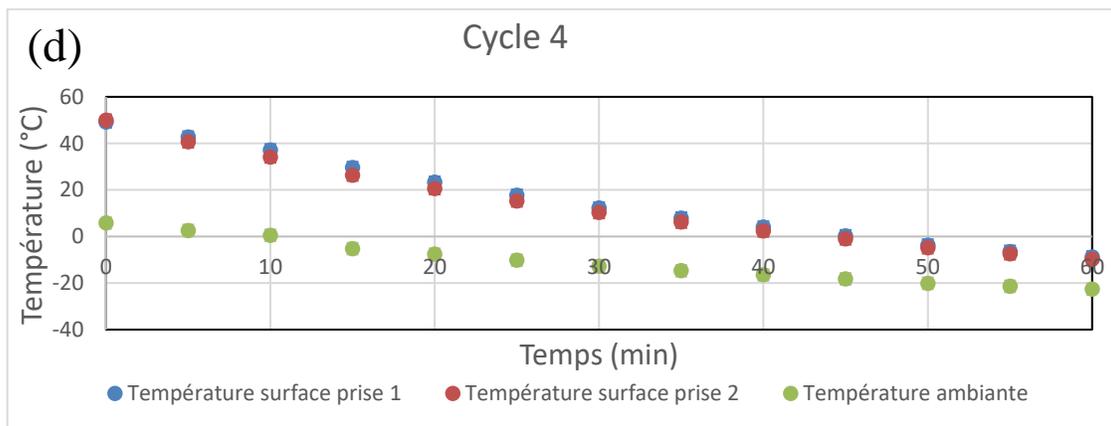
T0 = -37,8°C



T0 = -29,8°C



T0 = -29,2°C



T0 = -38°C

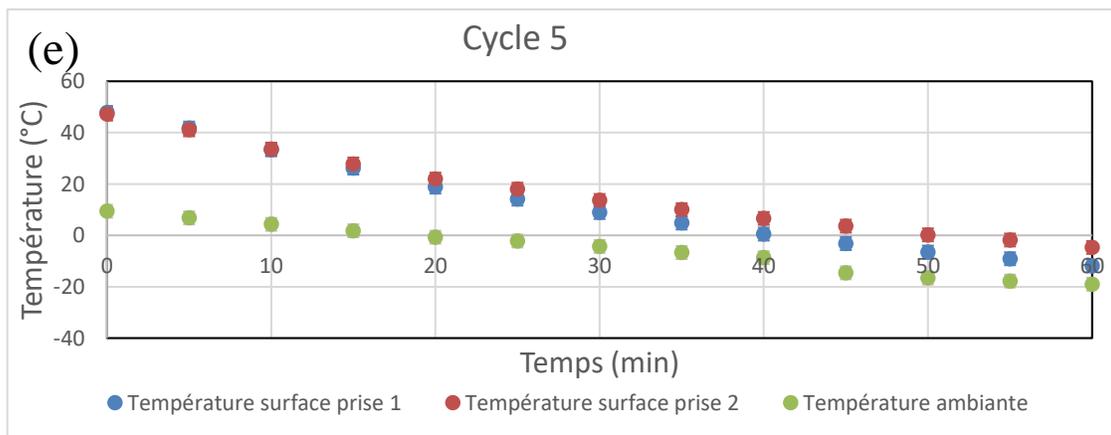


Figure 101 : Tracés de l'évolution de la température des thermocouples (°C) en fonction du temps (min) pour des prises d'escalade en composite

ANNEXE X: CHOIX DU CHARGEMENT LE PLUS CONTRAIGNANT DES PRISES D'ESCALADES

Pour justifier le choix du dimensionnement du critère de CM selon le positionnement de la force vue en 4.3.2.2. On réalise le positionnement opposé (Figure 102).

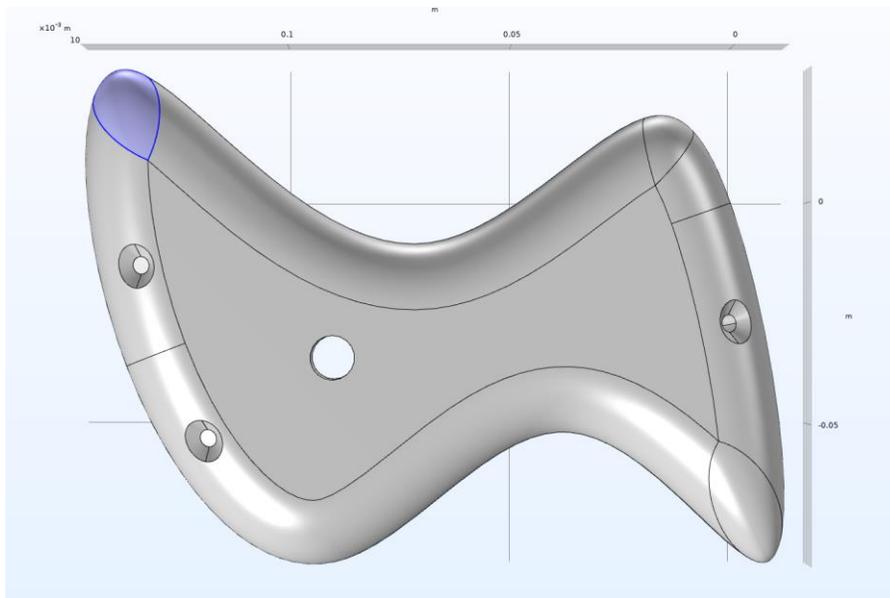


Figure 102: Autre zone possible d'application de la force pour dimensionner le critère de rupture en statique

On réalise la simulation dans ce cas pour une prise d'escalade en composite. Selon la même démarche qu'expliqué dans la partie 4.3.2.2, on quantifie l'évolution du critère de CM en fonction de la force exercée (Figure 103).

On obtient dans ce cas un effort limite avec une valeur de critère minimale de 1,25 pour une force exercée de 2 400 N. On trouve ci-dessous (Figure 104) une modélisation de la répartition du critère pour la force limite. Cette dernière est bien plus élevée que celle obtenue précédemment qui est de 1 880 N. On justifie ainsi que la position limitant pour déterminer le critère est celle choisie.

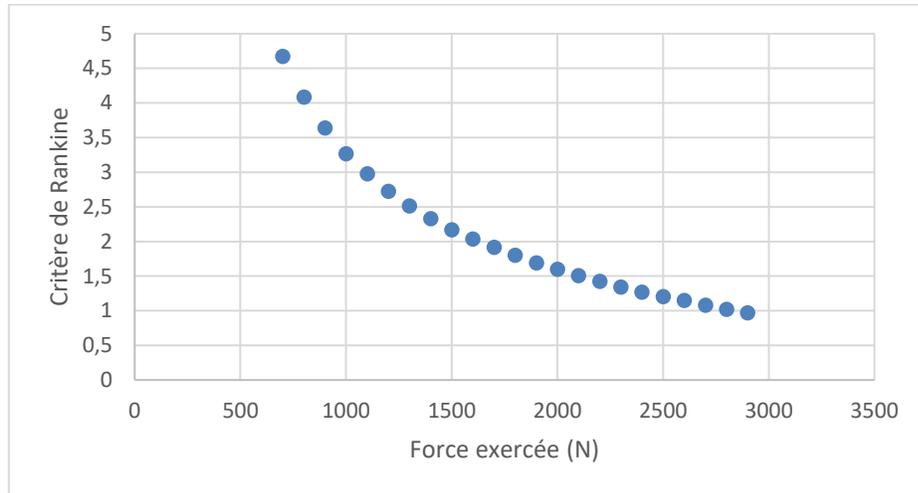


Figure 103 : Évolution du critère de CM en fonction de la force exercée

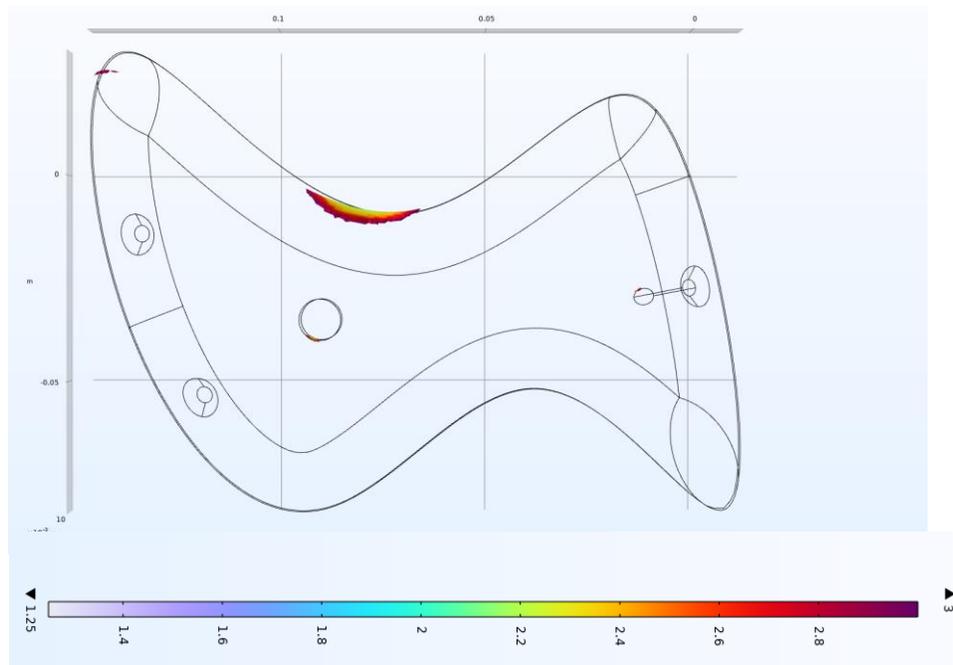


Figure 104 : Répartition du critère de CM dans le cas de la force limite de 2 400 N

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES,

AFNOR. (2021). SPORTS ET LOISIRS Les normes volontaires de matériels, équipements et activités. *Ministère chargée des sports*.

AFNOR, N. (2005). *Points de fixation des matériels sportifs à leurs supports—Exigences fonctionnelles et de sécurité, méthodes d'essai (NF S52-400)*. 20.

AFNOR, N. (2007). *Matériels de réception pour structures artificielles d'escalade (SAE) avec points d'assurage—Exigences de sécurité et méthodes d'essai (NF P90-312)*. 12.

AFNOR, N. (2008). *Mise à disposition d'équipements de protection individuelle pour activités physiques, sportives, éducatives et de loisirs dédiés à la pratique de l'escalade, l'alpinisme, la spéléologie et activités utilisant les mêmes techniques et équipements—Modalités de contrôle et de suivi (NF S72-701)*. 24.

AFNOR, N. (2009). *Structures artificielles d'escalade—Partie 3 : Exigences de sécurité et méthodes d'essai pour prises d'escalade (NF EN 12572-3)*.

AFNOR, N. (2017a). *Structures artificielles d'escalade—Partie 1 : Exigences de sécurité et méthodes d'essai relatives aux SAE avec points d'assurage (NF EN 12 572-1)*. 35.

AFNOR, N. (2017b). *Structures artificielles d'escalade—Partie 2 : Exigences de sécurité et méthodes d'essai relatives aux pans et blocs d'escalade(NF EN 12572-2)*. 31.

Air Tech, inc. (2024). *Fibre de verre coupée* [Site d'entreprise]. Air Tech. <https://www.airtech-rc.com/pr161945/fibre-de-verre-coupee-de-4-5-mm-400g>

Akindoyo, J. O., Beg, M. D. H., Ghazali, S., Islam, M. R., Jeyaratnam, N., & Yuvaraj, A. R. (2016). Polyurethane types, synthesis and applications – a review. *RSC Advances*, 6(115), 114453-114482. <https://doi.org/10.1039/C6RA14525F>

Arkema. (2022). *The recyclable liquid thermoplastic resin for all composites*. Arkema. https://www.arkema.com/global/en/products/product-finder/product-range/incubator/elium_resins/

Arkema, E. (s. d.). *Fiche technique Arkema Elium 150*. MatWeb, Material Property Data. <https://www.matweb.com/errorUser.aspx?msgid=2&ckck=nocheck>

Bensaada, S. (2019). *Cours de moulage* (Université de Biskra). <http://elearning.univ-biskra.dz/moodle2019/course/view.php?id=1845>

Berthereau, A., & Dallies, E. (2008). *Fibres de verre de renforcement*. Techniques de l'ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/sciences-et-technologies-du-verre-42573210/fibres-de-verre-de-renforcement-am5132/>

Bien vivre ensemble. (2014). *Bien vivre ensemble*. <https://bienvivreensembleataulignan.blogspot.com/p/blog-page.html>

Bourgignon, M., Grignard, B., & Detrembleur, C. (2022). Water-Induced Self-Blown Non-Isocyanate Polyurethane Foams. *Angew Chem Ind Ed*, 61-71. <https://doi.org/10.1002/ange.202213422>

Breen, M., Reed, T., Nishitani, Y., Jones, M., Breen, H. M., & Breen, M. S. (2023). Wearable and Non-Invasive Sensors for Rock Climbing Applications : Science-Based Training and Performance Optimization. *Sensors*, 23(11), 5080. <https://doi.org/10.3390/s23115080>

Buonamici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Governi, L., Lapini, A., & Volpe, Y. (2018). Reverse engineering modeling methods and tools : A survey. *Computer-Aided Design and Applications*, 15(3), 443-464. <https://doi.org/10.1080/16864360.2017.1397894>

Button, C., Orth, D., Davids, K., & Seifert, L. (2018). The influence of hold regularity on perceptual-motor behaviour in indoor climbing. *European Journal of Sport Science*, 18(8), 11. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1472812>

- CBJ, J. (2023, février 10). *Gyms and Trends 2022* [Journal]. Climbing Business Journal. <https://www.climbingbusinessjournal.com/gyms-and-trends-2022/>
- CIO, Comité international olympique. (2024). *Historique escalade sportive* [Site olympique]. olympique.ca. <https://olympique.ca/sports/escalade-sportive/>
- Datta, J., Hu, B., & Yuan, D. (2018, Février). *Interactive Climbing Hold Design Document*. <https://courses.grainger.illinois.edu/ece445/getfile.asp?id=12487>
- Deltombe, G., Goaer, O. L., & Barbier, F. (s. d.). Bridging KDM and ASTM for Model-Driven Software Modernization. *Université de Pau*, 8.
- Dessarthe, A. (1996). Introduction aux plastiques et composites en mécanique. *Conception et Production*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-b5170>
- E. Dowling, N. (2013). *Mechanical behavior of materials* (Fourth edition).
- Ecuyer, A., & Haeni, O. (s. d.). *Boom de l'escalade : Les dangers qui guettent les grimpeurs* [Journal]. 24 heures. Consulté 9 février 2024, à l'adresse <https://webspecial.24heures.ch/longform/boom-de-lescalade-dangers-guettent-grimpeurs/boom-de-lescalade-dangers-guettent-grimpeurs/>
- Farooqui, S. (2019, décembre 11). *Rock climbing's Olympic debut, and its growing popularity come with challenges*. CTV News. <https://www.ctvnews.ca/sports/rock-climbing-s-olympic-debut-and-its-growing-popularity-come-with-challenges-1.4726631>
- Formlabs, inc. (2020, octobre 7). *Fiche technique Elastic 50A Resin*. <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001420-TDS-FR-0.pdf>
- FQME. (2010). *Règlement de sécurité de la fédération québécoise de la montagne et de l'escalade*. 23.
- Fuss, F. K., & Niegl, G. (s. d.). *Quantification of the Grip Difficulty of a Climbing Hold (PI42)*. 8. https://doi.org/10.1007/978-2-287-09413-2_3

Fuss, F. K., & Niegl, G. (2006). Instrumented Climbing Holds and Dynamics of Sport Climbing. In E. F. Moritz & S. Haake (Éds.), *The Engineering of Sport 6* (p. 57-62). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-46050-5_11

Fuss, F. K., & Niegl, G. (2008). Instrumented climbing holds and performance analysis in sport climbing. *Sports Technology*, 1(6), 301-313. <https://doi.org/10.1080/19346182.2008.9648487>

Fuss, F. K., Weizman, Y., Burr, L., & Niegl, G. (2013). Assessment of grip difficulty of a smart climbing hold with increasing slope and decreasing depth. *Sports Technology*, 6(3), 122-129. <https://doi.org/10.1080/19346182.2013.854800>

Fuss, F. K., Weizman, Y., Niegl, G., & Tan, A. M. (2020). Climbers' Perception of Hold Surface Properties : Roughness Versus Slip Resistance. *Frontiers in Psychology*, 11, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00252>

Hebert, A. (1972). *Alpinisme au Québec* (Editions du Jour Inc). Editions du Jour Inc.

IFSC, I. F. of sport climbing. (2022). Rules of sport climbing. *Mars 2022*, 96.

Jones, G., Schöffl, V., & Johnson, M. I. (2018). Incidence, Diagnosis, and Management of Injury in Sport Climbing and Bouldering : A Critical Review. *Current Sports Medicine Reports*, 17(11), 396-401. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000534>

Karganroudi, S., Aminzadeh, A., Ibrahim, H., Rahmatabadi, D., Francois, V., & Cuillière, J.-C. (2022). A Novel Automated Approach for Geometric Reconstruction and Flexible Remanufacturing of Spur Gears Using Point Cloud Mapping Analysis. *Computer-Aided Design and Applications*, 92-108. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2023.92-108>

Keating, D. (2023, décembre 13). *What are climbing holds made of?* <https://climbinghouse.com/what-are-holds-made-of-materials/>

Kemona, A., & Piotrowska, M. (2020). Polyurethane Recycling and Disposal : Methods and Prospects. *Polymers*, 12(8), 22. <https://doi.org/10.3390/polym12081752>

Khachouch, M. K., Korchi, A., & Lakhrissi, Y. (2023). Architecture Driven Modernization : A Review on Reverse Engineering Techniques based on Models' Approach. *WSEAS TRANSACTIONS ON INFORMATION SCIENCE AND APPLICATIONS*, 20, 293-302. <https://doi.org/10.37394/23209.2023.20.32>

La Boutique du Léopard. (2023, mars 10). *Comment Sont Fabriquées Les Prises D'escalade?* [Site d'une entreprise]. Les Arts de la grimpe. <https://boutique-lesartsdelagrimpe.com/blog/fabrication-prise-escalade.html>

La fabrique verticale. (2017, avril 13). *Comment sont conçues les prises d'escalade? Réponse d'un shaper!* [Blog]. La fabrique verticale. <https://lafabriqueverticale.com/fr/conception-prises-escalade/>

Larson, K. (2019). Can You Estimate Modulus From Durometer Hardness for Silicones? *The Dow Chemical Company*. https://www.researchgate.net/publication/336239577_Can_You_Estimate_Modulus_From_Durometer_Hardness_for_Silicones_Yes_but_only_roughly_and_you_must_choose_your_modulus_carefully

Lechner, B., Filzwieser, I., Lieschnegg, M., & Sammer, P. (2013). A Climbing Hold With an Integrated Three Dimensional Force Measurement and Wireless Data Acquisition. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 6(5), 13. <https://doi.org/10.21307/ijssis-2017-639>

Liljedahl, M., Lindbherg, S., & Berg, J. (2005). *Digiwall—An Interactive Climbing Wall*. 4. <https://doi.org/10.1145/1178477.1178513>

Limb, D. (1995). Injuries on British climbing walls. *British Journal of Sports Medicine*, 29(3), 168-170. <https://doi.org/10.1136/bjism.29.3.168>

Maffiodo, D., Sesana, R., Gabetti, S., & Colombo, A. (2020). Innovative force sensor for indoor climbing holds – real-time measurements and data processing, design and validation.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology, 234(4), 298-311. <https://doi.org/10.1177/1754337120927122>

Markforged, inc. (2022, janvier 20). *Fiche Technique Markforged*. <https://markforged.com/fr/3d-printers/metal-x>

Movement Factory, H. (2017). *Movement Factory*. <https://movementholds.com/>

Ngo, A. D. (2023). Mécanique des matériaux composites. In *Cours de composite avancé* (p. 15-16).

Nouryon. (2022a). *Our curing systems for thermoset resins*. https://www.nouryon.com/globalassets/inriver/resources/brochure-thermoset-nar-en_us.pdf

Nouryon, I. (2022b, novembre 28). *Fiche technique Perkadox GB-50L*. Nouryon. <https://www.nouryon.com/product/perkadox-gb-50l-dibenzoyl-peroxide-cas-94-36-0/>

Paschal, C. (2022, décembre 30). Le polyuréthane du futur sera-t-il vert ? *Techniques de l'ingénieur*. <https://www-techniques-ingenieur-fr.rp1.ensam.eu/actualite/articles/le-polyurethane-du-futur-sera-t-il-vert-118324/>

Plastisem. (2024). *Injection plastique—Injection thermoplastique—Presse à injecter—Guide*. Plastisem. <https://plastisem.fr/guides-et-conseils/guide-injection-plastique/>

Prieto-González, P., Martínez-Castillo, J. L., Fernández-Galván, L. M., Casado, A., Soporki, S., & Sánchez-Infante, J. (2021). Epidemiology of Sports-Related Injuries and Associated Risk Factors in Adolescent Athletes: An Injury Surveillance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 4857. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094857>

prises-escalade.fr. (s.d.). *En quoi sont fabriqués les prises, volumes et macros d'escalade ?* [Article]. [prises-escalade.fr. https://www.pprises-escalade.fr/blog/conseils/en-quoi-sont-fabriques-les-prises-volumes-et-macros-d-escalade](https://www.pprises-escalade.fr/blog/conseils/en-quoi-sont-fabriques-les-prises-volumes-et-macros-d-escalade)

PTC. (s. d.-a). *Durometer Shore A PTC® Instruments Classic Style #306L* [Site d'entreprise]. PTC instruments. Consulté 8 février 2024, à l'adresse <https://www.ptc1.com/durometer-a-306l>

PTC. (s. d.-b). *Durometer Shore D PTC® Instruments Classic Style #307L* [Site d'entreprise]. PTC instruments. Consulté 8 février 2024, à l'adresse <https://www.ptc1.com/durometer-d-307>

Qi, H. J., Joyce, K., & Boyce, M. C. (2003). Durometer Hardness and the Stress-Strain Behavior of Elastomeric Materials. *Rubber Chemistry and Technology*, 76(2), 419-435. <https://doi.org/10.5254/1.3547752>

Rauch, S., Wallner, B., Ströhle, M., Dal Cappello, T., & Brodmann Maeder, M. (2019). Climbing Accidents—Prospective Data Analysis from the International Alpine Trauma Registry and Systematic Review of the Literature. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(1), 203. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010203>

Rose, S. (2021, janvier). *L'histoire complète de l'escalade*. Savage Rose. <https://savagerose.org/fr/lhistoire-compl%C3%A8te-de-lescalade/>

Samuel. (2019, octobre 31). *Dureté Shore des matériaux d'impression 3D - Makershop* [Site d'entreprise]. Maker Shop 3D. <https://www.makershop.fr/blog/durete-shore-des-materiaux-impression-3d/>

Schöffl, V. R., Hoffmann, G., & Küpper, T. (2013). Acute Injury Risk and Severity in Indoor Climbing—A Prospective Analysis of 515,337 Indoor Climbing Wall Visits in 5 Years. *Wilderness & Environmental Medicine*, 24(3), 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.wem.2013.03.020>

Seifert, L., Wolf, P., & Schweizer, A. (Éds.). (2017). *The science of climbing and mountaineering* ([First edition]). Routledge.

Standarts, A. (2021, juillet 13). *Rock on : Artificial climbing structures standard revised—Standards Australia*. <https://www.standards.org.au/news/rock-on-artificial-climbing-structures-standard-revised>

Tomasevic, D. (2020, Aout). *La fonderie en coquille par gravité*. MetalBlog. <https://metalblog.ctif.com/2020/08/31/le-moulage-coquille-par-gravite/>

Valls, E., & Placette, T. (2005). *Les Structures Artificielles d'Escalade pour l'Education Physique et Sportive*. 59.

Van Middelkoop, M., Bruens, M., Coert, J., Selles, R., Verhagen, E., Bierma-Zeinstra, S. M., & Koes, B. (2015). Incidence and Risk Factors for Upper Extremity Climbing Injuries in Indoor Climbers. *International Journal of Sports Medicine*, 36(10), 837-842. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1547224>

Verhamme, B., Nakatani, N., Persico, N., Roch, A., & Resseguier, N. (2023). Analyse descriptive des accidents de salles d'escalade de bloc indoor. *Annales françaises de médecine d'urgence*, 13(3), 147-153. <https://doi.org/10.3166/afmu-2022-0498>

Wikipedia, inc. (2023, novembre). *Escalade*. Wikipedia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Escalade>

Ye, Y., & Zhu, Q. (2017). The development of polyurethane. *Materials Science: Materials Review*, 1(1), 8.

Zainab, R. (2019). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (ASTM D638)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>

