UCLouvain

École polytechnique de Louvain

Caractérisation mécanique des grumes

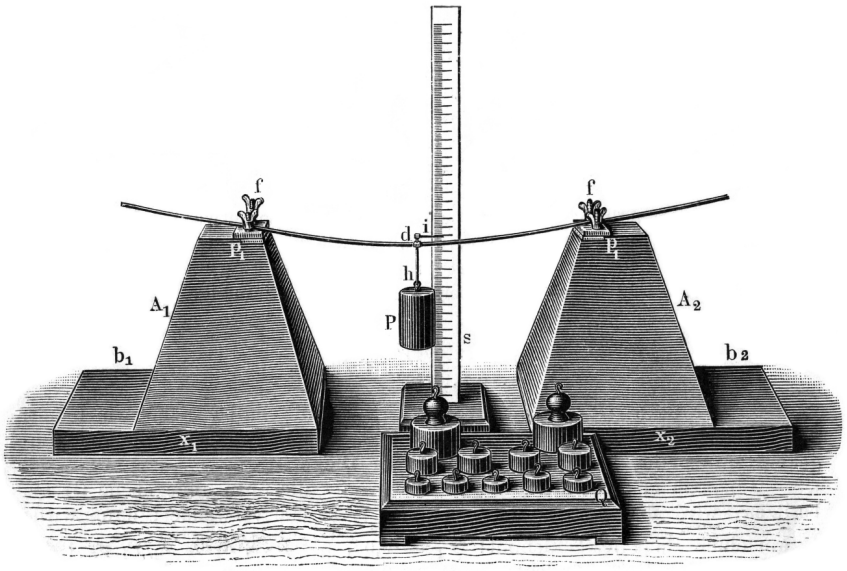
Auteurs : **Christopher Moens**, **Jens Niclaes**
Promoteur : **Pierre Latteur**
Lecteurs : **Emmanuel Defays**, **Catherine Doneux**, **Jonas Feron**, **Hugues Frère**
Année académique 2020–2021
Master [120] : ingénieur civil des constructions

UCLouvain

École Polytechnique de Louvain

LGCE2990 : Travail de fin d'études

Caractérisation mécanique des grumes



Auteurs :

Christopher Moens — Jens Niclaes

Promoteur :

Pierre Latteur

Lecteurs :

Emmanuel Defays — Hugues Frere — Catherine Doneux — Jonas Feron

13 juin 2021

Résumé

Le bois est un matériau de construction écologique aux propriétés mécaniques intéressantes. Malheureusement, son utilisation actuelle, trop dénaturée, ne le rend économiquement pas compétitif face aux ténors du marché de la construction : le béton et l'acier. Ce travail s'inscrit dans la volonté de rationaliser le matériau bois en l'employant sous sa forme la plus brute, c'est-à-dire la grume. Plus précisément, le travail s'intéresse à l'établissement d'un protocole d'essai non destructif afin de caractériser les propriétés mécaniques des grumes dans le but d'une utilisation structurale.

Dans un premier temps, des essais de flexion 4 points sur échantillons équarris d'épicéa belge de petites dimensions ont été réalisés. Ils ont permis de déterminer et évaluer les paramètres influençant le protocole. Dans un second temps, des essais de flexion 4 points sur 21 grumes d'épicéa belge dont le diamètre variait de 22 à 32 centimètres ont permis de vérifier expérimentalement l'idée finale du protocole. Un classement visuel de chaque grume a également été réalisé suivant des normes belge et allemande.

Malgré des grumes fortement dégradées, les essais ont permis de définir un comportement jusqu'ici méconnu par de nombreux acteurs de la construction : la « nervience ». Ce comportement regroupe un ensemble d'observations faites sur les échantillons équarris et les grumes : rupture en cascade, réduction de la plasticité avec le temps et la repasse par le dernier extremum de chargement. Ces expérimentations ont également permis de valider le dispositif d'essai, c'est-à-dire le matériel d'essai et les instruments de mesure.

Cette étude expérimentale n'est pas suffisante pour garantir le fonctionnement du protocole d'essai. Des tests complémentaires doivent être réalisés. Néanmoins l'utilisation des grumes dans le secteur de la construction semble être un sujet de recherche tout à fait prometteur.

Abstract

Wood is an ecological construction material with interesting mechanical properties. Unfortunately, its current use, too distorted, does not make it economically competitive with the tenors of the construction market : concrete and steel. This work is part of the desire to rationalize the wood by using it in its most raw form, that is to say the log. More precisely, the work focuses on the establishment of a non-destructive test protocol to characterize the mechanical properties of logs for structural use.

First, 4-point bending tests on small squared samples of Belgian spruce were performed. They allowed to determine and evaluate the parameters influencing the protocol. Secondly, 4-point bending tests on 21 Belgian spruce logs with diameters ranging from 22 to 32 centimeters were used to experimentally verify the final idea of the protocol. A visual classification of each log was also performed according to Belgian and German standards.

Despite the severely degraded logs, the tests allowed the definition of a behavior hitherto unknown to many construction actors : the « nervience ». This behavior gathers a set of observations made on squared samples and logs : cascade failure, reduction of plasticity with time and replaying through the last loading extremum. These experiments also allowed the validation of the test set-up, i.e. the test equipment and the measuring instruments.

This experimental study is not sufficient enough to guarantee the operation of the test protocol. Additional tests must be performed. Nevertheless, the use of logs in the construction sector seems to be a very promising research topic.

Remerciements

Avant de rentrer dans le vif du sujet, nous souhaitons commencer par remercier notre promoteur, le Professeur Pierre Latteur. Nous vous remercions de nous avoir donné l'occasion de travailler sur un sujet autant passionnant qu'enrichissant. Nous vous remercions d'avoir trouvé les mots justes pour mettre feu à notre rage de découverte. Nous vous remercions d'avoir pris le temps nécessaire pour pointer les aspects obscurs de notre réflexion. Nous vous remercions de nous avoir consacré du temps pour vous laisser convaincre. Nous vous remercions de nous avoir laissé une liberté importante dans les choix et la méthodologie, que ce soit pour les expériences ou les écrits. Nous vous remercions, malgré les difficultés, de nous avoir fait confiance en toute circonstance.

Nous aimerions également remercier Hugues Frère et Emmanuel Defays, deux incroyables personnes aussi captivantes que passionnantes. Votre patience et votre sagesse nous ont maintes fois guidés au travers du monde de la recherche. Il a été un honneur pour nous de faire, à vos côtés, nos premiers pas dans cet univers d'inconnues. Vos connaissances et votre passion pour le bois ont été des alliés de choix pour grimper à la cime de ce qui se fait en bois. Et, bien entendu, vos regards expérimentés et issus d'un monde plus biologique ont été plus que nécessaire pour saisir la nature sibylline du bois.

Nous avons aussi une pensée toute particulière pour Jonas Feron qui, malgré qu'il ne soit pas un expert en bois, a accepté d'être notre lecteur. C'est toujours un plaisir de croiser un visage si souriant lorsque nous venons travailler au laboratoire. Nous espérons que nous arriverons via cet écrit à partager la passion qui nous a animée lors de sa confection.

Nous remercions également Catherine Doneux, directrice du laboratoire LEMSC nous ayant permis de réaliser une pléthore d'essais. Nous ne pourrons jamais suffisamment vous remercier de la gentillesse, de la générosité et du soutien dont vous avez fait preuve à notre égard. Vous avez su allier stimulation, avec certaines questions bien choisies, et sérénité, avec votre indéfectible ouverture d'esprit. Nous vous remercions de tout coeur, Madame Doneux, d'avoir de temps en temps mis de côté des essais du laboratoire pour que nous puissions procéder aux nôtres dans les temps.

Également membre du laboratoire, nous souhaitons particulièrement remercier Christophe Bayart. Vous nous avez accompagnés depuis le premier jour dans la confection de nos essais sur grumes. Vous nous avez aidés à comprendre toute la difficulté d'essais sur des éléments de dimensions d'un tronc. Vous nous avez au mieux transmis votre savoir afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles. Vous êtes d'une indéniable gentillesse et ce fût un véritable plaisir de travailler à vos côtés.

Nous remercions chaudement toute l'équipe du laboratoire. Nous nous excusons d'avoir été autant dans vos pieds de l'aube au crépuscule, vous faisant travailler bien plus que de raison. Nous pensons à Antoine Bietlot et Alex Bertholet. Vous nous avez grandement aidés dans l'implémentation du protocole sur grumes ainsi que dans la détermination des mesures pertinentes. Tout ceci n'aurait cependant pas été possible sans la précieuse aide de Pierre Mertens de Wilmars et Frédo

(Frédéric Gorski). Nous vous remercions du fond du coeur de nous avoir aidés d'une part à la confection de tous les dispositifs utiles aux essais sur grumes mais également à la manutention de celles-ci. Nous voulons particulièrement dire merci à Quentin Mestrez et Vincent Forzee. Vous êtes probablement ceux qui ont dû le plus subir notre présence au laboratoire. Vos aides, conseils et simplement votre sympathie resteront à jamais dans nos mémoires.

Il est difficile de mettre les mots justes pour exprimer la gratitude que nous avons pour nos trois assistants préférés : Julien Geno, Martin Steinmetz et Justin Goose. Vous nous avez littéralement accompagnés du début à la fin de ce mémoire. Jusqu'au dernier jour vous nous avez aidés à peaufiner notre texte. Votre passion, votre avidité de connaissance, votre engouement pour ce sujet ont été des sources d'inspiration et de motivation. Vos questionnements, votre sagacité, votre curiosité ont été autant un challenge qu'un plaisir pour nos esprits. Surtout, nous vous remercions pour votre patience et votre largesse. En effet, vous nous avez donné sans compter et avez mis tout votre coeur à l'ouvrage. Bien que nous ayons mis votre tolérance à rude épreuve, vous ne nous avez jamais abandonnés et toujours permis de rebondir sur nos pieds afin de repartir sur de meilleures bases. Nous n'aurions pas pu espérer meilleurs alliés. Tout simplement : Merci !

Nous voulons également remercier Bertrand Dubois. Vous nous avez rejoint en cours de route mais votre expertise issue du monde privé ainsi que votre esprit critique nous ont permis d'envisager de nouveaux angles de vue.

Nous remercions particulièrement le garde forestier Thibaut Thyrion. Vous nous avez généreusement fourni les grumes ayant permis d'atteindre le pinacle de cet ouvrage.

Enfin, au risque de sembler sempiternel, nous remercions tous nos proches sans qui nos vies perdraient de leur sens. Nous pensons en particulier à notre coterie du master GC. Étant donné qu'ils présentent également leur travail de fin d'études, leur regard et nos discussions étaient d'un intérêt indéniable.

Bien entendu, nous disons merci à nos familles et à tous les gens qui ont dû nous supporter durant cette longue épreuve. Nous avons une pensée toute particulière pour nos parents et leurs nombreuses relectures.

Et de manière beaucoup plus globale, nous remercions toute personne qui a de près ou de loin permis qu'aujourd'hui nous, deux jeunes étudiants, puissions se permettre de faire des études supérieures que nous aimons et dont nous sommes passionnés, en espérant leur faire honneur par la réalisation de ce travail.

Je ne sais qu'une chose, c'est
que je ne sais rien

Socrate

The measure of intelligence is
the ability to change

Albert Einstein

Ars longa,
vita brevis,
occasio praeceps,
experimentum periculosum,
iudicium difficile

Hippocrate

Table des matières

Table des matières **ix**

1 Introduction **2**
1.1 Construire en bois . . . 2
1.1.1 Avantages . . . 2
1.1.2 Inconvénients . . . 3
1.2 Construire avec des grumes . . . 4
1.2.1 Intérêts . . . 4
1.2.2 Défis . . . 4
1.3 Fourniture des grumes . . . 5
1.4 Méthodes générales de détermination des propriétés mécaniques . . . 6
1.5 Méthodes de dimensionnement basées sur les Eurocodes . . . 8
1.5.1 Définitions des états limites . . . 8
1.5.2 Approches de conception . . . 9
1.6 Approches du protocole d'essai . . . 10
1.6.1 Approche de « performance élastique » . . . 10
1.6.2 Approche de « dimensionnement » . . . 11
1.6.3 Choix du protocole . . . 13
1.7 Plan du travail . . . 14

2 État de l'art **16**
2.1 Généralités sur le matériau bois . . . 16
2.1.1 Structure générale de l'arbre . . . 16
2.1.2 Principaux constituants du bois . . . 17
2.1.3 Anisotropie du bois . . . 17
2.1.4 Structure anatomique du bois . . . 19
2.2 Comportement mécanique du bois . . . 20
2.2.1 Modes de sollicitation . . . 20
2.2.2 Élastoplasticité . . . 21
2.2.3 Viscoélasticité . . . 21
2.3 Facteurs influençant les propriétés mécaniques du bois . . . 25
2.3.1 Humidité . . . 25
2.3.2 Séchage . . . 27
2.3.3 Fente de pré-retrait . . . 30
2.3.4 Écorçage à la main et fraisage . . . 30
2.4 Essais mécaniques sur grumes - *Proof-testing* . . . 32
2.5 Utilisation des grumes dans la construction . . . 33
2.5.1 Fondations . . . 33
2.5.2 Planchers et murs . . . 33

2.5.3 Constructions diverses 34

3 Méthodologie d'analyse 36
3.1 Calcul des rigidités 36
3.2 Lecture des graphes 38
3.3 Mesures analysées 39
3.3.1 Comportement global et valeurs à la rupture 39
3.3.2 Déplacement résiduel 39
3.3.3 Rigidité 40
3.3.4 Force maximale 41
3.3.5 La Fonction S ou S 41

4 Essais sur éprouvettes équarries 44
4.1 Généralités 45
4.1.1 Dispositif 45
4.1.2 Échantillonnage 47
4.1.3 Protocole 48
4.1.4 Tableau récapitulatif 51
4.2 Résultats sur éprouvettes équarries 53
4.2.1 Phase de prospection 53
4.2.2 Phase d'étude 54
4.2.3 Phase d'élaboration 56

5 Préparation des essais sur grumes 62
5.1 Classement visuel 62
5.1.1 Facteurs influençant le classement visuel 63
5.1.2 Classement visuel d'aspect du bois rond - Norme blege (NBN EN 1927-1) 65
5.1.3 Classement visuel structural du bois rond - Norme allemande (DIN 4074-2) 66
5.1.4 Comparaison du classement visuel entre les normes belge (NBN EN 1927-1) et allemande (DIN 4074-2) 68
5.2 Photogrammétrie 69
5.2.1 Principe 69
5.2.2 Mise en place des grumes 71
5.2.3 Précision du modèle 3D 71
5.2.4 Utilisation du modèle 3D 73
5.3 Mise en place de l'essai 74
5.3.1 Les grumes 74
5.3.2 Matériel d'essai 75
5.3.3 Instruments de mesure 79
5.3.4 Validation du dispositif d'essai 82

6 Essais sur grumes 86
6.1 Le protocole 86

6.2 « Nervience » 87
6.2.1 Rupture en cascade 87
6.2.2 Réduction de la plasticité par action du temps 88
6.2.3 Repasse par le dernier extremum 89
6.3 Conclusion 90

7 Conclusion et perspectives **94**
7.1 Conclusion 94
7.2 Perspectives 96
7.2.1 Point de vue scientifique 96
7.2.2 Point de vue industriel 97

A Réductions des propriétés mécaniques en fonction de la température de séchage **100**

B Analyse statistique **104**
B.1 Détermination des valeurs caractéristiques à 5 et 95 % d'exclusion 105
B.2 Détermination des valeurs caractéristiques moyennes 108

C Codes *Matlab* **110**
C.1 Implémentation de la norme NBN EN 14358 [11] 110
C.2 Implémentation du calcul des modules de Young selon la norme NBN EN 408 [10] 113

D Passage de la flèche sous chargement à la flèche centrale **118**

E Calcul de l'humidité et des densités pour les échantillons équarris et les grumes **120**
E.1 Calcul de l'humidité et des densités pour les échantillons équarris 120
E.2 Calcul de l'humidité et des densités pour les grumes 123

F Analyse détaillée des essais sur les éprouvettes équarries **126**
F.1 Phase de prospection 126
F.2 Phase d'étude 135
F.3 Phase d'élaboration 165

G Analyse du protocole sur les grumes **176**

H Caractéristiques influençant le classement visuel des grumes **184**
H.1 Les noeuds 184
H.2 Les poches de résine 185
H.3 Le taux de croissance 185
H.4 Les fils tors 186
H.5 Le coeur excentré 186
H.6 Le bois de réaction 187
H.7 La courbure 187

H.8 La décroissance . . . 188
H.9 Les fentes de coeur . . . 188
H.10 Les roulures . . . 189
H.11 Les attaques d'insectes . . . 189
H.12 L'échauffure . . . 190
H.13 La pourriture . . . 190
H.14 La discoloration . . . 191

I Classement visuel des grumes 194

J Tableau faisant le lien entre l'aspect et la résistance du bois selon la norme allemande DIN 1052 258

K Photogrammétrie 260
K.1 Paramètres choisis dans *Metashape* pour la précision du modèle . . . 260
K.2 Erreurs sur le périmètre des grumes entre le modèle 3D et la réalité . . . 261

L Références du matériel employé 264

M Détails des résultats sur éprouvettes équarries 268
M.1 Batterie 1 : Chargement cyclique . . . 269
M.2 Batterie 2 : Chargement statique : Lebow . . . 344
M.3 Batterie 3 : Délai entre deux cycles . . . 351
M.4 Batterie 4 : Vitesses de chargement et de déchargement . . . 411
M.5 Batterie 5 : Nombre de cycles . . . 471
M.6 Batterie 6 : Chargement statique : ZwickRoell . . . 521
M.7 Batterie 7 : Protocole potentiel et délai entre deux cycles . . . 526

N Détails des résultats sur grumes 628

Glossaire 718

Bibliographie 722

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Le bois est beau. Le bois est chaleureux. Le bois est naturel. Le bois est authentique. Le bois est rassurant. Le bois est majestueux. Le bois est écologique. Bref, le bois est fascinant. Qu'il soit utilisé sous la forme de poutres et colonnes apparentes ou simplement comme matériau de revêtement à l'instar des parquets et bardages, le bois permet d'amener de la vie dans une construction. Le bois n'est pas seulement esthétique. Il offre des caractéristiques mécaniques intéressantes qui doivent être mises en compétition avec celles de l'acier et du béton, les ténors du marché de la construction.

Pourtant, il est boudé par les constructeurs. Comment se fait-il qu'un matériau si riche soit si peu utilisé ? Pourquoi se limiter à construire en acier et en béton ? Quels peuvent bien être les défauts freinant les entrepreneurs ? Comment pourrait-on combler les lacunes du bois ? Comment est-il possible de ramener le bois sur le premier plan des matériaux de construction ?

L'introduction vise à répondre à ces nombreuses questions afin de situer où se trouve, à ce jour, le bois dans la construction. Elle cite notamment les avantages et inconvénients de la construction en bois. Elle offre aussi des solutions à ces défauts. Et surtout, elle donne le sujet concret du travail ainsi que les axes pris.

1.1 Construire en bois

1.1.1 Avantages

Rapport performances mécaniques/densité La Figure 1.1 reprend la résistance et la rigidité du béton, du bois et de l'acier, normalisées en fonction de la densité.

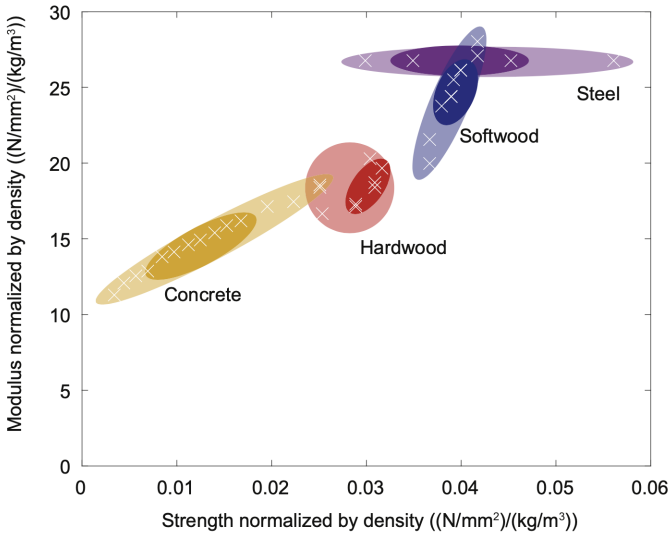


Figure 1.1 – Résistance à la compression et module de Young normalisés en fonction de la densité [52]

On observe que le bois résineux a des performances presque similaires à celles de l'acier. Ceci illustre parfaitement que le bois est à la fois résistant et léger alors que l'acier est extrêmement résistant mais lourd. Par conséquent, le bois est particulièrement efficace dans les structures où le poids propre est la charge prépondérante [52].

Tenue au feu Contrairement à ce que l'on pourrait croire, le bois résiste bien au feu. En effet, dans un incendie, la couche extérieure du bois se carbonise isolant le reste de l'élément. L'intérieur, maintenu à une plus faible température, garantit la portance de l'ouvrage. Il se distingue nettement de l'acier qui perd toutes ses caractéristiques mécaniques à partir d'une certaine température. En ce qui concerne le béton, il résiste également bien au feu grâce à notamment sa forte inertie thermique [1].

Impact environnemental Le bois est un matériau écologique. Il est renouvelable, recyclable et se distingue par un bilan carbone positif. En effet, le bois est capable d'absorber du CO_2 et ensuite de le stocker durant toute la durée de vie d'un ouvrage. Quant à l'acier et au béton, ce sont des matériaux beaucoup plus énergivores et nocifs pour l'environnement à cause de leur importante extraction en matières premières.

1.1.2 Inconvénients

Variabilité L'acier est un matériau extrêmement bien maîtrisé par l'homme ce qui en fait un matériau peu variable au niveau de ses propriétés mécaniques. Le béton a des caractéristiques plus dispersées et le bois équarri [2] encore davantage. En effet, les défauts, le taux de croissance ou encore l'humidité sont différents pour chaque arbre et même pour chaque planche issue d'un même arbre. Le bois est également anisotrope, ce qui signifie que ses propriétés mécaniques varient en fonction de l'orientation étudiée. En effet, la résistance parallèle aux fibres est environ 10 fois plus importante que la perpendiculaire, amenant dès lors des difficultés de conception.

Prix Économiquement parlant, la production du bois est relativement lente et coûteuse comparée à celle de l'acier et du béton. Le bois représente également un risque car il faut espérer que son exploitation forestière ne soit pas ravagée par une catastrophe avant d'avoir son retour sur investissement. À ce jour, le bois est toujours transformé en poutres, colonnes, panneaux ou produits dérivés. Ceci représente un coût supplémentaire à la production du produit brut.

1. L'inertie thermique d'un matériau représente sa résistance au changement de température lorsque intervient une perturbation de son équilibre thermique.

2. L'équarrissage du bois est un procédé visant à produire une section à angle droit à partir d'un tronc.

1.2 Construire avec des grumes

Fort du constat que le bois équarri possède une forte variabilité intrinsèque et est également très coûteux, l'idée de travailler en grume [3] fait son apparition. La volonté est de rendre le bois plus compétitif sur le marché de la construction. Les grumes permettent de répondre, en partie, aux deux défauts majeurs du bois énoncés plus haut. Pour autant, construire avec des grumes implique également certains défis, tant au niveau de la conception qu'au niveau structural.

1.2.1 Intérêts

Diminution de la variabilité Construire avec la grume entière permet de garder la section intacte. Ainsi, l'intégrité des fibres est conservée. De plus, les anisotropies radiale et tangentielle ont moins d'impact car la section est considérée dans son ensemble. Dès lors, dans une section idéale, les conséquences d'un côté du centre de la grume équilibrent celles à son opposée. L'impact des défauts est également réduit. Par exemple, un nœud par rapport à la taille d'une planche représente une partie importante de celle-ci. Face à une grume, le même nœud a une importance moindre. Cependant, contrairement aux planches où on peut espérer n'avoir que peu de défauts, il est certain que l'on en aura avec les grumes étant donné que le tronc est pris dans son entièreté.

Diminution du prix Utiliser directement les grumes implique moins de transformations. Forcément, en enlevant des intermédiaires, le prix baisse rendant le bois compétitif et attrayant pour les concepteurs. De plus, une telle utilisation permet de valoriser les arbres auparavant jugés trop fins. Par conséquent, les exploitations forestières auront plus d'arbres à haute valeur puisqu'ils seront directement utilisés dans la construction. En augmentant leur rentabilité, on peut espérer une augmentation du nombre d'acteurs sur le marché, entraînant naturellement une baisse des prix. Ceci rendrait le bois compétitif par rapport autres matériaux de construction.

1.2.2 Défis

Typologies structurales Étant donné que l'on utilise l'élément sous son état le plus brut, la longueur, le diamètre ou encore la conicité de la grume peuvent fortement varier d'un spécimen à l'autre. Ceci entraîne inévitablement une limitation des typologies structurales possibles. Habituellement, lorsque l'on travaille avec du bois, on a le choix d'utiliser : des arches ou éléments à grande portée à l'aide du bois lamellé-collé, des poteaux-poutres pour des bâtiments de taille modeste, des treillis pour les grandes portées ou les charpentes, des panneaux CLT pour les bâtiments à plusieurs étages, ... En

3. Grume est défini comme suit dans la suite du travail : arbre abattu, ébranché et écorcé. Pour le surplus, il est renvoyé au glossaire.

ce qui concerne les grumes, elles doivent être considérées comme des éléments discrets de type barre assemblées et par conséquent, principalement utilisables dans des systèmes poteaux-poutres [30].

Conception d'assemblages Imaginer des assemblages n'est jamais simple, surtout dans le cas du bois. Avec des grumes qui sont globalement des éléments ronds, joindre deux éléments est complexe d'autant plus que les dimensions changent pour chaque spécimen. Par conséquent, chaque assemblage sera différent. De la recherche et de l'optimisation sont évidemment nécessaires dans ce domaine afin de concevoir des assemblages les plus robustes possibles.

Détermination de caractéristiques mécaniques À l'heure actuelle, il existe déjà un système de production du bois équarri réglementé et contrôlé. Il faudra probablement l'adapter pour la production spécifique de grume. Cependant, le plus important n'est pas ce volet-là. Ce dont l'ingénieur de structure a sans aucun doute besoin sont les propriétés mécaniques des grumes. En effet, l'ingénieur doit pouvoir prédire la tenue de l'élément. Pour ce faire, il doit connaître la charge maximale supportable par la grume ainsi que la déformation liée à la charge appliquée.

Le mémoire s'inscrit dans ce troisième défi. Il a l'ambition d'établir un protocole d'essai permettant de garantir les propriétés mécaniques des grumes.

1.3 Fourniture des grumes

Il existe, à notre connaissance, trois grandes approches en ce qui concerne la fourniture de grumes. La réflexion qui suit influence peu, voire pas, la suite du mémoire. Elle permet cependant de comprendre les ambitions et la philosophie qui est derrière ce travail.

Approche « stock de grumes » Les grumes sont testées sans aucune information sur le type de projet dans lequel elles seront utilisées. Cette idée veut que les fournisseurs tels que les scieries, soient livrés en grumes par des exploitations forestières. Ils procèdent ensuite à un protocole d'essai permettant de déterminer les propriétés mécaniques de chaque grume. Par après, ils emmagasinent ces grumes. En parallèle, il y a une base de données reprenant les propriétés mécaniques, l'encombrement, le prix et toutes autres informations jugées utiles. Les concepteurs de bâtiment ont accès à cette base de données et peuvent commander les grumes qui leur conviennent en fonction des informations disponibles et de leur budget. Dans un monde idéal, chaque grume peut alors être employée au maximum de ses capacités. Chaque grume est choisie dans un but précis et une position définie dans la structure du bâtiment. Bien entendu, ce monde idéal se base sur un stock infini de grumes où toutes les combinaisons de dimensions, propriétés mécaniques, ... sont possibles.

Approche « projet par projet » Dans celle-ci, il n'y a plus du tout de stock. Les concepteurs conçoivent leur bâtiment en se basant sur les valeurs habituellement atteintes par les grumes et s'orientent grâce à un guide de bonnes pratiques. Ensuite, les directeurs du projet achètent un stock de grumes qu'ils envoient à une scierie ou autre afin de les tester selon les exigences établies par les concepteurs. La scierie vérifie alors que chaque grume répond aux exigences données par le projet. Les grumes ne satisfaisant pas à celles-ci sont alors écartées et transformées en produits dérivés. Cette approche ne permet pas d'optimiser au maximum l'utilisation des grumes. En effet, certaines grumes pourront certainement passer un test plus strict que celui exigé par le projet. De plus, les grumes écartées auraient pu être validées pour un projet moins exigeant. Cependant, cette approche a le mérite de ne pas devoir disposer d'un stock important de grumes. Dès lors, il n'y a pas les difficultés qui y sont liées comme le contrôle de la température, de l'humidité, etc. De plus, un stock de grumes rime avec un investissement important non seulement au niveau de l'infrastructure de stockage mais également au niveau de l'achat des grumes. En effet, le fournisseur de grumes doit acheter lui-même une quantité importante de grumes sans être certain qu'elles auront une grande résistance ou qu'elles seront utiles.

Approche « stock vivant de grumes » Dans cette méthode, les exploitants forestiers estimeraient les propriétés mécaniques de leurs arbres quand ceux-ci sont encore sur pied. Ces estimations, avec la géolocalisation de l'arbre, seraient gardées dans une base de données. Dès lors, seuls les arbres susceptibles de répondre aux exigences du projet seraient abattus. Ceci permet de limiter les pertes de la deuxième approche sans pour autant répondre à la sous-estimation des propriétés de certaines grumes.

1.4 Méthodes générales de détermination des propriétés mécaniques

Afin de déterminer les propriétés mécaniques des grumes il existe, à notre connaissance, deux grandes approches : la « statistique » et celle « au cas par cas ». La Figure 1.2 compare les deux approches.

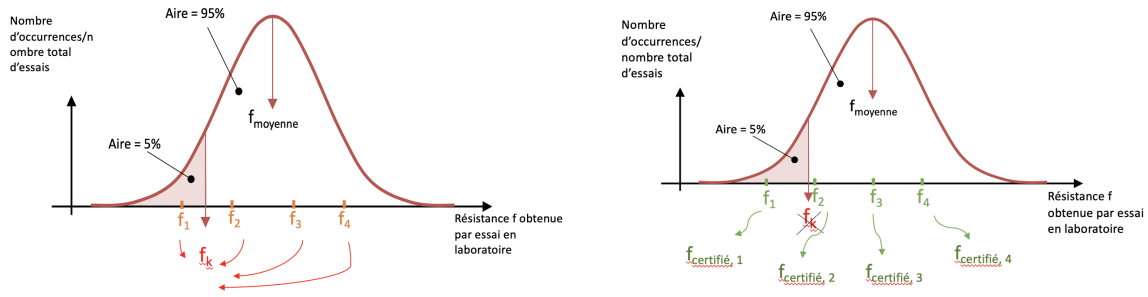
Approche « statistique » Cette approche est actuellement la plus commune puisqu'il s'agit de celle en vigueur dans les normes. Elle se base sur une analyse statistique des résultats d'essais réalisés sur une large population d'éléments de la même essence. Dans une telle configuration, on teste par exemple 500 [4] épicéas belges d'une même région en flexion 4 points jusqu'à la rupture [11]. Lors de ces essais, on mesure la charge de rupture et la relation entre la force appliquée et la déformation subie. De cela, on peut pour chaque éprouvette déterminer la résistance et le module de Young. En principe, la

4. La norme NBN EN 14358 propose ce nombre de 500 échantillons pour atteindre un niveau de confiance très élevé sur le lot testé.

fréquence des valeurs obtenues a une distribution dite normale ou de Gauss autour de la valeur moyenne de la population.

Les fréquences se répartissent symétriquement autour de la moyenne et le maximum est à la moyenne. Selon le calcul de conception prévu par les Eurocodes, on prend la valeur moyenne ou caractéristique. Cette dernière est la valeur pour laquelle seul 5% des spécimens ont une valeur inférieure. Comme on peut le voir sur la Figure 1.2a, 95% ont alors une valeur du paramètre étudié supérieure à celle prise. Ainsi, on garantit que le matériau tiendra le coup dans 95% des cas. La valeur « officielle de calcul » du paramètre étudié est cette valeur caractéristique.

Malheureusement pour le bois, cette approche est assez punitive. En effet, en général, sa courbe de Gauss est assez plate comparée à celle de l'acier. Autrement dit, l'écart-type sur la population testée est bien plus important que pour une batterie d'essais équivalente sur de l'acier. Ceci a pour conséquence que la valeur caractéristique est fortement éloignée de la valeur moyenne. Naturellement, les propriétés d'une grande majorité de bois seront sous-estimées. Ce phénomène est dû au côté aléatoire du bois. En effet, les défauts, le taux de croissance ou encore l'humidité sont différents pour chaque arbre et même pour chaque éprouvette issue d'un même arbre.



(a) « Statistique »

(b) « Au cas par cas »

FIGURE 1.2 – Comparaison des approches de détermination des propriétés mécaniques. Images inspirées de [39].

Approche « au cas par cas » Elle consiste à mesurer les propriétés mécaniques de chaque grume, spécimen par spécimen. Il n'est dès lors plus question d'une valeur commune à tous les éléments d'une même essence issus d'une même région. Ceci a deux avantages majeurs. Premièrement, la valeur des propriétés n'est plus réduite quand elle dépasse la caractéristique. Deuxièmement, on ne surestime plus la valeur du paramètre comme on le faisait dans 5% des cas. La difficulté de cette méthode résulte dans la rapidité des essais et bien entendu de leur fiabilité. Il faut, effectivement, que les systèmes utilisés soient suffisamment robustes pour assurer une détermination cohérente au cours du temps. Il faut aussi que le protocole d'essai permette d'assurer les valeurs avancées afin d'être sûr que le matériau ne faillira pas.

Cette seconde approche est l'axe choisi pour ce mémoire.

1.5 Méthodes de dimensionnement basées sur les Eurocodes

Lorsqu'un ingénieur dimensionne une structure, il suit une approche de vérification basée sur les Eurocodes [5]. Celle-ci impose le respect de critères dans deux configurations de charge : l'état limite de service (ELS) et l'état limite ultime (ELU). La conception par états limites consiste à vérifier que la structure soumise à une situation propre à l'état limite étudié, respecte le critère. Pour qu'une construction soit acceptée, elle doit naturellement respecter le critère de chaque état limite.

1.5.1 Définitions des états limites

État Limite Ultime (ELU) Les états limites touchant la protection des usagers et/ou de la structure sont considérés comme les états limites ultimes. Ils consistent principalement [6] :

- À la perte d'équilibre de tout ou partie de la structure considérée comme un corps rigide ;
- À la rupture par excès de déformation, à la transformation de tout ou en partie de la structure en un mécanisme, en une rupture, en une perte de stabilité, et ce en incluant les supports et fondations ;
- À la rupture par fatigue ou tout autre phénomène dépendant du temps.

Il est nécessaire de saisir la différence entre **état de rupture** et **état limite ultime**. Comme dit l'Eurocode [6], un état limite ultime correspond à un niveau de déformation de la structure ne pouvant plus permettre la protection des usagers ou d'elle-même. Il s'agit dès lors d'un état tel que le bâtiment aura besoin de modification afin d'être à nouveau propre à l'usage, ou dans le pire des cas à sa destruction et reconstruction. Dès lors, le dépassement avéré de la limite d'élasticité d'un matériau fait partie des états limites ultimes. L'état de rupture correspond quant à lui simplement à la ruine complète de la structure. Dans la suite de ce travail, il sera question de force ELU (F_{ELU}), pour les charges correspondantes à l'état limite décrit ci-dessus. Elle se distingue de la charge de rupture exprimée par la force de rupture ($F_{\mathrm{rupt.}}$) [6].

État Limite de Service (ELS) Les états limites touchant au bon fonctionnement de la structure ou des éléments présents (machines, etc.), au confort des usagers ou à l'apparence de l'ouvrage sont considérés comme les états limites de service . Dès lors, toute déformation ou fissure objectivement visible est bannie. Il est nécessaire que les usagers n'aient aucune raison de craindre pour leur sécurité ou leur confort lors de leur utilisation de la construction. Pour un tel état, il est nécessaire que la structure sous charges habituelles, dites « de service » (F_{ELS}), se déforme peu [6].

5. Les Eurocodes sont des normes européennes dictant le calcul des structures, prises en vue d'uniformiser le marché de la construction au sein de l'Union européenne.

1.5.2 Approches de conception

Pour travailler avec des grumes, il est probablement pertinent d'adapter les méthodes de dimensionnement. Comme dit plus haut, les grumes ont des dimensions qui ne sont pas constantes sur tout l'élément. Par conséquent, il n'est pas possible de déterminer avec précision l'aire et l'inertie sur toute la longueur de la grume. Or, les calculs des Eurocodes utilisent ces notions. En exemple, prenons le cas du dimensionnement en flexion simple d'une poutre chargée uniformément comme présenté en Figure 1.3.

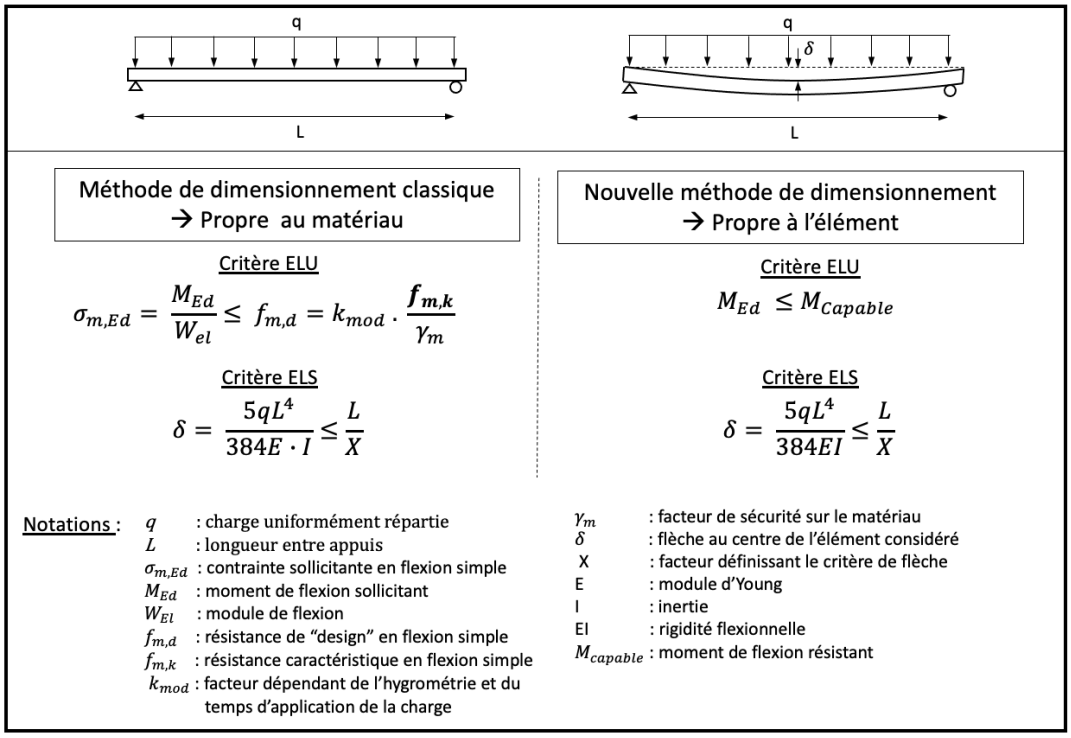


FIGURE 1.3 – Approches de méthode de dimensionnement

Critère ELU Dans le cas d'un dimensionnement classique, on vérifie que la contrainte sollicitante, provoquée par les charges appliquées sur l'élément, est inférieure à la contrainte résistante. Afin de connaître les contraintes sollicitantes, il est nécessaire de déterminer l'aire et l'inertie de la grume. Or, cette superficie change de manière indéterminée tout le long de la grume. Il est possible de faire des approximations en considérant que la grume est un cylindre à diamètre constant ou variable. Cependant, ces approches ne sont pas précises. L'approche suivie dans la « nouvelle méthode de dimensionnement » s'affranchit des dimensions de l'élément. On ne parlera plus en termes de contrainte résistante mais en moment capable [6]. Dès lors, l'ingénieur de structure lors de sa conception devra vérifier que le moment sollicitant ne dépasse pas ce moment capable.

6. Le moment capable est le moment fléchissant maximal supportable par la section, créé par F_{ELU}.

Critère ELS Les états limites touchant au bon fonctionnement de la structure ou des éléments présents (machines, etc.), au confort des usagers ou à l'apparence de l'ouvrages. Une philosophie semblable s'applique lors du calcul de la flèche. Dans le cas d'un dimensionnement classique, la méthode utilise le module de Young (E) et l'inertie (I) de la section. Cependant, ces deux paramètres dépendent des dimensions de la section [7] et comme pour le calcul à l'ELU, on aimerait s'en affranchir. Il est alors préférable de considérer la rigidité flexionnelle (EI) de l'élément. En effet, « E » lie la contrainte à la déformation (niveau local) et « EI » lie le moment à la courbure (niveau global).

1.6 Approches du protocole d'essai

Reprenons les objectifs du protocole de certification de propriétés mécaniques sur grumes. Le protocole doit fournir la relation force – déplacement, la rigidité et la charge (ou moment) maximale applicable. Ceci doit être fait sans altérer la grume, c'est-à-dire qu'il faut provoquer le moins possible de **déformation irréversible**, autrement dit de **plasticité**, et de **diminution de la rigidité**, ou en d'autres termes **d'endommagement**. De toute évidence, l'essai se doit d'être non-destructif, il ne peut pas rompre la grume puisqu'elle est destinée à être installée dans un bâtiment après avoir été testée. En bonus, le protocole doit être facile à mettre en place, rapide et peu coûteux. Deux approches de protocole sont étudiées dans ce mémoire.

1.6.1 Approche de « performance élastique »

Cette approche consiste à chercher la limite élastique, c'est-à-dire la force maximale du domaine élastique de la grume. Ainsi, on connaît la charge maximale supportable par la grume sans déformation plastique. Comme la Figure 1.4 le montre, le comportement du bois est quasi-linéaire pour des faibles charges. Ceci représente l'élasticité supposée du matériau. En augmentant la charge, on s'écarte de ce comportement linéaire. Forcément, pour connaître la limite de ce comportement, il est nécessaire d'en sortir. Or, dès qu'on n'est plus enélasticité, on est en plasticité. En d'autres termes, pour envisager cette approche, il faut accepter de plastifier la grume. Cette concession est en soi envisageable et n'est pas forcément préjudiciable pour la qualité du bois. En effet, une déformation irréversible n'est pas toujours un problème. Si elle reste raisonnable, la grume pourra encore être installée. Il faudra surtout s'assurer que la grume n'a pas été trop endom-

7. Ceci semble *a priori* inexacte. Bien entendu, l'inertie dépend bien des dimensions de la section. Cependant, ce n'est normalement pas le cas du module de Young. En effet, il s'agit d'une propriété relative au matériau. Cependant, pour déterminer cette notion, il est nécessaire de passer par les dimensions de la section de l'éprouvette sur laquelle l'essai est effectué. Effectivement, tout comme les contraintes, cette notion n'est pas « réelle ». Il s'agit d'une construction mathématique permettant de généraliser les propriétés d'un élément fait dans matériau à tous les autres éléments du même matériau mais aux dimensions différentes. Pour la déterminer, on passe typiquement par un essai de flexion 4 points où on établit une relation entre la force et le déplacement mesurés.

magée. Dans tous les cas, il faut définir une « déformation irréversible raisonnable » et « trop endommagée ». Ceci ne peut se faire qu'à l'aide de grandes batteries d'essais et une utilisation sur le long terme des grumes. Effectivement, il faut que l'écoulement du temps révèle si oui ou non un tel déplacement ou une telle perte de rigidité est un problème pour la tenue des bâtiments.

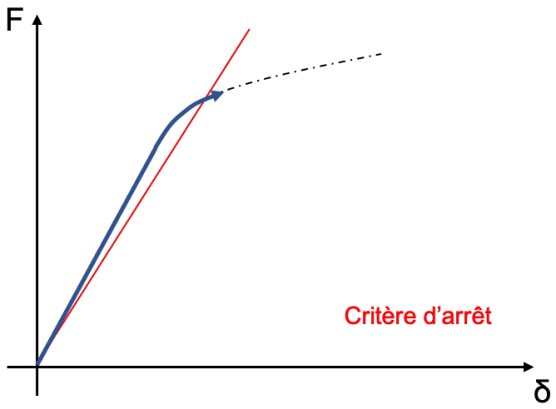


FIGURE 1.4 – Schéma du protocole selon l'approche de « performance élastique ». Arrêt du protocole par dépassement d'un critère d'arrêt.

1.6.2 Approche de « dimensionnement »

Cette approche se base sur les méthodes de calcul utilisées par les Eurocodes. Étant donné que le protocole s'inscrit dans une volonté de construire avec des grumes, seules les données directement utilisées par l'ingénieur des structures sont d'intérêt. Cette approche est une méthode d'ingénieur, où nous allons uniquement chercher ce qui est utile en pratique. Elle n'est par conséquent pas purement scientifique. En effet, dans une telle approche, l'objectif serait la découverte des limites du matériau et la compréhension complète la grume. Cependant, il s'avère par les méthodes de conception utilisées qu'il n'est pas utile de connaître la grume sous tous ses aspects. **Il suffit de s'assurer que les critères ELS et ELU sont respectés.**

Critère ELS Le critère est souvent pris en termes de flèche relative, par exemple L/500, L/300, L/250 où « L » représente la portée de l'élément. Une flèche de L/250 est un des critères les plus laxistes. En effet, elle permet à la structure une déformation relativement importante, deux fois plus grande qu'une flèche de L/500. Dès lors, ce critère permet l'application d'une force plus importante.

Critère ELU Il est naturellement possible de trouver un lien entre les charges maximales tolérées par l'état limite ultime et l'état limite de service. Ce passage entre le calcul à l'ELU et à l'ELS, pour le cas le plus défavorable, est le suivant :

1. Un coefficient de sécurité sur les charges est appliqué pour la détermination de F_{ELU} tandis qu'il n'y en a pas pour le cas en service :

$$F_{\text{ELU},1} = 1,5 \cdot Q_{variable} + 1,35 \cdot Q_{permanente}$$
$$F_{\text{ELS}} = Q_{variable} + Q_{permanente}$$

On comprend rapidement que la plus grande différence entre F_{ELU} et F_{ELS} opère lorsque l'on considère uniquement des charges variables. Par conséquent :

$$F_{\text{ELU, 1}} = 1,5 \cdot F_{\text{ELS}}$$

2. Lors du calcul à l'ELU pour le bois, on applique un coefficient de sécurité sur le matériau qui vaut 1,3 dans le cas du bois massif :

$$F_{\text{ELU, 2}} = 1,3 \cdot F_{\text{ELU, 1}} = 1,3 \cdot 1,5 \cdot F_{\text{ELS}}$$

3. On divise également la charge par un coefficient réducteur prenant en compte la classe de service et le temps d'application de la charge. On fait l'hypothèse que la grume fera partie d'un ouvrage qui ne sera directement exposé aux intempéries. On ne prend donc pas en compte les valeurs de k_{mod} de la classe de service 3.

Classe de durée de charge	**Durée de la charge**	**Exemple**	**Coefficient k_{mod} associé**		
			Classe de service 1	**Classe de service 2**	**Classe de service 3**
Permanente	>10 ans	Poids propre	0,6	0,6	0,5
Long terme	6 mois →10 ans	Stockage	0,7	0,7	0,55
Moyen terme	1 semaine →6mois	Charges d'exploitation, neige	0,8	0,8	0,65
Court terme	<1 semaine	(neige), vent	0,9	0,9	0,7
Instantanée	Instantanée	(vent), action accidentelle	1,1	1,1	0,9

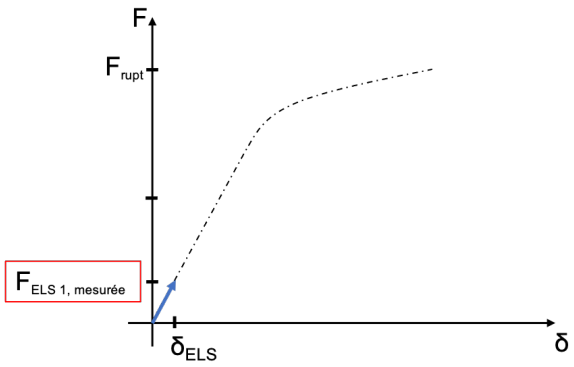
Figure 1.5 – Valeurs du coefficient réducteur k_{mod} [39]

Puisqu'il s'agit d'une division, le pire cas est quand ce coefficient vaut 0,6 :

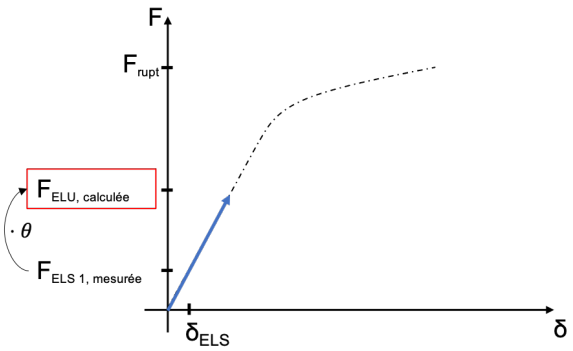
$$F_{\text{ELU, 3}} = \frac{F_{\text{ELU, 2}}}{0,6} = \frac{1,3 \cdot 1,5}{0,6} \cdot F_{\text{ELS}} = 3,25 \cdot F_{\text{ELS}}$$

Idée finale du protocole d'essai Considérant ce qui a été dit, ci-après se trouvent les étapes du protocole se basant sur les méthodes de calcul de l'Eurocode, illustrées par la Figure 1.6.

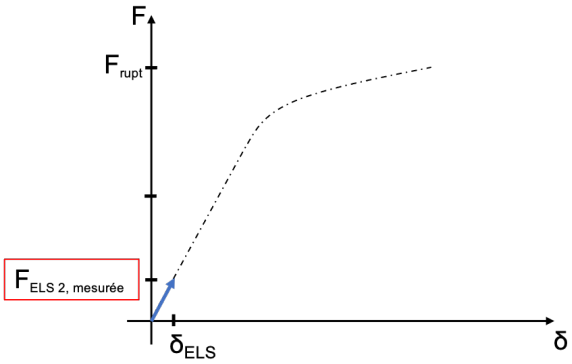
1. Chargement jusqu'au critère de flèche $d_{\text{ELS}} = \frac{L}{250}$;
2. Mesure de $F_{\text{ELS}} = F(d_{\text{ELS}})$;
3. Détermination de $F_{\text{ELU}} = \theta \cdot F_{\text{ELS}}$. Où, dans le pire cas, $\theta = 3,25$;



(a) Étapes 1 et 2 : Chargement jusqu'au critère de flèche δ_{ELS} et mesure de $F_{\text{ELS},1}$



(b) Étapes 3 et 4 : Calcul de $F_{\text{ELU}} = \theta \cdot F_{\text{ELS},1}$ et chargement jusqu'à cette valeur



(c) Étape 5 : Chargement jusqu'au critère de flèche δ_{ELS} et mesure de $F_{\text{ELS},2}$, pour déceler une éventuelle variation

FIGURE 1.6 – Étapes du protocole selon l'approche de « dimensionnement »

4. Chargement jusque F_{ELU} ;
5. Grume validée si elle n'est pas altérée (plastification et/ou endommagement).

Le critère de flèche et la constante liant F_{ELU} à F_{ELS} peuvent être différents en fonction de l'approche de fourniture des grumes envisagée. Dans un cas général, il faut prendre le cas le plus exigeant de telle sorte que les grumes testées soient bonnes pour tout projet. Si les grumes seront utilisées dans un projet requérant des critères moins stricts, autant les tester selon ceux-ci.

1.6.3 Choix du protocole

Dans ce travail, l'approche de « dimensionnement » est choisie pour réaliser les essais sur grumes.

Cette méthode est simple et facile à mettre en œuvre. Elle a l'avantage d'aller à l'essentiel. En principe, F_{ELU} sera moins important que la limite élastique. Dès lors, le risque est moindre qu'avec l'approche de « performance élastique » qui doit nécessairement, certes

légèrement, altérer la grume. De plus, la méthode choisie ne doit pas supposer l'existence de domaines élastique et plastique ainsi qu'une limite entre les deux. D'un autre côté, l'approche de « dimensionnement » ne permet pas de tirer le plein potentiel en résistance des grumes. Cependant, par les méthodes de calcul utilisées, il serait impossible de tirer parti d'une résistance supérieure à F_{ELU}. Toutefois, il est tout à fait possible, après des années de recherches et de pratiques, que l'on trouve qu'une légère altération de la grume est rentable pour le gain de résistance qu'on aurait et qu'on arriverait à tirer parti de cette résistance accrue par d'autres méthodes de calcul.

À retenir

Utilisation des grumes dans le domaine de la construction :

- Impact environnemental, variabilité et prix réduits en comparaison avec des éléments de bois équarris *mais* défis de conception et de détermination des caractéristiques mécaniques ;
- Détermination des propriétés mécaniques par approche « au cas par cas », c'est-à-dire en mesurant les propriétés mécaniques de chaque grume, spécimen par spécimen ;
- Idée d'un protocole d'essai suivant l'approche de « dimensionnement » basée sur les méthodes de calcul des Eurocodes.

1.7 Plan du travail

Maintenant que la philosophie et que les orientations principales sont connues, il est possible d'envisager la suite du travail avec sérénité. Il se compose tout d'abord d'une revue de littérature. Elle permet de donner les bases à tout un chacun afin de comprendre ce qu'est le bois et ses propriétés importantes. De plus, elle montre ce qui se fait déjà en grumes dans le monde de la construction.

Ensuite, viennent les analyses de batteries d'essais réalisées sur des éprouvettes équarries de petites dimensions et sans défauts. Elles ont permis de comprendre le bois sous des chargements statique et cyclique, c'est-à-dire que le bois subi plusieurs chargements et déchargements lors de l'essai. De surcroît, elles déterminent et étudient les paramètres influençant le protocole d'essai.

Après, le mémoire s'arrête sur le concept de classement visuel en étudiant une norme belge dit « d'aspect » et un allemande dit « mécanique ». Il en profite également pour discuter de systèmes d'imagerie et de leur intérêt lors du travail avec des grumes.

Enfin, le travail procède à la réalisation et la mise en place du dispositif d'essais pour les grumes. Il en retire également les critiques observées lors de l'essai. Ensuite, le travail présente les essais réalisés sur les grumes.

Finalement, l'ouvrage se termine avec une conclusion rappelant les points clefs du travail avant d'envisager les pistes et perspectives pour des études futures.

CHAPITRE II

ÉTAT DE L'ART

Le bois est un matériau naturel particulièrement complexe à caractériser. Il se distingue par une hétérogénéité intervenant à tous niveaux, que ce soit à l'échelle macroscopique ou microscopique. Pourtant, malgré ces difficultés, l'utilisation du bois dans le domaine de la construction mérite que l'on s'y attarde. Elle offre de nombreuses possibilités tant au niveau visuel que structural. Ce chapitre a pour but de rappeler des généralités concernant le bois afin d'aborder avec sérénité la suite du travail et d'en comprendre toutes les démarches.

2.1 Généralités sur le matériau bois

2.1.1 Structure générale de l'arbre

Un peu de vocabulaire

Un arbre se présente de manière générale en trois parties, remplissant chacune un rôle différent [61] :

- **Les racines** sont la partie souterraine servant à l'approvisionnement en eau et en matières minérales nécessaires à la croissance de l'arbre ;
- **Le tronc** est l'élément principal de l'arbre remplissant le rôle de soutien mécanique de l'élément ;
- **Le houppier** est l'association des branches et du feuillage servant à la photosynthèse des éléments nécessaires à la croissance de l'arbre.

Ce travail s'intéresse évidemment au tronc, produit de base servant à la confection de tous les éléments de construction en bois. Par abus de langage, nous ne ferons pas de distinction dans ce travail lorsqu'il sera fait mention d'un tronc d'arbre ou d'une grume.

Les essences de bois

On classe le bois en deux grandes familles : les résineux et les feuillus. De ce classement général découle un nombre important d'espèces et variétés différentes. Dans ce mémoire, on s'intéresse à un résineux en particulier, l'épicéa, dont la dénomination botanique est *picea abies*.

L'épicéa est abondamment utilisé dans le domaine de la construction. Ses qualités sont nombreuses mais la plus distinctive est une croissance rapide et droite des troncs. Ceci en fait une espèce compétitive sur le marché de la construction en bois. Le but ultime de cette recherche étant de valoriser un maximum le matériau bois, il semble logique de s'intéresser à l'espèce la plus utilisée dans la construction en Belgique.

2.1.2 Principaux constituants du bois

Le bois est composé principalement de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Ces éléments se combinent pour former trois bio-polymères : la cellulose, la lignine et l'hémicellulose. À ces macromolécules s'ajoutent certains extractibles et des substances minérales. Ces composants chimiques assurent des rôles différents au sein du bois [44, 62].

- **La cellulose** est le réseau cristallin généralement associé aux propriétés mécaniques du bois.
- **La lignine** est la matrice complexe amorphe englobant la cellulose et l'hémicellulose participant principalement à l'élasticité des parois ainsi qu'à leur rigidité. Elle est également liée, de manière générale, à l'imperméabilité et la durabilité de l'élément.
- **L'hémicellulose**, amorphe également, lie la lignine et la cellulose ensemble.
- **Les extractibles**, présents en faible quantité, sont à l'origine de la couleur et de l'odeur du bois.

La répartition de ces composants varie d'une essence de bois à l'autre mais peut également différer d'un élément à l'autre. Pour information, la distribution se fait approximativement comme le décrit le Tableau 2.1.

Constituants	Résineux [%]	Feuillus [%]
Cellulose	42 ± 2	45 ± 2
Hémicellulose	27 ± 2	30 ± 5
Lignine	28 ± 3	20 ± 4
Extractibles	3 ± 2	5 ± 3

Tableau 2.1 – Composition générale du bois [66]

2.1.3 Anisotropie du bois

Plan ligneux

Le bois est un matériau anisotrope, c'est-à-dire que son comportement est différent en fonction de la direction selon laquelle on analyse le matériau. Sur la Figure 2.1, on peut observer les 3 plans de références : transversal, radial et tangentiel qui constituent le plan ligneux. Les vecteurs normaux issus de ces 3 plans sont les directions d'anisotropie du bois. La lettre « L » indique le vecteur dans la direction longitudinale (dans le sens des fibres), « R » la direction radiale (dans la direction de croissance des cernes annuels) et « T » la direction tangentielle (tangente aux cernes annuels).

Une analyse microscopique des plans de référence permet de définir l'organisation des cellules caractéristiques du plan ligneux. Chaque essence a un agencement spécifique de son plan, ce qui permet de les distinguer les unes des autres [66].

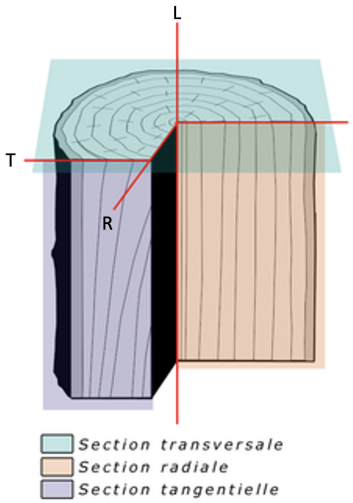


Figure 2.1 – Plans de référence dans le bois [39]

Variations dimensionnelles

Le bois, en raison de sa constitution de matière cellulosique, est capable de libérer (ou fixer) de l'eau ce qui entraine des variations dimensionnelles. À cause de son caractère anisotrope, ces variations dimensionnelles ne sont pas identiques dans chaque direction. Le rapport pour estimer l'influence du rétrécissement (ou du gonflement) du bois entre la direction longitudinale, radiale et tangentielle est 1 : 10 : 20 [30]. Par conséquent, lors du débitage de la grume, l'endroit de prélèvement de matière joue un rôle sur les variations de dimensions que pourra subir l'élément. Pour exemple, sur la Figure 2.2, on observe comment l'élément se comporte, dans le cas d'un retrait (voir éléments sur la gauche) ou d'un gonflement (voir éléments sur la droite) de planches prélevées à deux endroits différents.

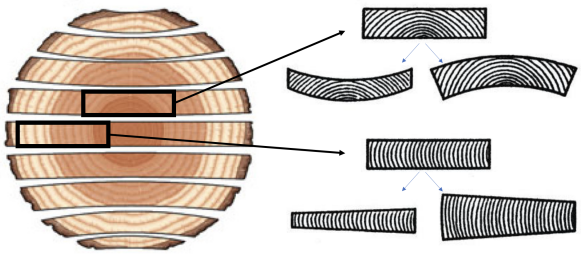


Figure 2.2 – Variations dimensionnelles dans le bois [39]

Un nombre important d'éléments de dimensions différentes peut être issu d'un tronc lors du débitage comme le caricature la Figure 2.3. Cette schématisation est particulièrement parlante de la dénaturation du tronc d'arbre. C'est d'ailleurs une des principales causes du prix élevé du bois dans la construction. On transforme trop ce dernier avant de l'utiliser. Travailler directement avec des grumes permet de s'affranchir de ces transformations et permet également de se dispenser de ces problèmes de variations dimensionnelles dans différentes directions.



FIGURE 2.3 – Débitage d'un tronc d'arbre [40]

2.1.4 Structure anatomique du bois

Si une coupe transversale dans un tronc d'arbre est réalisée, voir Figure 2.4, plusieurs couches circulaires différentes sont rencontrées [13].

- **Moelle** : « Zone située à l'intérieur de la première couche d'accroissement, constituée principalement de tissu mou » ;
- **Duramen** : « Zone intérieure du bois qui, dans un arbre sur pied, ne contient plus de cellules vivantes ou ne conduit plus la sève » ;
- **Aubier** : « Zone extérieure du bois qui, dans un arbre sur pied, contient des cellules vivantes et conduit la sève brute vers le haut » ;
- **Cambium** (tissu très fin, quelques microns) : « Couche de cellules en cours de division active qui, dans l'arbre vivant, forme le liber vers l'extérieur et l'aubier vers l'intérieur » ;
- **Liber** : « Couche intérieure de l'écorce qui, dans un arbre sur pied, contient des cellules vivantes et conduit la sève élaborée vers le bas depuis les feuilles » ;
- **Écorce** : « Revêtement protecteur extérieur de la tige et des branches d'un arbre ».

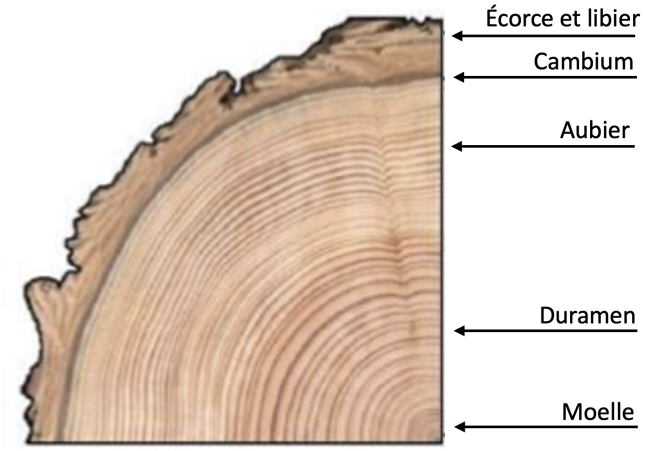


FIGURE 2.4 – Couches circulaires dans le bois [18]

2.2 Comportement mécanique du bois

2.2.1 Modes de sollicitation

Les principaux types de sollicitation sont : la traction, la compression, le cisaillement et la flexion (sollicitation regroupant les trois premières). Le comportement du bois varie fortement en fonction de l'orientation de ces sollicitations qui peuvent être soit parallèles soit perpendiculaires aux fibres. La résistance à la traction perpendiculaire aux fibres du bois est très mauvaise. Le comportement n'est pas non plus identique si l'échantillon de bois est avec ou sans défaut. Le bois sans défaut a une résistance à la traction plus importante qu'à la compression mais, en présence de défauts, particulièrement de nœuds, la résistance à la traction chute en dessous de celle à la compression.

Pour comprendre le comportement en flexion du bois, mode de sollicitation utilisé pour l'ensemble de nos essais, il faut d'abord décrire le comportement en traction et compression axiale. On observe sur les courbes contrainte-déformation de la Figure 2.5, des comportements assez différents.

- **Pour la traction parallèle aux fibres**, le comportement est élastique fragile. « La rupture fragile est caractérisée à la fois par la rupture des fibres et la fissuration par séparation entre fibres. Ceci s'explique par le fait qu'une fissure perpendiculaire à la fibre change de direction pour continuer à se propager à l'interface entre fibres dans la direction du fil. » [14]
- **Pour la compression parallèle aux fibres**, le comportement est élastoplastique. « Dans ce mode de rupture, les fibres du bois subissent un microflambement qui se traduit par l'apparition de bandes de cisaillement dans la pièce. Si le bois est chargé suffisamment longtemps, on peut observer après un plateau en contrainte une remontée de celle-ci. » [14]

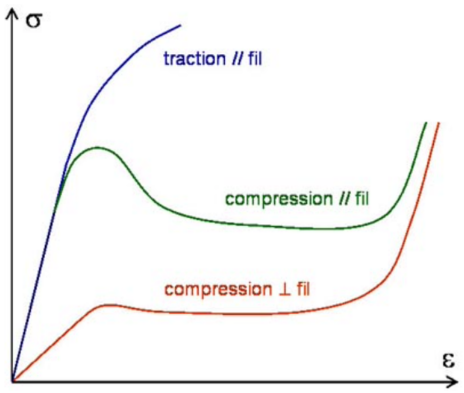


Figure 2.5 – Sollicitation du bois en traction et compression axiale [14]

On observe, sur la Figure 2.5, le comportement d'un élément en bois sans défaut. En effet, en présence de nœuds, la résistance à la traction sera moins performante que la résistance à la compression.

La flexion est le résultat d'un comportement global faisant intervenir des efforts de traction et de compression de part et d'autre de la fibre neutre de l'élément. On peut dès lors en comprendre le comportement. Tout d'abord, au fur et à mesure du chargement, la limite élastique sera atteinte, en compression et en traction. Le bois va ensuite commencer à se plastifier dans la zone en compression. Lorsque l'effort deviendra trop important, la rupture se fera de manière fragile dans la partie en traction. Il est important de noter que ce comportement n'est vrai que pour le cas d'un échantillon parfait. Il est possible que la rupture se fasse directement de manière fragile sans une plastification de la zone en compression.

2.2.2 Élastoplasticité

L'élastoplasticité est le comportement théorique d'un matériau caractérisé par une phase élastique suivi d'une phase plastique. La courbe théorique contrainte-déformation est présentée en Figure 2.6. La partie linéaire ascendante correspond au comportement élastique tandis que la partie constante correspond au comportement plastique.

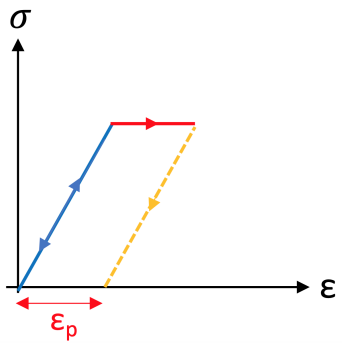


FIGURE 2.6 – Comportement élasto-plastique théorique

Plus précisément, on observe qu'en dessous d'une certaine contrainte, le comportement est considéré comme élastique car la déformation subie est totalement réversible. Autrement dit, le matériau retrouve sa forme initiale après déchargement. Au-delà de cette contrainte, on entre dans la zone de plasticité caractérisée par une déformation permanente et irréversible (ε_p) [31].

2.2.3 Viscoélasticité

Concept

La viscoélasticité permet de définir un matériau, comme le bois, dont le comportement est élastique, c'est-à-dire une déformation réversible directement liée à la charge, couplé avec un comportement visqueux, défini comme dépendant de la vitesse de déformation. Dans ce contexte, la réversibilité n'est plus immédiate mais « retardée » et n'intervient

en théorie qu'après un temps infini [33]. La courbe classique contrainte-déformation est présentée en Figure 2.7.

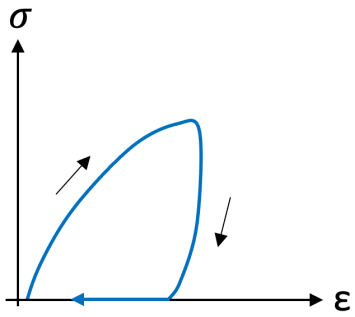
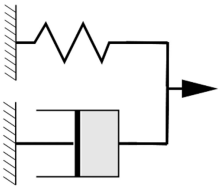


Figure 2.7 – Comportement viscoélastique théorique [33]

Pour représenter ce phénomène en un schéma rhéologique simple, il suffit de coupler, en parallèle ou en série, un ressort et un amortisseur dont la schématisation se trouve respectivement en Figure 2.8a et Figure 2.8b. Le ressort représente le comportement élastique tandis que l'amortisseur le visqueux. Il se déforme en fonction de la vitesse de déformation et est lié à la durée d'application de la force. L'amortisseur a réellement l'esprit d'étendre la déformation dans le temps [19].



(a) Modèle de Kelvin



(b) Modèle de Maxwell

Figure 2.8 – Schémas réhologiques simples représentant la viscoélasticité [55]

Un modèle rhéologique simple qui caractérise correctement le comportement viscoélastique du bois, pour de petites sollicitations, est le modèle dit de Zener [33] dont le schéma se trouve à la Figure 2.9. C'est simplement un modèle de Maxwell mis en parallèle à un ressort.

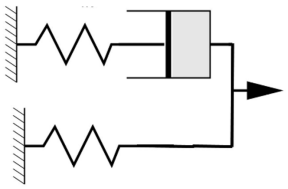


Figure 2.9 – Modèle de Zener [55]

Description mathématique et interprétation pour le bois

Représentons la déformation et la contrainte, temporellement, voir Figure 2.10. On observe un retard de la contrainte sur la déformation dû à l'amortissement visqueux. Il est possible de mettre en équation ce graphe sous la forme :
$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot sin(\delta + \omega \cdot t) = \sigma_0 \cdot cos(\delta) \cdot sin(\omega \cdot t) + \sigma_0 \cdot sin(\delta) \cdot cos(\omega \cdot t)$
$\varepsilon(t) = \epsilon_0 \cdot sin(\omega \cdot t)$

Où ω est la fréquence angulaire, δ est le déphasage, σ_0 est la contrainte initiale et ε_0 est la déformation initiale. Étant donné que nous définissons la déphasage δ à partir de la déformation, cette dernière n'en a pas.

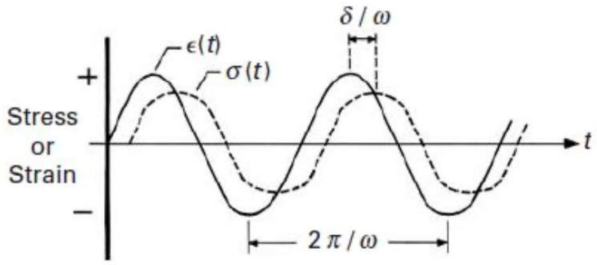


FIGURE 2.10 – Représentation temporelle de la contrainte (« stress ») σ et de la déformation (« strain ») ε [65]

On peut instinctivement comprendre que la partie élastique de ce comportement sera celle qui réagit directement à la déformation, sans aucune latence. Autrement dit, celle en phase avec la déformation, c'est le cas de la partie affectée par le $cos(\delta)$. Quant à la partie visqueuse, créant le décalage, est celle en opposition de phase, qui est exprimée par le $sin(\delta)$. Dès lors, on peut en déduire une contrainte élastique $\sigma_e(t)$ et une visqueuse $\sigma_d(t)$ [1] :

$\sigma_e(t) = \sigma_0 \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega \cdot t)$
$\sigma_d(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(\omega \cdot t)$

Pour interpréter plus facilement ceci, définissons, à l'instar de celui de Young pour la loi de Hooke ($\sigma = E \cdot \varepsilon$), deux modules : le module de stockage E' et le module de perte E''. Il est apprécié d'utiliser un taux de comparaison $tan(\delta)$ pour comparer ces deux modules. Il est occasionnellement appelé « facteur d'amortissement » [29], démontrant un aspect de dissipation d'énergie. En effet, le phénomène peut se représenter comme un ressort qui va dans un premier temps absorber et conserver toute l'énergie fournie au système. Ensuite l'amortisseur va au fur et à mesure dissiper cette énergie.

1. L'indice « d » correspond à « damping » signifiant, en anglais, amortissement, c'est-à-dire le côté visqueux du système.

$$E' = \frac{\sigma_{e0}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos(\delta)$$
$$E'' = \frac{\sigma_{d0}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin(\delta)$$
$$\hookrightarrow \tan(\delta) = \frac{E''}{E'}$$

Le module de stockage E' exprime la capacité du système à stocker de l'énergie de manière réversible tandis que le module de perte E'' donne sa propension à la dissiper.

En appliquant ces concepts au bois, on peut interpréter le module de stockage E' comme la mesure de la quantité de fibres présente dans l'élément de bois. Les fibres sont en réalité les ressorts dans le système simplifié de la Figure 2.9. Tandis que le module de perte E'' est la mesure des pertes, des frottements internes provoqués par la matrice entourant les fibres. Pour l'exprimer d'une autre façon, il s'agit de la capacité du bois à dissiper l'énergie accumulée dans la déformation des fibres, c'est-à-dire sa capacité à se relaxer [19]. Il s'agit de l'amortisseur dans la Figure 2.9. La Figure 2.11 donne une représentation d'un élément de bois approximé en un amortisseur dans la matrice et des ressorts dans les fibres.

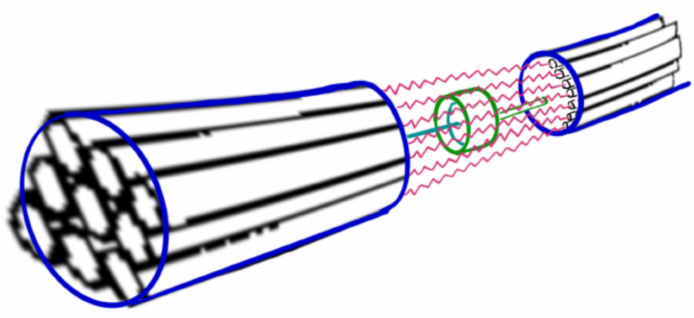


Figure 2.11 – Représentation du bois en éléments simples pour exprimer le comportement viscoélastique (Image inspirée de [57])

Influence de la fréquence d'application de la charge

En toute logique, puisque la viscoélasticité résulte d'une temporalité, la fréquence d'application des charges influe sur son comportement [58, 50, 34, 27, 42, 29, 32]. Une interprétation intéressante a été faite par Jiang et al. [32] : « Le module d'élasticité augmente avec la fréquence pour tous matériaux viscoélastiques solides. Augmenter la fréquence du test signifie que la force oscillante devrait être rapide, ce qui résulterait en une friction interne relativement petite parce que le mouvement des chaînes de molécules de bois est plus petite que le changement de la force extérieure ». Cela coule de sens. En effet, la viscosité décrit la capacité à dissiper de l'énergie, les frottements sont le meilleur moyen et ils sont directement liés au mouvement expérimenté.

Influence de l'humidité

L'humidité est également un paramètre de forte influence pour le comportement viscoélastique. Cette idée se ressent assez instinctivement, plus on remplit un piston hydraulique d'un liquide plus on attend un amortissement important. C'est le même principe pour le bois. Il aura une plus grande propension à dissiper de l'énergie lorsque sa teneur en eau est grande. Autrement dit, il pourra plus facilement se relaxer, redistribuer les contraintes sur toute sa section. Sur le moment même de l'application de la charge, le comportement est semblable quel que soit l'humidité. Cependant, au cours du temps, le bois humide aura plus de capacité à se déformer, à s'adapter à la charge appliquée afin de pouvoir accepter une nouvelle déformation. En d'autres mots, le bois sec n'est pas moins performant dans un calcul à court terme, il se déformera de la même façon et fournira la même résistance, mais il offrira moins de flexibilité sur le long terme. Il ne pourra s'adapter au mieux pour accepter une nouvelle charge [58, 50, 41, 34, 27, 29, 32, 62]. Il est donc important de mesurer l'humidité des éléments pour pouvoir interpréter correctement les résultats.

2.3 Facteurs influençant les propriétés mécaniques du bois

2.3.1 Humidité

Concept

Le bois est une substance hygroscopique, c'est-à-dire qu'il est capable d'échanger de l'humidité avec l'air ambiant afin d'atteindre un équilibre. La teneur en eau ou taux d'hygroscopie du bois est défini comme le rapport en pourcentage de la masse d'eau contenue dans le bois humide m_{eau} et la masse de bois à l'état sec $m_{bois\ sec}$ [39, 35, 24, 57, 30] :

$$w = \frac{m_{\text{eau}}}{m_{\text{bois sec}}} = \frac{m_{\text{bois humide}} - m_{\text{bois sec}}}{m_{\text{bois sec}}}$$

Cette teneur en eau peut être particulièrement élevée dans le cas de troncs d'arbre. Au moment de l'abattage, ce paramètre atteint facilement, pour des résineux, $w = 150\%$ [39]. Autrement dit, la masse d'eau contenue dans le bois est une fois et demi plus importante que la masse de bois sec. Sachant que le bois à l'extérieur se met en œuvre habituellement à une teneur en eau de $w = 16\%$ [39], on se rend compte de l'influence que peut avoir l'humidité sur les troncs. Une question se pose alors : doit-on réaliser les essais sur du bois sec ou à l'état vert ? Pour répondre à cette question, il est utile de définir les différents types d'eau présents dans le bois [39]. Ils sont au nombre de trois :

1. **L'eau libre** est l'eau contenue à l'intérieur des pores, au-delà du point de saturation des fibres. Le « Fiber Saturation Point (FSP) » [35, 24, 57, 46, 23] est la teneur en eau maximale que les fibres peuvent garder en elle. Par conséquent,

toute eau supplémentaire est non liée. Elle est libre de partir et venir en fonction de l'humidité environnante ;

2. **L'eau liée** est l'eau gardée dans les fibres. Cette eau varie avec les changements d'humidité dans le milieu mais beaucoup plus difficilement que l'eau libre. Il est possible de l'extraire par séchage sans pour autant altérer la nature du bois ;
3. **L'eau de constitution** est l'eau chimiquement liée et formant concrètement la nature du bois. On ne peut l'extraire sans modifier le matériau.

La Figure 2.12 reprend ces différents éléments.

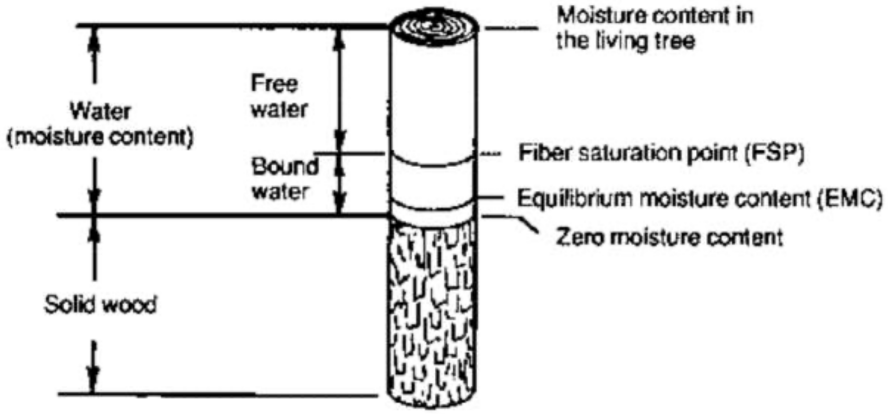


Figure 2.12 – Représentation de la teneur en eau dans le bois [57]

Influence sur les propriétés mécaniques

Lorsque la teneur en eau dépasse le FSP, les propriétés mécaniques telles que le module de Young et la résistance en flexion ne varient que très peu [25, 35, 23, 46]. En sachant cela, il est d'ores et déjà possible de conclure qu'il ne sert à rien de procéder à un séchage s'il n'y a aucune ambition d'atteindre une humidité inférieure au FSP. On trouve dans la littérature un ordre de grandeur du FSP d'environ w=25% [25].

On peut remarquer dans ces mêmes études que les propriétés mécaniques peuvent fortement varier avec l'humidité, voir Figure 2.13. En effet, le tableau montre que les valeurs peuvent passer du simple au double lors du passage d'une teneur en eau supérieure à FSP à une de 12%. Cette étude est intéressante car les essais ont été réalisés sur une large population d'échantillons de petite taille permettant de caractériser un matériaux bois présentant peu de défauts et d'isoler l'influence de l'humidité. D'autres observations sont également possibles à travers ces différentes études, les caractéristiques mécaniques sont disparates et par conséquent très difficiles à prévoir. La Figure 2.13 montre que les valeurs à 12% de la teneur en eau sont 20 à 50% supérieures à celles au-delà du FSP pour le module de Young et elles sont 30 à 120% plus importantes pour la résistance à la flexion. Cette constatation se confirme en lisant les documents de Korkmaz et

Büyüksari [35], Gerhards [23] et Ritter et Michael A [57] ainsi que de Larson et al. [38] et Wolfe et Moseley [64].

Property	EMC (%)	N	X (MPa)	SD (MPa)	SE (MPa)	X_{min} (MPa)	X_{max} (MPa)	C_v (%)
Bending strength	8	100	89.3^{A}	25.4	2.5	42.8	157.9	28.4
	12	311	70.0^{B}	16.6	0.9	20.8	118.5	23.7
	16	100	63.0^{C}	15.3	1.5	23.4	100.7	24.3
	20	100	53.7^{D}	12.8	1.3	27.3	87.2	23.8
	> FSP	99	35.7^{E}	8.0	0.8	19.9	59.7	22.6
MOE	8	100	3537.9^{A}	1063.9	106.4	1737.6	6368.7	30.1
	12	311	2683.4^{B}	730.3	41.4	838.0	5120.0	27.2
	16	100	2651.1^{B}	788.7	78.9	985.0	4429.3	29.7
	20	100	2323.2^{C}	722.7	72.3	884.1	4310.9	31.1
	> FSP	99	1748.1^{D}	543.1	54.6	628.4	3373.3	31.1

N: number of specimens, X: average, SD: standard deviation, SE: standard error, X_{min}: minimum value, X_{max}: maximum value, C_V: coefficient of variation. Groups with identical capital letters in a column indicate that there is no statistical difference ($p < 0.05$) between the samples according to Duncan's multiple range test.

Figure 2.13 – Statistiques sur la résistance à la flexion et le module d'Young en fonction de l'humidité [35]

Interprétation pour les grumes

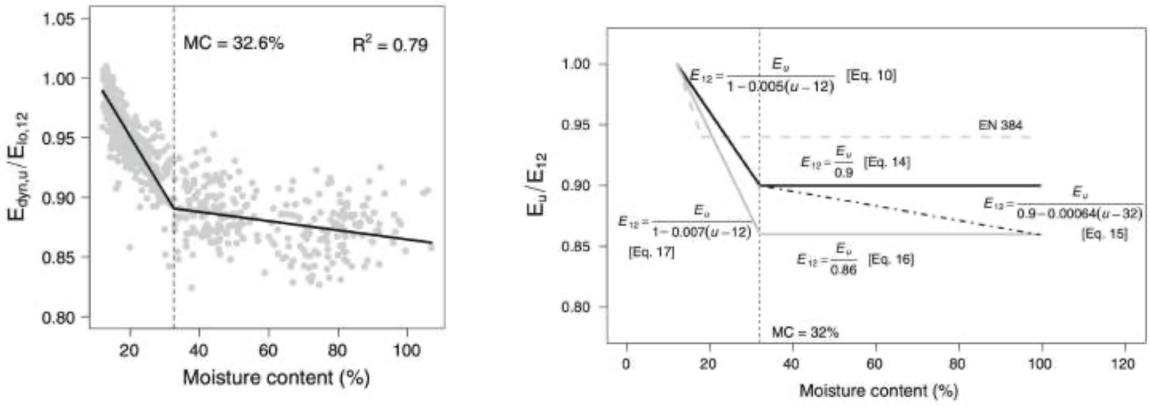
Malgré une grande variété de valeurs, il est certain que les grumes sèches seront sensiblement plus résistantes que les humides [35, 23, 46]. La question du séchage reste alors pertinente. En effet, d'un côté, si on souhaite une mesure précise des capacités mécaniques de l'élément de bois, il vaudrait mieux le tester dans les conditions d'emploi. Cependant, d'un autre côté, comme le module de Young et la résistance sont plus faibles lorsque le bois est au-delà du FSP, on sait que si on procède aux essais dans ces conditions, le résultat sera sécuritaire. Effectivement, on sous-estime la résistance et on surestime les déformations que la structure subira en service.

Plusieurs auteurs [46, 24], malgré la disparité des résultats, ont réalisé des corrélations. Nocetti et al. [46] présentent des graphiques, Figure 2.14, particulièrement intéressants permettant d'imager les concepts étudiés précédemment et montrent ce que pourrait donner ces corrélations. On observe une variation négligeable des propriétés mécaniques pour une teneur en eau supérieure au FSP.

2.3.2 Séchage

Concept

Le séchage est une étape indispensable pour pouvoir mettre un élément de bois en œuvre. Deux possibilités de séchage sont possibles, soit par voie naturelle, soit artificielle. La



(a) Mesures du module de Young en fonction de la teneur en eau

(b) Corrélation du module de Young en fonction la teneur en eau

FIGURE 2.14 – Relations entre le module de Young et l'humidité [46]

première consiste à entreposer les éléments de bois dans un environnement sec durant un laps de temps suffisamment long, généralement plusieurs mois, pour obtenir une teneur en eau souhaitée. La seconde se passe via l'utilisation d'un séchoir, à four ou à air chaud, permettant un contrôle précis des conditions de température, d'humidité et de pression [53].

Lors du séchage, le taux d'humidité du bois varie ce qui implique des variations dimensionnelles de l'élément et peut donc mener à des fissures. Comme visible à la Figure 2.15, il existe trois types de fissures au sein du bois : la rupture intercellulaire, la rupture intra-membranaire et la rupture transmembranaire. Par leur nature, elles sont peu remarquables depuis l'extérieur du bois et d'autant plus dangereuses. La formation de ces fissures est principalement influencée par le programme de séchage, c'est-à-dire les températures et humidités imposées et la durée de celui-ci.

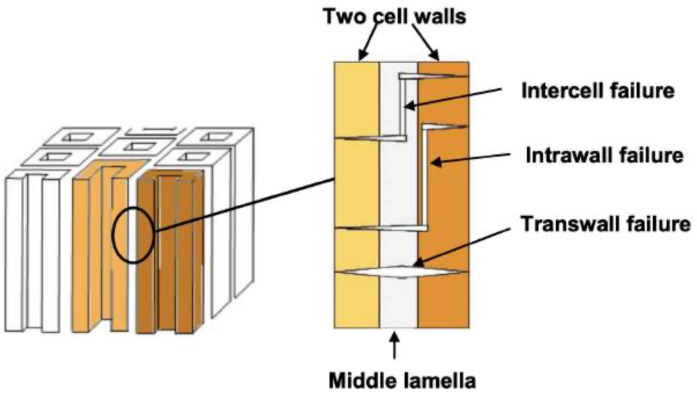


FIGURE 2.15 – Les différents types de fissures internes au sein du bois [47]

Influence sur les propriétés mécaniques

La formation de fissures peut mener à des diminutions des propriétés mécaniques de l'élément. Cependant, ces diminutions sont très variables d'une espèce de bois à l'autre. Concernant les températures de séchage, plus elles sont importantes, plus le gradient hydraulique est important causant alors des contraintes internes majeures menant à des fissures internes et à une humidité non-uniforme dans la section du bois. Le tableau dans l'Annexe A indique les réductions des propriétés mécaniques pour un très grand nombre d'essences en fonction de la température imposée lors du séchage. Ce tableau renvoie chaque fois à l'étude qui a déterminé ces résultats. On observe que pour l'épicéa il n'y a pas de diminution du module d'Young pour des températures de séchage jusque 200°C. En revanche, la résistance en flexion peut diminuer jusque de moitié pour les mêmes températures. Concernant la teneur en humidité, il est recommandé d'effectuer un séchage en condition humide.

Dans une vue globale de la matière, il est préférable d'utiliser des programmes de séchage conservatoires, c'est-à-dire avec des températures pas trop importantes (aux alentours de 50°C et avec des taux de séchages bas). Ils réduisent le risque de fissures fournissant alors de meilleurs résultats au niveau de la résistance [47]. Cependant, ce n'est pas toujours ce qui est le plus rentable. Il est possible de faire un compromis entre l'aspect économique et de performance, il est tout à fait envisageable de perdre 5 à 10% d'efficacité en résistance de flexion pour gagner un temps considérable. Voici des ordres de grandeurs : Pour un séchage naturel, il faut compter facilement de 6 mois à un an [38, 64, 45]. Pour les séchages artificiels « classiques », cela peut durer de quelques jours à quelques semaines [54].

Interprétation pour les grumes

Le séchage du bois n'est pas un point de matière parfaitement déterminé, les différents papiers vont dans un ou l'autre sens selon une multitude de paramètres. Le document de Ranta-Maunus [54] est marquant par son exhaustivité au sujet des grumes. Cependant les techniques de séchage proposées doivent être selon nous prises avec du recul. En effet, il y est recommandé de commencer par un séchage agressif jusqu'au FSP. Dans le document, l'agressivité est tout à fait relative car elle se limite à 110°C. Ceci est sûrement viable étant donné que seul l'eau libre peut quitter le bois avec des gradients hydrauliques importants. Il propose de faire cette technique pour créer une multitude de microfissures. Cette idée peut paraître bonne. Elle fonctionne dans le même principe que le béton armé, on préfère beaucoup de microfissures à une importante. Cependant, au vu des résultats énoncés plus haut, l'impact pourrait être conséquent sur les propriétés mécaniques. Il faut aussi garder à l'esprit que lors de cette étude, les extrémités des grumes ont été étanchées, étudiant ainsi seulement le séchage par la « peau » de l'élément. Or, les extrémités sont un lieu de naissance de fissures et de défauts lors du séchage [47]. De plus, elles sont une ouverture des fibres laissant facilement l'eau quitter le bois.

2.3.3 Fente de pré-retrait

Il est courant de pratiquer une fente de pré-retrait, c'est-à-dire une coupe le long de la grume afin d'éviter les fissures aléatoires lors du séchage. Comme l'indique la plus grande importance du coefficient de retrait ou gonflement tangentiel vis à vis du radial, la variation dimensionnelle est plus importante dans la direction tangentielle que dans la radiale [24, 39, 36]. Dès lors, durant le séchage, le bois voudra se rétrécir tangentiellement plus qu'il ne le pourra jusqu'au point de se fissurer. Pour éviter que les fissures ne se passent de manière impromptue, on peut « pré-fissurer » en entaillant le bois sur une profondeur pouvant varier de 30 à 50% du diamètre de la grume. Une schématisation d'une grume avec et sans fente de pré-retrait est présenté en Figure 2.16.

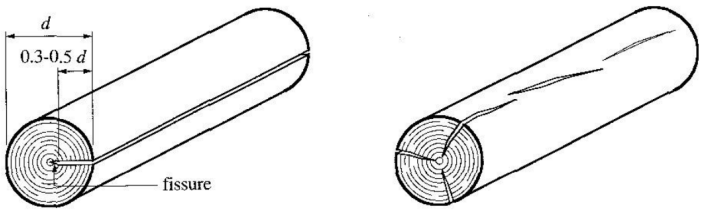


Figure 2.16 – Schématisation d'une grume avec et sans fente de pré-retrait [39]

D'après plusieurs sources [38, 36], l'impact ne se fait pas, ou presque pas, ressentir sur les propriétés mécaniques. En effet, l'inertie est une caractéristique clé dans la performance de résistance d'une section, et celle-ci n'est que peu perturbée par une fine entaille. De plus, l'entaille permet également de faciliter l'inspection du bois et de limiter la décomposition interne de celui-ci [26].

Dans le cadre de ce travail, nous décidons de réaliser une fente de pré-retrait. L'impact sur les propriétés mécaniques du bois n'est pas grand et ceci permet de s'aligner à un futur processus industrialisé. En effet, éviter une fissuration sauvage est primordial pour travailler avec des troncs d'arbre.

2.3.4 Écorçage à la main et fraisage

Lorsqu'un arbre est abattu, un écorçage rapide du bois est nécessaire afin d'éviter les attaques d'insectes présents dans l'écorce. Deux techniques d'écorçage, le plus souvent complémentaires, sont possibles.

- **L'écorçage à la main**, souvent réalisé en forêt à l'aide d'une plane de charron, a pour objectif d'enlever l'écorce externe. Les grumes écorcées sont appelées « spécimens effilés » car la grume conserve son effilage naturel sur toute la longueur [37] ;
- **Le fraisage** est une technique d'écorçage réalisée par machine. Elle se fait à l'aide d'un outil de coupe en rotation qui enlève la matière par copeaux. Les grumes traitées par fraisage sont appelées « spécimens uniformes » pour indiquer que

leur diamètre est constant sur toute la section [37]. Le fraisage du bois se fait habituellement à l'état vert pour des conditions de facilité d'usinage [17].

Ces deux techniques n'ont pas les mêmes influences sur les propriétés mécaniques de la grume. Le travail de Larson et al. [37] discute de ces influences sur des *pins ponderosa*, appelés aussi « pin jaune ». Ils observent une perte de 20% de la contrainte à la rupture et de 10% du module d'Young entre des éléments écorcés à la main et des éléments fraisés. Ceci peut se comprendre intuitivement. D'une part, l'intégrité des fibres du bois est dégradée pour le fraisage, ce qui n'est pas le cas de l'écorçage à la main. D'autre part, les grumes fraisées sont privées d'une partie de leur bois mature extérieur ce qui entraîne une diminution de ces propriétés. En effet, plus la quantité de bois juvénile augmente dans la section, plus les caractéristiques mécaniques diminuent. De plus, il est également observé que l'on passe d'un comportement plutôt ductile à la rupture à des ruptures plutôt fragiles.

Cette problématique de la diminution des propriétés mécaniques due au fraisage nécessite une attention particulière dans la philosophie dans laquelle s'inscrit le mémoire, c'est-à-dire dans l'idée d'optimiser la matière de bois dans son état le plus brut. Cependant, le travail consiste à développer un protocole d'essai afin de caractériser les grumes pour que l'on puisse les utiliser dans leur forme la plus simple. L'optimisation de chaque paramètre tel que la perte de fibres due à l'écorçage automatique ne relève pas de l'objectif du mémoire. En effet, le protocole devra aussi bien caractériser individuellement chaque grume peu importe la qualité de son écorçage.

À retenir

Concrètement pour les grumes :

- Souhait de travailler avec des grumes dont la teneur en humidité est au dessus du FSP. Aucun séchage n'est alors nécessaire. Ce choix est sécuritaire vu que le bois mis en oeuvre à une humidité plus faible sera plus performant ;
- Réalisation d'une fente de pré-retrait. L'impact sur les propriétés mécaniques du bois n'est pas important et ceci permet de s'aligner à un futur processus industrialisé ;
- Écorçage des grumes à la main. Le fraisage n'apporte aucune plus-value dans le cadre de ce travail.

2.4 Essais mécaniques sur grumes - *Proof-testing*

À ce jour, il existe peu de documentation concernant des essais mécaniques dont l'objectif est de déterminer les propriétés mécaniques de grumes. La source la plus intéressante et convaincante concerne un essai mécanique de flexion 3 points sur grume proposé par l'entreprise *TTT Products*, en Nouvelle-Zélande [59]. Leur banc d'essai est présenté en Figure 2.17, avec la charge qui est appliquée vers le haut par l'appui central de gauche.



Figure 2.17 – Banc de flexion 3 points [59]

La méthode utilisée par l'entreprise est du *proof-testing*. Le principe est d'appliquer une contrainte de même niveau que la « résistance requise » [67]. Dans ce cas-ci, la « résistance requise » caractéristique en flexion est de 52 MPa. En effet, l'entreprise propose des grumes de haute résistance, définies par la norme néo-zélandaise NZS 3605 [4] comme des éléments ayant une résistance caractéristique en flexion supérieure à 52 MPa et une densité minimale de 450 kg/m^3.

Peu d'informations sont fournies quant aux paramètres utilisés pour réaliser ces essais.On sait simplement que, dans ce cas, le test consiste en un chargement de flexion trois points, à l'aide d'un vérin hydraulique, pour atteindre la résistance ciblée en 3 minutes et 30 secondes, et au maintien de ce chargement pendant 15 secondes sans que le poteau ne présente de signe de détresse [59]. Malheureusement, « signe de détresse » n'est pas défini ce qui est évidemment tout l'objectif de cette recherche.

Malgré le manque d'informations concernant ce protocole d'essai, cette application industrielle renforce l'idée qu'un essai mécanique non destructif sur grumes est possible et que l'utilisation de tels éléments dans la construction d'ouvrages de plus en plus variés n'est plus qu'une question de temps.

2.5 Utilisation des grumes dans la construction

2.5.1 Fondations

Les grumes, à la manière de pieux, peuvent être utilisées comme fondations comme le présente la Figure 2.18. Cette technique est d'ailleurs bien plus ancienne que les pieux en acier ou en béton [22], largement utilisés à l'heure actuelle dans le domaine du génie civil.

La mise en oeuvre des pieux bois se réalise par battage, c'est-à-dire qu'un grand marteau frappe les pieux pour les enfoncer dans le sol. Les pieux en bois sont équipés d'un « casque de battage » afin de limiter sa fissuration. Le comportement des pieux en bois selon la nature du sol est discuté par Gardet et al. [22].



Figure 2.18 – Pieux en bois pour fondation [59]

2.5.2 Planchers et murs

Des planchers et murs en grumes peuvent être mis en oeuvre dans certains ouvrages en bois comme le montre la Figure 2.19.



Figure 2.19 – Plancher en grumes [59]

2.5.3 Constructions diverses

Les grumes peuvent être utilisées dans de nombreuses applications structurales comme les systèmes de poteaux-poutres,treillis, arcs, etc.

Parking *Pairi Daiza*

Ce projet, situé en Belgique, est le plus grand parking photovoltaïque au monde. Les 62750 panneaux solaires permettent au zoo *Pairi Daiza* de couvrir bien plus que sa consommation en électricité [56].



Figure 2.20 – Carport de Pairi Daiza [51]

Projets de *WholeTrees Structures*

Le projet présenté en Figure 2.21a est le *Crosse Riverside Park Bandshell* et se situe aux États-Unis. Ce projet met en oeuvre des poutres et colonnes en chêne massif ainsi que des chevrons en pin rouge.

La Figure 2.21b montre le *Skamania Lodge Riverview Pavilion*, lui aussi situé aux États-Unis. Ce pavillon permet de couvrir un espace de 232 m^2.



(a) *Crosse Riverside Park Bandshell*



(b) *Skamania Lodge Riverview Pavilion*

Figure 2.21 – Projets de *WholeTrees Structure* [63]

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

La philosophie du protocole d'essai a été expliquée dans l'introduction. Bien entendu, ces idées ne sont pas d'emblée apparues. Elles sont le fruit d'une longue réflexion basée sur des recherches documentaires comme vu dans le Chapitre 2 ainsi que sur de la recherche expérimentale. En effet, une quantité importante d'essais a été réalisée afin de caractériser le matériau bois soumis à de la flexion 4 points et de déterminer l'impact des paramètres du protocole. La discussion des résultats se trouvent aux Points 4.2 (page 53) et 6 (page 86), respectivement pour les éprouvettes équarries et les grumes. Un des sujets de discussion est notamment la pertinence d'un chargement cyclique. Pour rappel, dans l'introduction, il est question d'un protocole procédant à plusieurs chargements. Dans ce travail, il est entendu par chargement cyclique, tout processus impliquant plusieurs charges et décharges d'un même élément. Une partie conséquente des analyses faites n'ont de sens que pour des chargements cycliques comme expliqué dans la suite du présent chapitre.

Il explique la méthode de traitement des données suivie. Il débute par une explication du calcul de rigidité, enchaîne avec la lecture des graphes, pour enfin expliquer les mesures analysées. Les explications sont ici générales et théoriques, ses applications seront faites dans les annexes (Annexes F, p. 126 et G p. 176, dont les détails sont aux Annexes M p. 268 et N p. 628).

Il convient avant toute chose d'indiquer que nos résultats ne pourront en aucun cas être pris quantitativement. Ils n'ont que l'humble ambition de relever des tendances dans le comportement du bois. L'analyse est alors qualitative.

Pour espérer tirer des conclusions quantitatives, il est nécessaire d'effectuer un large nombre de batteries d'essais quantifiant chacune, à l'aide d'une pléthore d'essais, l'influence d'un paramètre. Tout en sachant que de telles données ne seraient pas exportables à d'autres essences ou d'autres régions que celle dont il est question. Il aurait été impossible de réaliser une telle tâche dans le cadre de ce travail par manque de matériel nécessaire, de disponibilité, ou encore d'expertise. De surcroît, étant donné l'ampleur d'une telle étude, il est nécessaire de les prévoir sur un laps de temps conséquent.

3.1 Calcul des rigidités

Pour les calculs de rigidité, la norme NBN EN 408+A1 [10] a servi de référence. Dans les grandes lignes, cette méthode prend la pente de la courbe force-déplacement entre 10 et 40% de la force de rupture, F_{rupt}. Elle fait l'approximation de cette pente avec une corrélation de 99%. En d'autres mots, la norme prend la droite ayant une pente corrélée à 99% avec celle réellement mesurée lors de l'essai. Cette pente est la base du calcul du module de Young. Ces bornes sont représentées sur la Figure 3.1.

Soucieux de s'approcher d'une méthode envisageable lors de l'exécution en temps réel sur les grumes, on est parti du postulat que la force de rupture est inconnue. Il est nécessaire de calculer la rigidité de chaque cycle afin de connaître son évolution. Il a été possible d'adapter la méthode recommandée par la norme. Les différences majeures

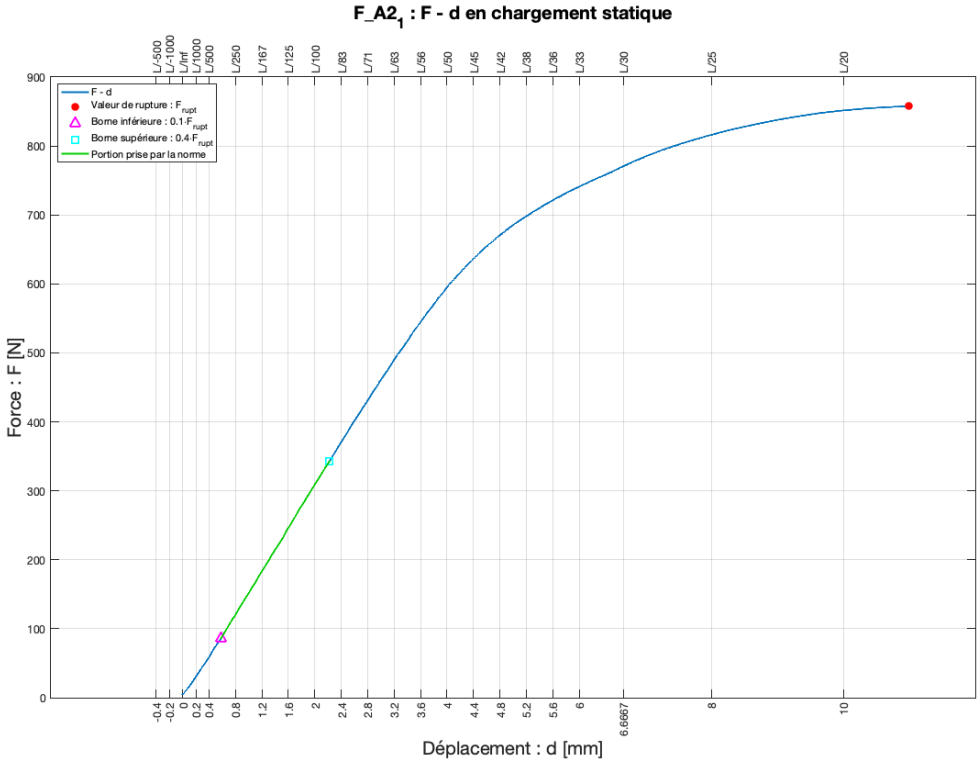


FIGURE 3.1 – Représentation des bornes minimale et maximale prise par la norme NBN EN 408+A1[10] pour déterminer le module de Young

sont le remplacement de la force de rupture par une autre et le choix de la plage du calcul de la pente. La force prise est la maximale du cycle étudié. La plage a été étendue de 10 à 70%. Ceci permet d'avoir plus de valeurs et de trouver plus facilement une corrélation suffisante. Elle ne va pas jusqu'à 100% car plus on est proche de $F_{\max}$, moins le comportement est linéaire. Comme en témoigne la Figure 3.1, la fin de la courbe s'aplatit et perturberait les données. Bien entendu, les premiers cycles seront majoritairement linéaires, si on suit une logique élastoplastique. Cependant, ce ne sera pas le cas des derniers. Il est préféré de garder la même fonction pour l'ensemble des cycles et des batteries. L'implémentation de ces deux approches se trouve à l'Annexe C.2.

La Figure 3.2 compare les deux versions. Il est remarquable qu'elles soient très semblables. Pour rappel, l'avantage de la méthode modifiée est qu'il n'est pas nécessaire de disposer de la force de rupture. De plus, comme en témoigne la variabilité des triangles rouges jusqu'au 5e cycle, il est difficile pour la norme de calculer un module de Young si les déplacements sont trop faibles. Visiblement, la modification semble être pertinente.

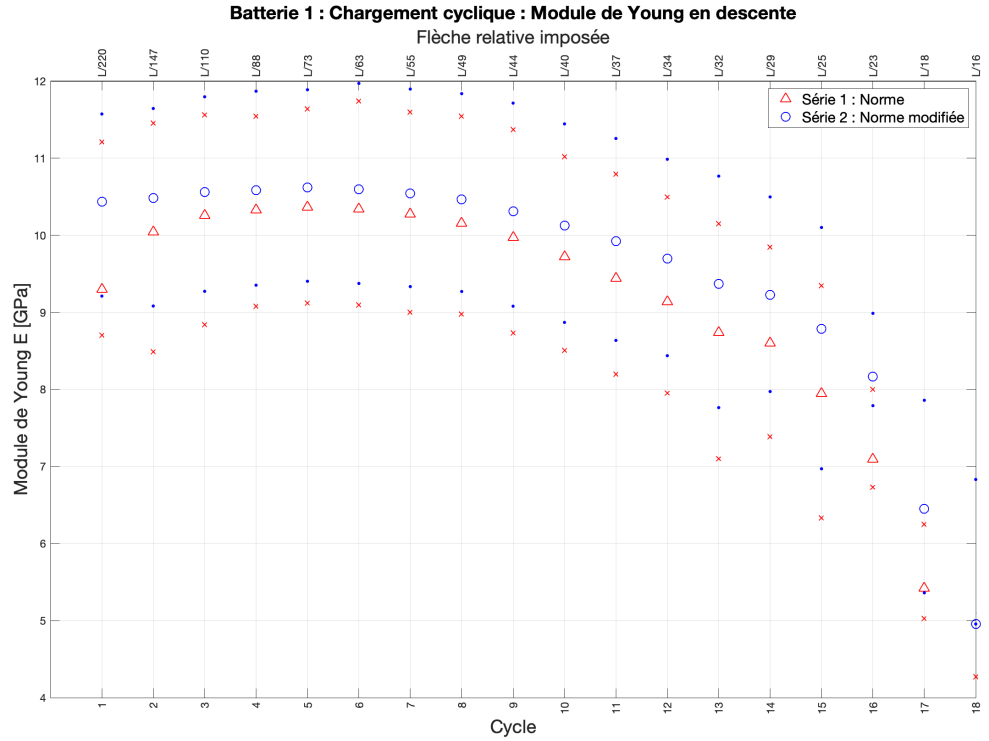


Figure 3.2 – Comparaison des modules de Young par cycle calculé par la norme NBN EN 408 + A1 [10] (triangles rouges) et sa version modifiée (ronds bleus). Valeurs moyennes en descente prises sur la batterie 1.

3.2 Lecture des graphes

La Figure 3.2 permet également d'introduire la lecture des graphiques montrés dans l'analyse des essais (Annexes F, p. 126 et G p. 176). La grande majorité se présente de manière semblable bien qu'ils afficheront des mesures différentes. La forme se compose comme suit :

- **Titre** : Il indique le numéro de la batterie, le paramètre qu'elle étudie et la mesure représentée sur le graphe. Par exemple : « Batterie 3 : Délai entre 2 cycles : E » signifie que nous regardons les modules de Young, E, mesurés lors de la troisième batterie qui étudie l'influence d'un délai entre deux cycles ;
- **Axes des ordonnées** : L'axe de gauche donne la valeur directe, celui de droite donne une valeur dérivée. Par exemple, à gauche, nous aurions les valeurs de E tandis qu'à droite nous aurions les valeurs de E normalisées : $\frac{E_i}{E_1}$;
- **Axes des abscisses** : L'axe du bas affichera systématiquement le numéro des cycles. Celui du haut donnera le déplacement imposé à mi-travée lors du cycle correspondant. Ce déplacement est donné sous forme de la flèche relative. En principe, il ne s'agit que de valeurs données dans le Tableau 4.2. Cependant,

comme nous pouvons le voir à la Figure 3.2, elles ne correspondent pas toujours. En effet, les déplacements imposés au vérin sont sur sa traverse qui s'appuie au tiers de la longueur de l'éprouvette. Dès lors, les déplacements à mi-travée seront plus importants que ceux concrètement commandés au vérin (voir Point 4.1.1 ; p. 46) ;

- **Légende** : Elle joue parfois à cache-cache mais il y en aura toujours une. Effectivement, elle ne sera pas toujours exactement au même endroit pour éviter de masquer des données. Soit elle sera très succincte car le graphe montre la comparaison entre les deux valeurs du paramètre étudié par la batterie, soit elle sera plus importante car une approche comparative n'a pas de raison d'être. Dans le second cas, les valeurs seront affichées dans la légende ;
- **En moyenne** : Tous les résultats seront exprimés par la moyenne obtenue sur l'ensemble des éprouvettes testées avec des paramètres identiques. Cette moyenne sera systématiquement faite pour chaque cycle. Comme représentées à la Figure 3.2, elles seront toutes accompagnées de deux petites marques indiquant les extremums. Ces moyennes ont été calculées par l'approche statistique de la norme NBN EN 14358 [11]. La méthodologie et son implémentation sont expliquées dans l'Annexe B. Les valeurs caractéristiques (« percentile 5% ») seront également calculées conformément à cette norme.

3.3 Mesures analysées

Il est maintenant temps de définir les mesures étudiées. Elles sont au nombre de cinq : le comportement global et ses valeurs à la rupture, le déplacement résiduel, la rigidité, la force maximale et la fonction S.

3.3.1 Comportement global et valeurs à la rupture

Un graphe montrant le comportement global des éprouvettes sera systématiquement analysé. Il permet de donner une vue d'ensemble sur ce que l'éprouvette a subi. De plus, il offre la possibilité de visualiser les caractéristiques mises en valeurs par les mesures expliquées par la suite.

Il sera accompagné d'un tableau donnant les valeurs à la rupture du déplacement, de la flèche relative, de la force, de la contrainte (si possible) et des modules de Young, ou le cas échéant de la rigidité flexionnelle.

Naturellement, seule cette mesure sera réalisée pour les essais en chargement statique.

3.3.2 Déplacement résiduel

Le déplacement résiduel est la différence entre le déplacement mesuré à la fin du cycle i et celui pris à la fin du premier cycle. Mathématiquement, cela donne ceci : $d_{résiduel,i} =$

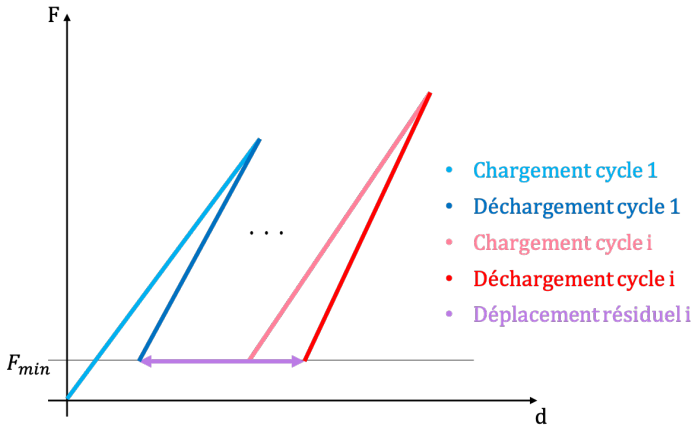


Figure 3.3 – Schéma montrant la détermination du déplacement résiduel du cycle i

$d_i - d_1$. La soustraction de d_1 à d_i permet l'obtention de résultats comparables entre les différentes éprouvettes testées. De plus, il omet le pied de courbe présent au début de chaque essai, c'est-à-dire lors du premier chargement. Il est habituellement compté comme un chargement de placement. La Figure 3.3 donne une explication graphique.

3.3.3 Rigidité

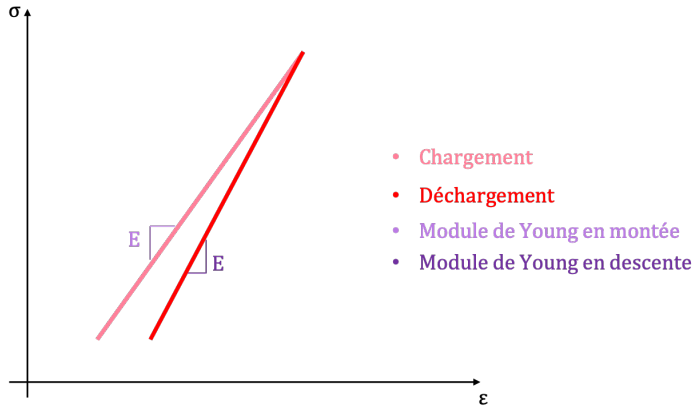


Figure 3.4 – Schéma montrant où sont pris les modules de Young en montée (chargement) et en descente (déchargement)

La rigidité représente la pente de nos courbes. Elle sera exprimée via les modules de Young, *stricto sensu* ils sont la pente de la courbe dans le plan σ-ε (contrainte-déformation). Dès lors, ils ne sont pas directement mesurables « à la main » sur les courbes montrées dans la suite du travail. Le calcul a été présenté précédemment (Point 3.1). Les modules de Young peuvent être pris soit durant le chargement, soit pendant le déchargement, visibles sur la Figure 3.4. Ils sont légèrement différents étant donné que les pentes varient quelque peu. Ceci se ressent de manière évidente. En effet, les modules en

« montée » (chargement) et en « descente » (déchargement) d'un cycle ont tous deux le même point maximal, tandis que leur point minimal est différent [1]. Forcément, la pente doit être différente.

Ce point s'applique également à la rigidité flexionnelle (EI).

3.3.4 Force maximale

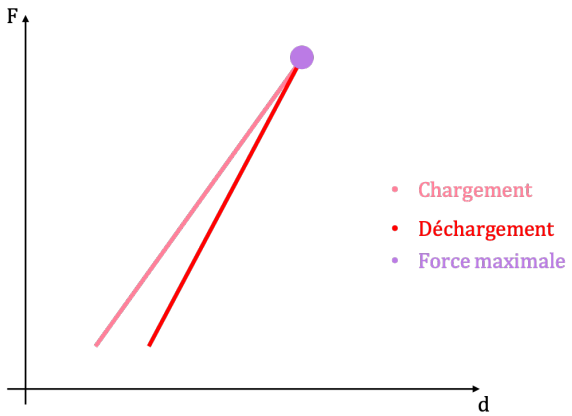


FIGURE 3.5 – Schéma montrant où se trouve la force maximale d'un cycle

La force maximale est la plus grande force mesurée sur un cycle de chargement-déchargement.

3.3.5 La Fonction S ou S

La fonction S est la somme des différences de déplacement pour un niveau de force identique. Elle résulte de la sommation des n soustractions du déplacement $(d_{i,j})$ mesuré sur le cycle i au niveau de la force F_j, avec le déplacement $(d_{i-1,j})$, mesuré sur le cycle $i-1$ pour le même niveau de force, multipliées par un incrément de force $\mathrm{d}F$, le tout étant divisé par la plage de force sur laquelle la sommation a été réalisée $(F_b - F_a)$. L'incrément $\mathrm{d}F$ a été pris comme le double du pas de force moyen. La fonction S se calcule sur la plage de force commune aux deux cycles. En bref, la fonction S est la moyenne des différences de déplacement entre deux cycles. L'équation suivante traduit cette phrase complexe :

$$S = \frac{1}{F_b - F_a} \sum_{j}^{n} (d_{i,j} - d_{i-1,j}) \cdot \mathrm{d}F$$

Le calcul de cette fonction se fait soit sur les chargements des cycles i et $i-1$ (en « montée »), soit sur leur déchargement (en « descente »). L'objectif est de comprendre

1. Si on part du postulat que le déplacement résiduel augmente entre chaque cycle. Cette hypothèse n'est pas vraie dans tous les cas. Cependant, ceci permet de visualiser l'intérêt de considérer les deux modules.

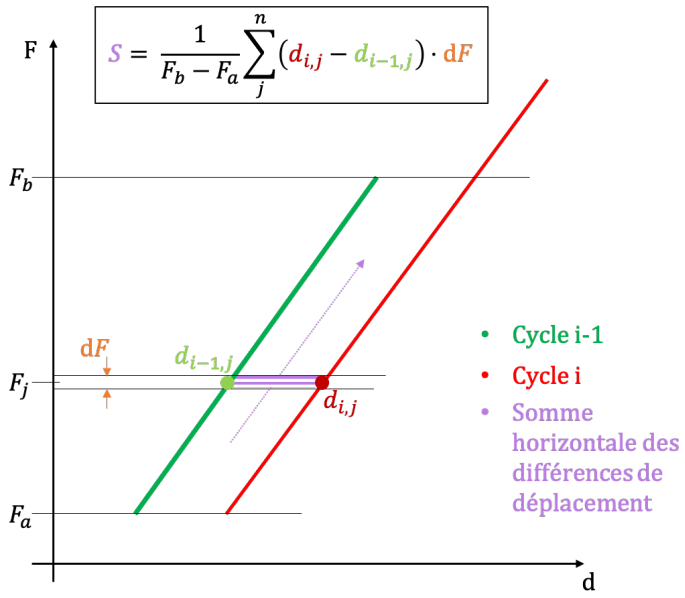


Figure 3.6 – Schéma montrant le calcul réalisé par la fonction S

où se trouve un cycle par rapport au précédent (où se trouve le rouge par rapport au vert, sur la Figure 3.6). Ainsi, si la fonction S est positive, il se trouve à droite. Si elle est négative, il est à gauche de son prédécesseur. S permet de non seulement situer les cycles les uns par rapport aux autres mais aussi de connaître l'intensité de cette translation. Une grande valeur de S en donne une importante. Tandis qu'une valeur proche de 0 implique que le nouveau cycle passe pratiquement par les mêmes points du plan force-déplacement que le cycle lui précédant.

À retenir

5 mesures ont été analysées pour les essais sur les échantillons équarris et les grumes :

- Comportement global et valeurs à la ruptures ;
- Déplacement résiduel : Témoin de la plasticité ;
- Rigidité : Témoin de l'endommagement ;
- Force maximale : Mesure de la résistance ;
- Fonction S : Identité du comportement au fil des cycles.

CHAPITRE IV

ESSAIS SUR ÉPROUVETTES ÉQUARRIES

Avant de commencer les essais sur grumes, il est essentiel de comprendre le comportement du bois. Seule une vingtaine de grume est disponible. Comme en témoigne le chapitre réservé à celles-ci, elles sont coûteuses en temps de préparation et manutention. Par conséquent, il est essentiel de dégager les comportements du bois soumis à de la flexion. Cette caractérisation permettra d'avoir une référence et d'établir un protocole d'essai qui sera réalisé sur les grumes.

Cette partie du mémoire est une phase de transition entre la connaissance théorique dont il est question dans les chapitres précédents et l'application de ces principes à des grumes. Dans cette optique, le choix a été porté de réaliser des essais sur du bois équarri de petites dimensions (voir Chapitre 4.2). Voici les quatre raisons de ce choix :

- **Expérience** : Les essais sur bois équarris sont communs et régulièrement réalisés. Dès lors, il existe une littérature imposante à ce sujet. Elle pourra notamment guider le choix des paramètres à étudier ou encore à vérifier que les valeurs obtenues sont dans l'ordre de grandeur « normal » ;
- **NBN EN 408+A1[10]** : Elle s'applique au bois équarri. Elle est assez exhaustive. De plus, le laboratoire LEMSC [1] est habitué à travailler avec elle ;
- **Dimensions contrôlées** : Les dimensions des éprouvettes équarries sont contrôlées et par conséquent constantes sur toute la longueur de l'élément. Il est alors possible de facilement déterminer les contraintes, les inerties, les modules de Young, ... ;
- **Sans défaut** : Les éléments de petites dimensions comportent un nombre réduit de défaut. Il est possible de prendre des échantillons entre les défauts naturels du bois qui, comme le Chapitre 2 l'explique, sont nombreux et variés. Les comportements identifiés seront uniquement celui du bois « parfait ». Ainsi, lors des essais sur grumes, les différences donneront l'influence des défauts et de la variabilité géométrique.

Concrètement, cette partie du mémoire décrivant les résultats obtenus sur éprouvettes équarries se divise en trois phases :

1. **Phase de prospection (Points 4.2.1, p. 53 et F.1, p. 126)** : Cette phase a vocation de donner une vue d'ensemble du comportement du bois en flexion quatre points jusqu'à la rupture de l'élément. Elle est composée des deux premières batteries d'essais. La première suit un protocole en chargement cyclique incrémenté par cycle. La deuxième est un chargement statique ;
2. **Phase d'étude (Points 4.2.2, p. 54 et F.2, p. 135)** : Cette phase vise à identifier l'influence de paramètres qui, suite à la première phase et aux consultations de la littérature, semblent avoir un impact le bois. L'approche sera principalement comparative. Il y sera comparé plusieurs valeurs d'un même paramètre pour déterminer s'il influe sur le comportement. Cette phase est aménagée en quatre batteries d'essais, de la troisième à la sixième comprise ;
3. **Phase d'élaboration (Points 4.2.3, p. 56 et F.3, p. 165)** : Cette phase a l'ambition de concrétiser la précédente en essayant le protocole envisagé sur les

1. « Laboratoire essais mécaniques, structures et Génie civil » (`https://uclouvain.be/fr/instituts-recherche/immc/lemsc`, (26 mai 2021))

grumes. Elle permettra d'observer si le protocole est apte à fournir les données attendues. De plus, elle donnera le comportement auquel on devrait s'attendre lors des essais sur grumes. Cette phase ne se réalise qu'en une seule batterie d'essais, la septième.

4.1 Généralités

Dans cette section, il sera expliqué tout ce qui est commun aux batteries d'essais sur éprouvettes équarries. Elle est composée d'explications sur les dispositifs utilisés, l'échantillonnage, les protocoles et d'un récapitulatif.

4.1.1 Dispositif

Principe

Comme énoncé, tous les essais sont en flexion 4 points. Étant donné qu'on travaille avec du bois équarri, le dispositif suit la norme NBN EN 408+A1 [10]. Le schéma de la Figure 4.1 permet de le visualiser. Les règles suivantes s'appliquent :

- Longueur totale : $L \geq 19 \cdot h$;
- Longueur entre appuis : $l = 18 \cdot h \pm 3 \cdot h$;
- Distance entre points d'application de la charge : $6 \cdot h$;
- Distance entre point d'application de la charge et appui : $6 \cdot h \ \pm 1,5 \cdot h$;
- La symétrie autour du centre de l'élément doit toujours être vérifiée ;
- Les appuis sont simples : l'un à rotule, l'autre à rouleau disposés à l'opposé de leur analogue au niveau des points d'application de la charge ;
- Idéalement, on y dispose un capteur pour mesurer la flèche centrale car elle est attendue comme étant la plus importante.

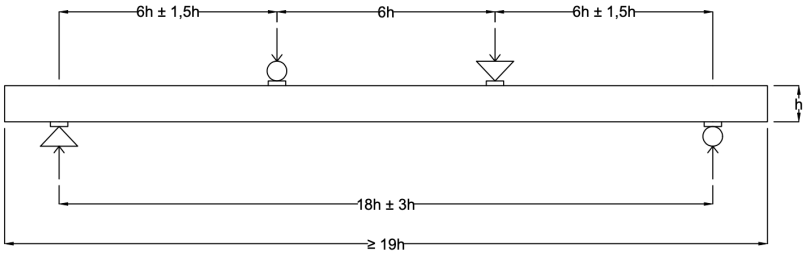


FIGURE 4.1 – Schéma du dispositif de flexion 4 points recommandé par la norme NBN EN 408+A1 [10]

Il est généralement conseillé de contrôler en déplacement le vérin d'application de la charge. Le vérin suit une commande faite sur l'allongement de sa traverse. Cette approche s'oppose naturellement au contrôle en force. Lors de cette dernière, le vérin est commandé

en fonction de la force mesurée lors de l'application de la charge. Si l'élément testé se rompt, il est incapable de donner une quelconque résistance à la cellule de force du vérin. Par conséquent, ce dernier continuera à chercher une résistance inexistante jusqu'à sa propre détérioration. Bien entendu, étant donné que les essais vont jusqu'à la rupture, ou du moins qu'il y a une probabilité non nulle de rupture, le vérin sera contrôlé en déplacement. Il s'arrêtera au déplacement imposé peu importe si le bois fournit une résistance ou non.

Adaptation des données

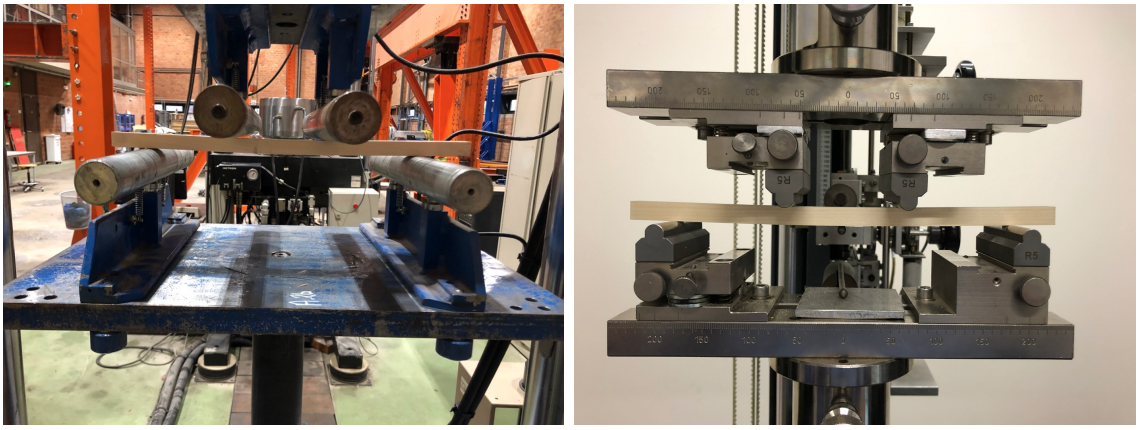
Comme dit dans le point sur les dispositifs 4.1.1, il n'a pas toujours été possible de mettre un capteur de flèche à mi-travée. Par conséquent, les mesures obtenues sont le déplacement du vérin. Il s'agit alors du déplacement des points d'application de la charge, c'est-à-dire au tiers de la longueur de l'éprouvette. Pour trouver celle à la moitié de la longueur, un rapport géométrique sur base d'un comportement de poutre élastique Euler-Bernouilli (le détail du calcul est à l'Annexe D) a été opéré :

$$\frac{\delta_{l/2}}{\delta_{l/3}} \approx 1,15$$

Machines d'essai

Bien que le principe reste identique, deux machines ont été utilisées : Lebow 100 kN et ZwickRoell 50 kN. Cela ne résulte pas d'un souhait. Malheureusement, la première n'était que peu précise. Il a fallu changer pour avoir des données plus fiables. Cependant, la machine ZwickRoell étant peu disponible, une partie des essais a été poursuivie sur le premier vérin. Quoiqu'il en soit, l'objectif de cette partie du mémoire n'est pas de quantifier les comportements et autres du bois. Il est plutôt d'identifier le comportement global ainsi que les paramètres influant celui-ci. Dès lors, les essais n'ont qu'un but qualitatif. Par ailleurs, il est très complexe de quantifier le bois. Il s'agit d'un matériau particulièrement variable. Contrairement à l'acier et au béton, sa production n'est pas maîtrisée par l'homme. La seule approche valable de quantification du matériau est statistique. Or, ce mémoire tend justement à se défaire d'une telle philosophie pour toutes les raisons expliquées dans l'introduction du travail. L'objectif n'est plus de s'intéresser au matériau, mais plutôt à l'élément. Les deux prochains points expliquent rapidement les caractéristiques de chaque vérin et dans quelles batteries ils ont été utilisés. Le Tableau 4.4 récapitule cette dernière information.

Lebow 100 kN Pour réaliser les batteries d'essai 1 à 4, la machine Lebow 100 kN a été utilisée. Cette machine a une capacité maximale de 100 kN et une précision en force de 0,61 %. Quant au déplacement relatif à la machine d'essai, il a une précision de 0,64 %. En Annexe L est présentée une fiche technique simplifiée de la machine. Le dispositif complet d'essai est présenté en Figure 4.2a.



(a) Lebow 100 kN (b) ZwickRoell 50 kN

FIGURE 4.2 – Dispositif complet des machines d'essai

ZwickRoell 50 kN Pour réaliser les batteries d'essai 5 à 7, la machine Zwick Roell 50 kN a été utilisée. Cette machine a une capacité maximale de 50 kN et une précision en force de 0,23 %. Quant au déplacement, mesuré à l'aide d'un extensomètre directement placé sur la machine, il a une précision de 0,17 %. En Annexe L est présentée une fiche technique simplifiée de la machine et de l'extensomètre. Le dispositif complet d'essai est présenté en Figure 4.2b.

4.1.2 Échantillonnage

L'échantillonnage est la manière dont les éprouvettes a été réalisé. Il s'agit d'une étape importante du processus d'essai. En y prêtant une attention particulière, on peut assurer une diversité suffisante pour estimer le comportement général du bois ainsi que de comprendre pourquoi certains échantillons donnent des résultats différents. Globalement, connaître l'échantillonnage permet de garder un œil critique sur les conclusions tirées.

Étant donné que deux dispositifs ont été utilisés, toutes les éprouvettes n'ont pas les mêmes dimensions. Le Tableau 4.1 les donne :

Dispositif	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]
Lebow 100 kN	300	16,5	16,5
ZwickRoell 50 kN	200	11	11

Tableau 4.1 – Dimensions des éprouvettes équarries

Les échantillons ont tous été réalisés dans des planches d'épicéa. Malheureusement, la provenance de ces planches reste inconnue. On ne peut pas non plus savoir si elles étaient toutes issues du même tronc. Quoiqu'il en soit, les éprouvettes pour chaque batterie ont été tirées en moyenne de trois planches différentes.

Lorsque l'approche est comparative, comme dans les batteries 3, 4 et 7, le soin de réaliser les échantillons par duo dans une même pente de fil a été pris. Autrement dit, on coupe des éprouvettes par deux, à la suite l'une de l'autre, dans une même pente de fil, c'est-à-dire dans la continuité des fibres. Bien entendu, chaque éprouvette du duo est testée selon un protocole légèrement différent, la seule différence étant la valeur du paramètre étudié au sein de la batterie. Cette méthode se base sur l'hypothèse qu'une même fibre aura le même comportement sur toute sa longueur. Ainsi, les variations observées entre deux valeurs d'un même paramètre seront *a priori* la conséquence de la modification dudit paramètre. Le nombre de duos dans chaque planche varie aléatoirement de un à quatre.

Le Tableau 4.4 donne le nombre de planches utilisées pour chaque batterie. Il indique également si les éprouvettes ont été réalisées par duo ou non. Si rien n'est indiqué, c'est qu'aucune attention particulière n'a été portée à ce niveau.

4.1.3 Protocole

Il faut distinguer deux types de protocoles : protocole de chargement statique et protocole de chargement cyclique. Le premier est simple, il suit la norme NBN EN 408+A1 [10]. La seule recommandation importante à suivre est la vitesse v de chargement. Elle ne peut dépasser 0,003 fois la hauteur h de l'éprouvette : $v \leq 0,003 \cdot h$. De plus, la rupture doit être atteinte en 300 secondes plus ou moins 120 secondes. Il convient dès lors d'adapter la vitesse pour respecter cette directive en sachant que les éléments d'un même lot iront *a priori* à la rupture en un temps semblable.

Le deuxième type est plus particulier. Un chargement cyclique contient comme son nom l'indique, des cycles de chargement-déchargement. Il s'agit de charger le bois jusqu'à un certain palier de déplacement [2] imposé [3] d_{imp} puis le décharger jusqu'à une valeur de force minimale $F_{\min}$. Il est nécessaire de prévoir cette dernière pour éviter que le vérin ne décharge totalement l'éprouvette au point de ne plus être en contact avec elle. Une telle anomalie provoquerait des perturbations dans les données car on mesurerait un déplacement qui n'est pas celui subi par l'éprouvette. Comment assurer $F_{\min}$ alors que le vérin est contrôlé en déplacement ? Le vérin restera de tout au long de l'essai en contrôle déplacement. Cependant, il est possible de lui donner une valeur de force qu'il doit maintenir. Dès lors dès qu'il arrive à celle-ci il arrête son déplacement et il essayera au mieux de se stabiliser autour d'elle. La valeur de $F_{\min}$ dépend du dispositif utilisé car elle dépend de la précision de celui-ci.

Les valeurs de déplacement imposé bien que différentes pour chaque batterie suivent une même logique. Elles sont calculées comme suit : $d_{imp_{i+1}} = d_{imp_i} + \frac{d_{imp_1}}{2}$. Autrement dit, le déplacement imposé du cycle suivant est celui du déplacement actuel augmenté d'un incrément fixe. Cet incrément vaut la moitié du premier déplacement imposé. L'avantage

2. « Palier de déplacement » indique une valeur de déplacement imposé à laquelle se rendront un ou plusieurs cycles consécutifs. De plus amples informations sont fournies dans le glossaire.

3. Étant donné que le vérin est contrôlé en déplacement comme indiqué au Point 4.1.1

d'un incrément constant est que l'augmentation de la flèche avec les cycles est linéaire. Le Tableau 4.2 donne les valeurs de flèches relatives imposées pour la première batterie. Les suivantes se calquent dessus. Ainsi, même si le chargement cyclique n'est pas incrémenté, les valeurs imposées seront parmi celles du Tableau 4.2. Rappel, l est la longueur entre appuis (Point 4.1.1, Figure 4.1).

Cycle	Flèche relative imposée	Cycle	Flèche relative imposée
1	$l/250$	11	$l/41,67$
2	$l/166,67$	12	$l/38,46$
3	$l/125$	13	$l/35,71$
4	$l/100$	14	$l/33,33$
5	$l/83,33$	15	$l/30$
6	$l/71,43$	16	$l/25$
7	$l/62,5$	17	$l/20$
8	$l/55,56$	18	$l/15$
9	$l/50$	19	$l/10$
10	$l/45,45$		

Tableau 4.2 – Flèches relatives imposées dans le protocole de la batterie 1, représenté à la Figure 4.3

La force minimale et les vitesses de chargement et déchargement sont données pour chaque batterie dans le Tableau 4.4. Le déplacement imposé sera donné sous forme de graphique avant l'analyse des résultats de la batterie. La Figure 4.3 montre le graphe de la batterie 1. Les axes des ordonnées montrent à gauche la valeur de déplacement en millimètre et à droite ce déplacement exprimé en termes de flèche relative. L'abscisse est l'écoulement du temps en seconde. L'information de la durée permet de prendre la mesure d'un essai qui peut parfois aller jusqu'à quatre heures. Il permet également de mettre en évidence les temps d'attente entre deux cycles, comme exécuté dans les batteries 3 et 7. En effet, si la valeur de fin d'un cycle est éloignée du début du suivant, cela signifie qu'un certain temps s'est écoulé entre les deux. Le sommet de chaque cycle, distingué par leur couleur et rappelé par un numéro, est la valeur du déplacement imposé pour ledit cycle. Cette représentation permet, en plus de données les déplacements imposés, de facilement remarquer une différence entre les vitesses de chargement et de déchargement.

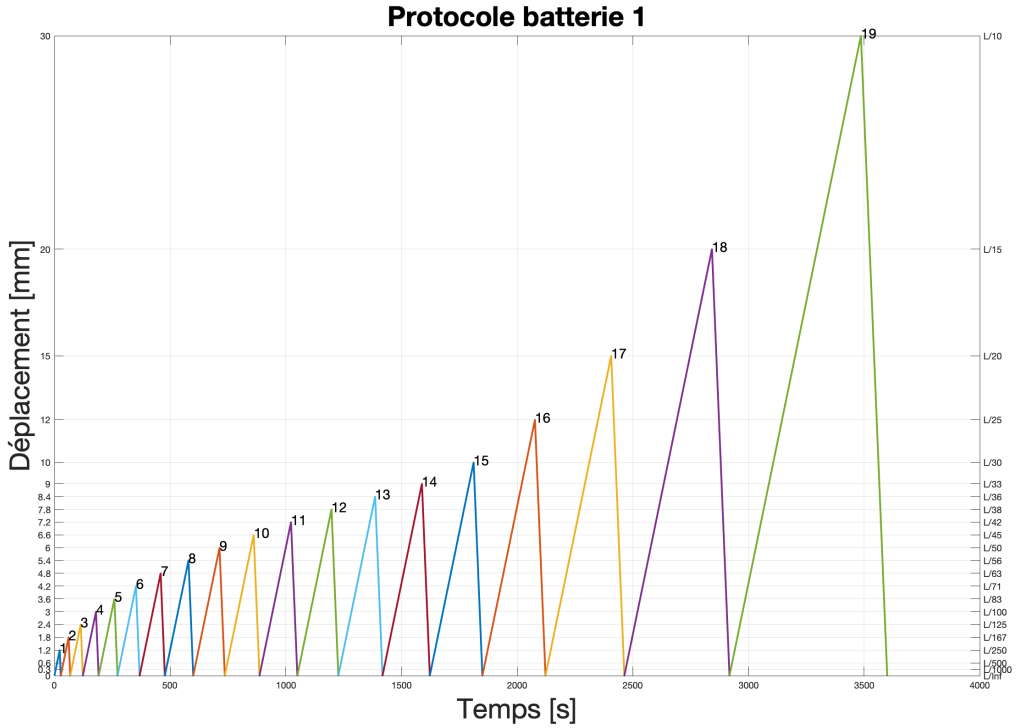


Figure 4.3 – Représentation graphique du protocole de la première batterie

Les vitesses de chargement et déchargement doivent également être précisées. La vitesse de déchargement a été prise cinq fois plus importante que celle de chargement [67]. Pour établir les vitesses, une courte étude préliminaire a été faite sur des données d'essais en flexion 4 points en chargement statique fait dans le cadre du cours LEPL1510 : Projet 4 (en construction) à l'EPL. Les courbes de ces données sortaient de la zone linéaire aux alentours d'une flèche de $l/50$. Il a alors été établi qu'il faudrait une vitesse de chargement de $v_l = 0,00176 \cdot l$ pour atteindre la limite de la linéarité en cinq minutes. Ce choix temporel avait été pris pour se rapprocher des exigences de rapidité d'un processus industriel. Une telle considération n'était pas judicieuse et n'avait pas sa place dans de la prospection scientifique. Par ailleurs, les vitesses sont un des sujets d'étude de la deuxième phase (voir Tableau 4.4). Dès lors, ces vitesses ne seront pas utilisées tout le temps et les valeurs de la norme NBN EN 408+A1 [10] seront finalement utilisées malgré qu'elles soient initialement prévues pour du chargement statique.

	Étape	Vitesse sur grume
1re idée	Chargement	$0,00176 \cdot l \triangleq v_l$
	Déchargement	$5 \cdot 0,00176 \cdot l = 5 \cdot v_l$
2e idée	Chargement Déchargement	$0,003 \cdot h \triangleq v_h$

Tableau 4.3 – Vitesses de chargement et déchargement du protocole de la batterie 1

4.1.4 Tableau récapitulatif

Ce point résume pour chaque batterie d'essais les points discutés. Il donne en plus leur objectif. Ceux-ci objectifs ne seront pas discutés sous ce point. En effet, les ambitions se basent systématiquement sur les conclusions précédentes. Dès lors, avant la présentation des résultats d'une batterie, l'explication de son objectif sera faite. Ce tableau est vraiment très utile lors de la lecture des résultats et en particulier de l'analyse complète (Annexe F, p. 126), il permet de garder une vue d'ensemble sur ce qui a été réalisé.

Les valeurs des paramètres étudiés ont été choisies afin de déceler s'ils avaient une influence sur le comportement du bois. Elles sont établies selon notre appréciation. Cette dernière se base en partie sur nos connaissances ou sur nos ressentis lors d'essais précédents. Par exemple, le temps d'attente entre deux cycles aux batteries 3 et 7 a été fixé d'une part à 0 et d'autre part à 300 secondes. Il aurait pu être plus court ou plus long, mais après discussions avec des habitués du domaine, il nous a semblé que 5 minutes de délai était suffisant pour déceler une variation. Quoiqu'il en soit, la valeur même du paramètre n'a pas tellement d'importance car, à nouveau, l'analyse est qualitative. Si la volonté avait été de quantifier l'impact de chacun des paramètres étudiés, il aurait fallu essayer des dizaines de valeurs et en tirer des lois.

Phase	Batterie	Objectif	Dispositif	Éprouvette			Protocole			
				#Planches	#Éprouvettes	Dimensions [mm]	$F_{\min}$ [N]	Délai [s]	$v_{charg.}$ [mm/sec]	$v_{décharg.}$ [mm/sec]
Prospection	1	Comprendre le comportement cyclique	Lebow 100kN	/	15	$l = 300$ $h = 16,5$ $c = 16,5$	70	0	v_l	$5 \cdot v_l$
	2	Comprendre le comportement statique			13		/		$\leq v_h$	/
Étude	3	Influence du délai entre 2 cycles		A,B,C	5 duos		70	0	v_l	$5 \cdot v_l$
								300	v_l	$5 \cdot v_l$
	4	Influence des vitesses		C,D,E	5 duos			0	v_l	v_l
								0	$5 \cdot v_l$	$5 \cdot v_l$
	5	Influence du nombre de cycles	Zwick-Roell 50kN	A,B,C	10	$l = 200$ $h = 11$ $c = 11$	10	0	v_h	v_h
	6	Comportement statique		A,B,C	10		/			/
Élaboration	7	Essai d'un protocole + délai		A,B,C	10 duos		10	0	v_h	v_h
								300	v_h	v_h

Tableau 4.4 – Récapitulatif des caractéristiques des batteries d'essais

4.2 Résultats sur éprouvettes équarries

Afin de garder une vue d'ensemble tout en appréciant les détails, il est recommandé de lire l'Annexe F en gardant constamment le Tableau 4.4 à portée de main. Elles contiennent l'analyse en détail ainsi que les graphes et les valeurs de chaque mesure pour chaque éprouvette.

4.2.1 Phase de prospection

Pour rappel, cette phase composée de deux premières batteries, visait à comprendre le comportement du bois dans sa globalité. Il faut retenir cinq éléments :

- **Confirmation** : Les valeurs obtenues lors des essais en chargement statique permettent de confirmer celles obtenues en chargement cyclique. Les essais en statique sont faits selon les bonnes pratiques de la communauté étant donné qu'ils suivent la norme NBN EN 408+A1 [10]. Ils peuvent donc servir de référence. Le Tableau 4.5 montre que le chargement cyclique et statique sont du même ordre de grandeur. Employer un chargement cyclique est alors judicieux pour la suite du travail ;

Type de chargement	Déplacement à la rupture [mm]	Flèche relative	Force à la rupture [N]	Contrainte à la rupture [MPa]	Module de Young [GPa]
Statique	11,37	$l/25,4$	1010,04	67,45	9,13
Cyclique	12	$l/25$	1055,44	70,49	9,21

Tableau 4.5 – Comparaison des valeurs de rupture en fonction du type de chargement

- **Plasticité** : Le déplacement résiduel augmente avec le chargement imposé. Ce phénomène est exacerbé à partir d'un déplacement imposé d'environ $l/50$. La plasticité est inévitable peu importe l'intensité du chargement ;
- **Endommagement** : La rigidité diminue systématiquement à partir d'une flèche relative imposée de $l/50$;
- **Élastoplasticité** : Le comportement global se rapproche de celui de l'élastoplasticité. Il existe cependant des différences notables. Il n'y a pas de transition nette entre les deux régimes. Il y a uniquement des zones où l'élasticité ou la plasticité dominent sans pour autant pouvoir totalement éteindre l'autre. En effet, des phénomènes identiques existent dans la partie linéaire et dans le plateau. La distinction vient de l'intensité de ces phénomènes ;
- **Transition élastique-plastique** : Bien que la transition soit « brouillée », elle a lieu en majeure partie entre les flèches relatives de $l/55$ et de $l/40$.

Ces informations amènent plus de questions que de réponses. Tout d'abord, étant donné les imprécisions des instruments, les résultats sont-ils concluants ? N'existerait-il tout de même pas une limite nette entre l'élasticité et la plasticité ? Est-ce que la relation de

la flèche résiduelle en fin de cycle – flèche imposée répond à une loi bilinéaire ou une loi exponentielle (voir Point F.1, p. 129) ? Si c'est la première option, est-il possible de la quantifier ? Le point d'inflexion serait alors la limite élastique ? À partir de quand l'élément est-il objectivement trop endommagé pour servir dans la construction ? ...

Étant donné la pertinence du chargement cyclique, il sera gardé pour la suite. Il permet d'envisager des procédés non-destructifs et de connaître l'évolution du comportement. Cependant, ils nécessitent des adaptions, notamment sur les paramètres suivants :

- **Le déplacement imposé** : Il semble évident puisque les conclusions faites jusqu'ici sont toutes dépendantes de la flèche imposée ;
- **La force minimale maintenue entre chaque cycle** : Ce paramètre est issu d'une crainte. La force de maintien pourrait être trop importante et influencer, à l'instar du fluage, la tenue du bois face à une charge maintenue. Cette force pourrait contrer la force de retour du bois qui se verrait alors incapable de retrouver sa forme initiale ;
- **Le temps d'attente entre chaque cycle** : Celui-ci fait directement suite au précédent. Le bois ne reviendrait à sa place non pas à cause d'une déformation définitive mais simplement parce qu'il n'a pas le temps. Il est lié au paramètre précédent car durant ce temps d'attente, la force minimale sera, bien entendu, maintenue. Il faut donc connaître son impact ;
- **Le nombre de cycles** : Si imposer un cycle cause automatiquement un dommage, l'utilité de procéder à beaucoup de cycles pour avoir une résolution suffisante est remise en question.

4.2.2 Phase d'étude

Cette phase est en directe réaction à la précédente. Elle se compose des batteries 3 à 6. Elle vise à étudier le bois selon les paramètres énoncés dans sa conclusion. À nouveau, il convient de rappeler que les résultats sont qualitatifs et ne permettent que de déterminer si un paramètre est impactant ou non. Il ne s'agit dès lors que d'appréciation.

Après après avoir étudié l'impact d'un délai d'attente entre deux cycles de chargement-déchargement, des vitesses de chargement et déchargement et du nombre de cycles, il est en conclu que :

- **Le délai est favorable** : Un temps d'attente de 5 minutes entre deux cycles donne des meilleurs résultats : moins de déplacement résiduel et plus grande force maximale. Cependant, son impact est limité sur la rigidité ;
- **La vitesse n'influe pas** : Aucune différence notable n'a pu être décelée lors des essais réalisés avec une vitesse cinq fois plus importante ;
- **Le nombre de cycle influence peu** : La quantité de cycle à un palier identique de déplacement imposé n'a pas d'impact. En revanche, le déplacement imposé change radicalement le comportement du bois. Comme attendu, lors de déplacements imposés importants (à partir de $l/50$), de plus en plus de plasticité et d'endommagement apparaissent.

À l'occasion de cette phase, il a été possible de mieux caractériser le comportement du bois soumis à de la flexion 4 points. Voici ce qui en ressort :

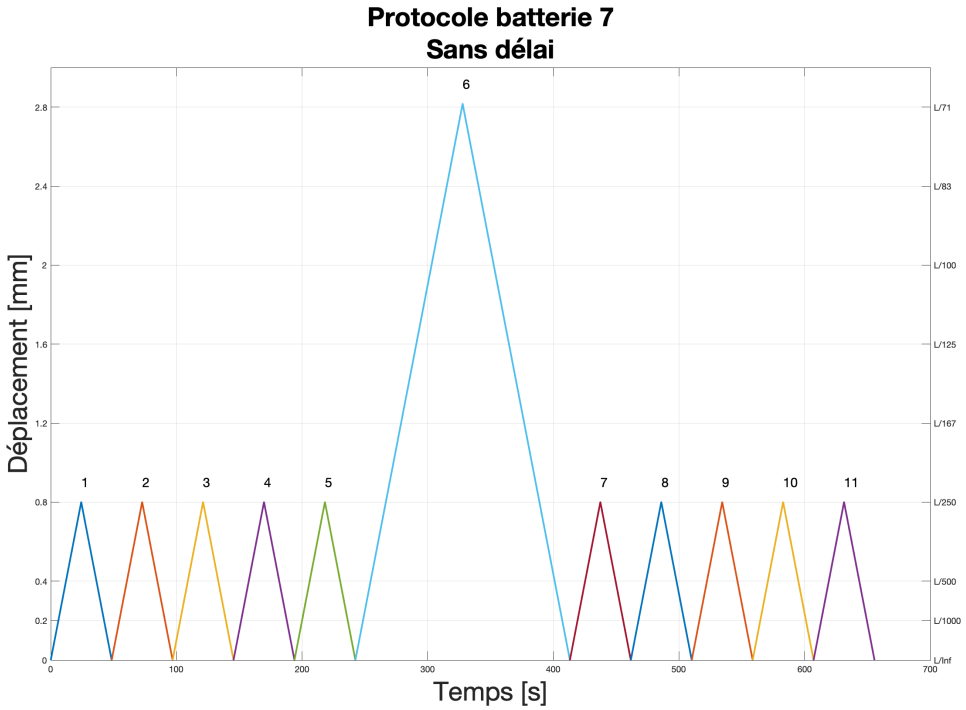
- **Confirmation** : Les valeurs obtenues à la rupture restent dans le même ordre de grandeur que celles de la phase précédente, bien qu'elles soient légèrement supérieures aux niveaux des résistances et de la rigidité. Les hautes valeurs mesurées (par exemple 90 MPa en résistance) sont liées à l'inexistence de défauts au sein des éprouvettes. Il s'agit là de quelque chose de tout à fait commun quand on travaille avec ce type d'échantillon ;
- **Plasticité et convergence** : Bien qu'il existe toujours un déplacement résiduel peu importe le palier appliqué, il converge avec la répétition de cycles à ce même palier. Ceci est très important. Ce phénomène signifie que le bois peut atteindre un chargement précédemment atteint sans s'abîmer davantage. Bien entendu, il faut rester dans une mesure raisonnable. Il serait logique de s'attendre à ce que des milliers de répétitions mènent à une rupture, comme pour tout autre matériau soumis à de la fatigue ;
- **Linéarité accrue** : Lorsqu'un chargement a dépassé la zone de transition entre la linéarité et le plateau, la linéarité sera accrue. Ceci ressemble au phénomène observé lors de l'écrouissage de l'acier. Les Figures F.10 (p. 138) et F.17 (p. 148) illustrent ce phénomène. Cette observation signifie qu'une sortie de la linéarité n'est pas forcément négative ;
- **Transition élastique-plastique** : À nouveau, la transition n'est pas nette. Cependant, elle se clarifie avec des chargements importants dûs au phénomène expliqué au point précédent (« Linéarité accrue »). En tout cas, elle se produit, comme lors de la phase précédente, entre $l/55$ et $l/40$;
- **Nouveau chargement impactant** : Le premier chargement à un certain palier de déplacement est celui qui influence le plus les échantillons. En effet, c'est là que sont notées les plus grandes valeurs de S. C'est aussi à partir de cette transition que des phénomènes différents sont observés : nouvelle valeur du module de Young et, naturellement, de la force maximale et du déplacement résiduel ;
- **« Nerf du bois »/Résilience** : Une rupture « en cascade » a été de nombreuses fois observée. Il est par là entendu que l'éprouvette se casse en plusieurs temps, parfois sur plusieurs cycles (par exemple Figure F.23, p. 157). Entre chaque pré-rupture, le bois récupère un peu de résistance. L'expression «nerf du bois» est habituellement utilisée pour désigner la particularité du bois à réduire légèrement sa déformation malgré sa rupture. Mécaniquement, cette notion pourrait se définir comme la capacité du bois, après une première rupture, à diminuer sa déformation sous charge constante ou à en supporter une plus importante que celle de la première rupture (voir Points F.1, p. 127 ; F.1, p. 134 ; F.2, p. 157 ;...).

4.2.3 Phase d'élaboration

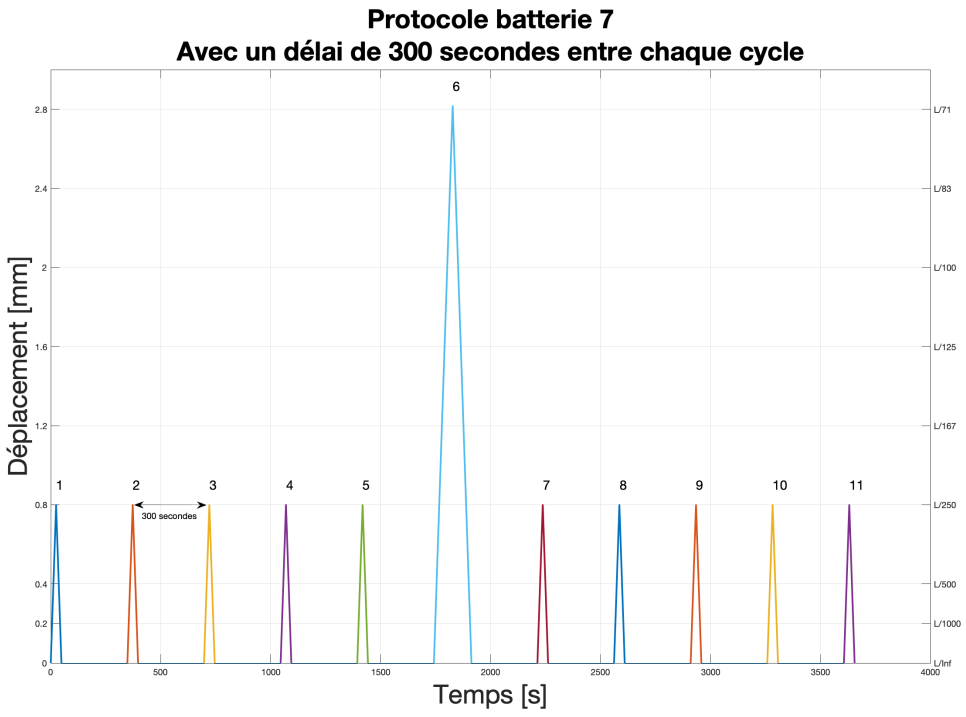
Cette phase, composée de la septième batterie uniquement, vise à tester un potentiel protocole sur des éprouvettes avant de l'exporter vers les grumes. Au vu des observations des phases précédentes et de l'idée présentée dans l'introduction du travail (Point 1.6.3, p. 13), le protocole est le suivant :

- **1er chargement ELS (cycles 1 à 5)** : Cinq cycles jusqu'à $l/250$ seront réalisés. Ils permettent de stabiliser l'éprouvette et de déterminer les propriétés mécaniques, la rigidité et la force maximale, avec certitude. En effet, les différentes valeurs convergent lorsqu'on multiplie les cycles allant à un même palier de déplacement imposé. Il est permis de faire ce choix étant donné que la répétition de cycle jusqu'à un même palier n'est pas influençant. Cinq cycles nous ont semblé être un bon compromis pour observer une convergence ;
- **Chargement ELU (cycle 6)** : Un cycle chargera jusque l'obtention de la force ELU, F_{ELU}. En principe, celle-ci se détermine à l'aide de la force ELS, F_{ELS}, c'est-à-dire la force maximale mesurée lors du 1er chargement ELS. Cette détermination se fait conformément à ce qui a été décrit dans l'introduction : $F_{\text{ELU}} = 3,25 \cdot F_{\text{ELS}}$. Cependant, il n'était pas possible de programmer la machine disponible pour opérer ce calcul en temps réel. Pour la majorité des éprouvettes testées, F_{ELU} était atteinte lors du palier allant à $l/71$. Le chargement ELU de ce protocole sera donc un simple cycle de chargement-déchargement jusque $l/71$;
- **2e chargement ELS (cycles 7 à 11)** : Une deuxième série de cinq cycles jusque $l/250$ sera réalisée. Elle permet d'observer une éventuelle différence avec la première série et dès lors déterminer l'impact du chargement ELU. Pour taper sur le clou, les essais ne permettent qu'une appréciation qualitative des observations. L'objectif de ce 2e chargement ELS est bien exclusivement d'observer une différence sans pour autant savoir quand celle-ci devient problématique ;
- **Chargement de vérification (cycle 12)** : Afin de vérifier que l'éprouvette est capable de dépasser F_{ELU}, il est procédé à un chargement statique jusqu'à la rupture de l'élément.

Étant donné qu'il est difficile de se prononcer sur l'impact d'un délai entre deux cycles, ce protocole est réalisé avec et sans un délai de 300 secondes entre chaque cycle (Figure 4.4).



(a) Sans délai



(b) Avec un délai de 5 minutes, soit 300 secondes

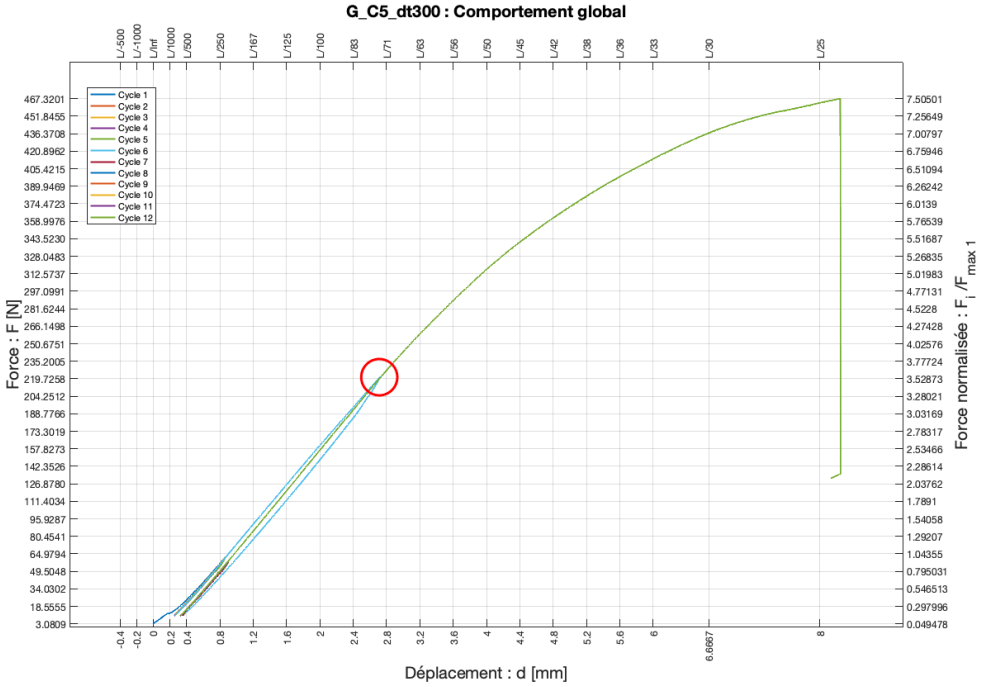
FIGURE 4.4 – Représentation graphique des protocoles de la septième batterie

Concernant le paramètre étudié dans cette phase, c'est-à-dire le délai, il faut retenir ceci

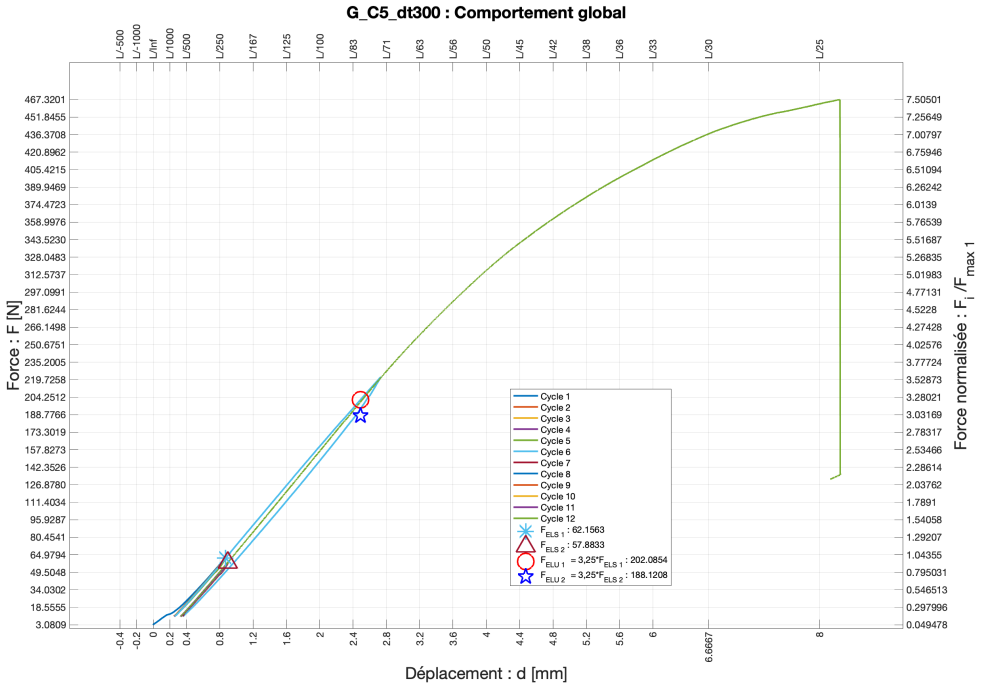
- **Impact marginal du délai** : Les Figures F.30a et F.30b ne sont globalement pas différentes. Le comportement avec ou sans délai suit la même logique. Certes, le délai est favorable au vu de l'analyse faite au Point F.3 de l'Annexe F à la page 165 mais c'est tout à fait minime.

La Figure 4.5 montre le comportement global obtenu avec ces protocoles. Voici les points à retenir :

- **Confirmation** : Les observations précédemment faites sur les valeurs à la rupture et de manière générale sur le comportement sont à nouveau valables. Les points qui suivent permettent d'insister sur certaines caractéristiques ;
- **Diversité** : Comme toujours avec le bois, le comportement des éprouvettes est aléatoire. En effet, certaines sont particulièrement ductiles, d'autres beaucoup plus fragiles. Cependant, cela n'affecte pas du tout le protocole envisagé ;
- **« Nervience »** : Néologisme formé par la combinaison de « nerf du bois » et de résilience. Il dénonce le comportement spécifique de bois que l'on peut observer sur ces figures. Nous y voyons que le bois repasse par le même point F_{ELU} lors du chargement de vérification. Autrement dit, peu importe la plasticité ou l'endommagement, le bois repassera par son dernier extremum. Ceci est illustré à la Figure 4.5a. Ce comportement est directement en lien avec le « nerf du bois »/rupture en cascade déjà discuté (Point 4.2.2, p. 54). Ce qui est concrètement entendu par « nervience » est détaillé au Point 6.2 à la page 87 ;
- **Sécuritaire** : Cette approche est sécuritaire. La F_{ELS} obtenue sur la deuxième série de chargement ELS est inférieure à la première. Dès lors, la F_{ELU} recalculée à partir de cette nouvelle valeur de F_{ELS} sera inférieure à celle atteinte lors du chargement ELU. Systématiquement, sur les vingt éprouvettes testées, le chargement de vérification jusque la rupture passait au-dessus de cette nouvelle F_{ELU}. La Figure 4.5b met une image sur des mots.



(a) Mise en évidence de la repasse par le dernier extremum



(b) Mise en évidence des valeurs ELU calculées à partir des valeurs ELS mesurée. Le rond rouge n'est pas sur la pointe du 6e cycle puisque F_{ELU} avait été estimée être induite par un chargement jusque $l/71$.

FIGURE 4.5 – Comportement global de l'éprouvette G_C5_dt300 de la septième batterie

CHAPITRE V

PRÉPARATION DES ESSAIS SUR GRUMES

Des essais de flexion 4 points ont été réalisés sur un total de 21 grumes. L'essai de flexion 4 points permet d'obtenir un moment de flexion constant et donc un effort tranchant nul entre les deux points de chargement. Une représentation se trouve en Figure 5.1.

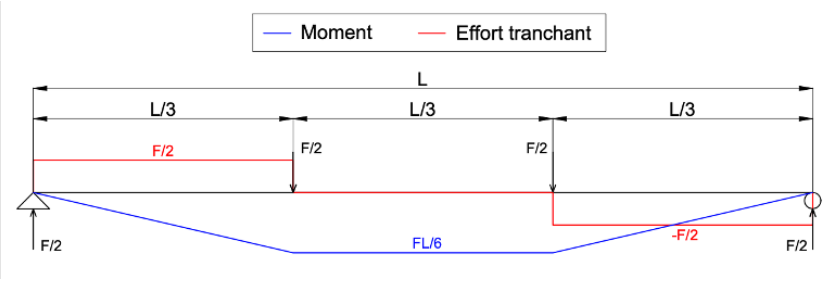


Figure 5.1 – Diagramme du moment de flexion et de l'effort tranchant pour une poutre en flexion 4 points [28]

Ce chapitre détaille toutes les étapes importantes qui doivent être réalisées avant de commencer les essais. Elles peuvent se diviser en trois temps. Premièrement, un classement visuel est réalisé pour chaque grume suivant une norme belge et une norme allemande. Deuxièmement, des modèles 3D sont faits de toutes les grumes grâce au logiciel *Metashape*. Troisièmement, chaque élément composant le dispositif d'essai est analysé, que ce soit le matériel d'essai ou l'instrumentation.

5.1 Classement visuel

Il existe deux approches pour classer visuellement un élément en bois : le classement visuel « d'aspect » et le classement visuel « structural ». Ces deux techniques se basent sur l'observation de caractéristiques visibles de l'élément mais l'interprétation que l'on peut faire pour chacune d'elle est différente. Dans le cas du classement visuel structural, une correspondance est proposée entre les caractéristiques des défauts et singularités du bois et les propriétés mécaniques. Ceci permet de trier les éléments en différentes classes de résistance. Pour le classement visuel d'aspect, on ne s'intéresse qu'à classer esthétiquement les éléments. Aucun lien n'est fait avec la résistance.

Il est possible de classer visuellement le bois quand ce dernier est avivé, c'est-à-dire sous la forme d'une section rectangulaire ou quand le bois est rond. En Belgique et dans la plupart des pays européens, le classement visuel des bois avivés est soumis à des normes de classement. Ceci n'est pas toujours le cas du bois rond qui est peu utilisé en structure. Dans ce travail, lorsque le type de classement n'est pas précisé, celui-ci fera toujours référence au bois rond.

Un classement visuel de chaque grume a été réalisé selon un classement visuel d'aspect et structural. Le classement visuel d'aspect suit la norme belge NBN EN 1927-1 [8] et le structural se base sur la norme allemande DIN 4074-2 [1]. Nous avons décidé de suivre l'approche de classement visuel structural de la norme allemande car c'est le pays le plus proche de la Belgique à proposer un tel classement. Il n'existe à ce jour aucune norme

belge faisant un lien entre l'observation visuelle des défauts et singularités du bois et les propriétés mécaniques du bois rond.

5.1.1 Facteurs influençant le classement visuel

Le classement visuel repose sur un certain nombre de facteurs dont, par expérience, on sait qu'ils ont de l'influence sur les propriétés mécaniques et plus particulièrement sur la résistance des grumes [30].

Un tableau regroupant les caractéristiques importantes à mesurer pour réaliser le classement visuel a été réalisé pour chaque grume. Un exemple sera montré durant l'explication du classement visuel. Ce tableau a deux objectifs. D'une part, il est systématique ce qui permet de faciliter le classement en temps réel de chaque grume. D'autre part, il permet de garder une trace des défauts de chaque élément testé. Il relève avec précision les dimensions de chaque particularité ainsi que leur emplacement.

Afin de comprendre un tel tableau, il est important de définir et illustrer toutes les caractéristiques qui s'y rapportent. Ceci est fait de manière complète en Annexe **??** [1]. On retrouve dans ce tableau deux types de défauts du bois : les singularités et les altérations biologiques. Pour mesurer les singularités des éléments (nœuds, poche de résine, croissance et fentes), on se réfère à la norme NBN EN 1310 [2]. Pour ce qui est de l'observations des altérations biologiques (attaques d'insectes, échauffure, pourriture et discoloration) on se réfère à la norme NBN EN 1311 [3]. Pour comprendre l'ensemble des termes techniques relatifs à ces singularités et altérations biologiques, on se rapporte à la norme NBN EN 844 [13].

Observation visuelle faite sur la grume numéro 4

Afin de comprendre les principes du classement visuel du bois rond, un exemple est réalisé. Une grume du lot est sélectionnée, la grume n°4. La Figure 5.2 regroupe l'ensemble des informations importantes pour cette grume. L'Annexe I reprend les tableaux de chaque grume testée.

Il est important de noter dès à présent que ces classements se font habituellement pour des arbres sur pied. Par conséquent, certaines caractéristiques qui sont seulement visibles sur le bois de bout n'ont été observées qu'après l'essai de flexion. Ces caractéristiques découvertes *a posteriori*, lors du relèvement d'un échantillon, n'ont pas été prise en compte dans les classements visuels. En effet, les présences d'échauffure et de bleuissement ont été découvertes sur tous les prélèvements. Ceci est prévisible par le fait que les grumes abattues soient restées plus d'un an en forêt posées à même le sol, avec leurs écorces. Une attaque de champignons ne pouvait pas être évitée. Ceci est une erreur de notre part, une plus grande attention aurait dû être portée sur la méthode de conservation des grumes.

1. Il est vivement conseillé au lecteur n'étant pas familier avec les termes relatifs aux défauts du bois de consulter cette annexe.

Caractéristiques observées sur la grume n°4 - 17 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,3 S 3	1,04 S 2,5	**1,65 S 3**	**2,4 S 3**	3,38 S 3	4,11 S 2,2	4,86 S 2,5	
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,3 M 1	1,04 S 2,5	**1,65 S 3**	**2,4 S 3**	3,38 S 3	4,11 S 2,8		
x = Position en longueur	0,3 M 1	1,04 M 2	**1,65 M 2**	**2,4 S 2,5**	3,81 S 2,5	4,58 S 2,3		
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,3 S 3,5	1,04 S 2,5	**2,4 S 3**	**3,14 S 3,2**	3,81 S 2	4,58 S 2,4		
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	1,04 S 3,5	1,65 S 3	**2,4 S 3**	**3,14 S 3,5**	3,81 S 3	4,58 S 1		
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	1,04 S 3,5	**1,65 M 1**	**2,4 S 2**	**3,14 S 3**	4,11 S 3,5	4,58 S 1		
Poche de résine								
Dimension maximale :	/ [mm]							
Taux de croissance								
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	70 [mm]	Nombre de cerne d'acroissement :		35	Taux de croissance		2 [mm]	
Fils tors								
Position en longueur :	1,2 [cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :		0,5 [cm/m]				
Coeur excentré								
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	1,7 [cm]	Pourcentage du diamètre de la section :		7,36 %				
Bois de réaction								
Dimension maximale :	/ [cm]	Pourcentage de la dimension considérée :		/ %				
Courbure								
Position en longueur :	3,01 [m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :		3,3 [cm]				
Décroissance								
Diamètres aux extrémités :	23,1 [cm]	15,1 [cm]	Distance entre mesures :	4,91 [m]	Décroissance :		1,63 [cm/m]	
Fente de coeur								
Longueur de la plus grande fente visible :	/ [cm]							
Roulure								
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/ [cm]							
Attaques d'insectes	Aucune							
Echauffure	Aucune							
Pourriture	Pourriture blanche							
Discoloration	Aucune							

Figure 5.2 – Caractéristiques observées sur la grume n°4

5.1.2 Classement visuel d'aspect du bois rond - Norme blege (NBN EN 1927-1)

Le classement visuel d'aspect permet de répondre à des exigences d'esthétique du bois mis en œuvre. La répartition des bois se fait en quatre classes de qualité :

- Classe de qualité **A** : Bois de première qualité ;
- Classe de qualité **B** : Bois de moyenne qualité ;
- Classe de qualité **C** : Bois de faible qualité ;
- Classe de qualité **D** : Bois qui ne correspond à aucune des classes de qualité A, B ou C.

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins

Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤ 4 [cm]	≤ 8 [cm]	permis
morts		exclus	≤ 3 [cm]	≤ 6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤ 3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤ 4 [mm]	≤ 7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤ 3 [cm/m]	≤ 7 [cm/m]	≤ 10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤ 10 %	≤ 15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤ 10 %	≤ 33 %	sans limite
Courbure	< 20 [cm]	pas d'exigence	≤ 1 [cm/m]	≤ 1,5 [cm/m]	≤ 3 [cm/m]
	≥ 20 jusque 35 [cm]	≤ 1 [cm/m]	≤ 1 [cm/m]	≤ 1,5 [cm/m]	≤ 3,5 [cm/m]
	≥ 35 [cm]	≤ 1 [cm/m]	≤ 1,5 [cm/m]	≤ 2 [cm/m]	≤ 4,5 [cm/m]
Décroissance	< 20 [cm]	pas d'exigence	≤ 1,25 [cm/m]	≤ 2 [cm/m]	sans limite
	≥ 20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤ 1,5 [cm/m]	≤ 2,5 [cm/m]	sans limite
	≥ 35 [cm]	sans limite	≤ 2 [cm/m]	≤ 4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	< 35 [cm]	exclues	exclues	≤ 1/2 ϕ	permises
	≥ 35 [cm]	≤ 1/4 ϕ	≤ 1/4 ϕ	≤ 1/2 ϕ	permises
Roulures	< 35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤ 1/2 ϕ
	≥ 35 [cm]	exclues	≤ 1/4 ϕ	≤ 1/3 ϕ	≤ 1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
< 2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
> 2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	D

FIGURE 5.3 – Classement visuel selon la norme belge de la grume n°4

La règle de classement se fait à l'aide de la Figure 5.3 qui reprend l'ensemble des caractéristiques présentées à la Figure 5.2. Le critère offrant la moins qualité donne celle de la grume. Par exemple, pour être de classe B, tous les critères doivent être de classe A ou B.

Application de la norme belge à la grume numéro 4

Pour l'exemple de la grume n°4, voir Figure 5.3, on observe que les deux paramètres déclassant la grume sont la courbure et la pourriture. On observe également une décroissance relativement importante de l'élément. Les nœuds, dans ce cas-ci, ne sont pas le paramètre le plus restrictif. Il est important de souligner que puisque la grume est classée D par la norme belge, elle ne sera en aucun cas utilisée à un usage structural d'un ouvrage.

5.1.3 Classement visuel structural du bois rond - Norme allemande (DIN 4074-2)

Le classement visuel structural permet, sur base d'exigences esthétiques, de proposer une relation entre l'apparence du bois et ses caractéristiques mécaniques. Dans la littérature, on constate que cette technique de classement n'est pas précise et semble sous-estimer fortement les propriétés mécaniques de l'élément. Pour les bois ronds, il n'existe d'ailleurs aucune norme belge de classement visuel structural. Pour autant, il est intéressant de vérifier la pertinence de ce type de norme de classement. Il existe une norme allemande faisant ce lien entre esthétique et résistance. Nous décidons de l'utiliser en faisant l'hypothèse que des épicéas belges seront relativement semblables à des épicéas allemands. L'objectif est de tirer la tendance de classement de cette norme et nous estimons que cette hypothèse peut alors être acceptée.

La répartition des bois se fait en trois grades :

- Grade **1** : Grumes avec une capacité portante particulièrement élevée
- Grade **2** : Grumes avec une capacité portante normale
- Grade **3** : Grumes avec une faible capacité portante

La règle de classement se fait à l'aide de la Figure 5.4 qui reprend certaines caractéristiques présentées à la Figure 5.3. Pour pouvoir appartenir à une certaine classe de qualité, il faut remplir l'ensemble des critères de cette classe. Sinon, l'élément se trouve dans la classe de qualité inférieure.

Application de la norme allemande à la grume numéro 4

Pour l'exemple de la grume n°4, voir Figure 5.4, il est possible d'observer que la pourriture est le seul élément déclassant. Cette constatation est similaire pour les autres grumes.

Les paramètres comme les nœuds ou la courbure ne jouent pas un rôle décisif dans ce classement allemand.

Pour ensuite faire le lien entre caractéristiques visuelles et mécaniques, on se base sur la norme DIN 1052 [9]. Elle propose un tableau (voir Annexe J) qui fait la correspondance.

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	2	**3**

FIGURE 5.4 – Classement visuel selon la norme allemande de la grume n°4

5.1.4 Comparaison du classement visuel entre les normes belge (NBN EN 1927-1) et allemande (DIN 4074-2)

Ci-dessous est présenté un tableau récapitulatif reprenant les résultats des deux classements visuels réalisés sur le lot de grumes.

Norm belge (NBN EN 1927-1)	Norme allemande (DIN 4074-2)
Aucune grume de classe A	9 grumes de grade 1
1 grume de classe B	2 grumes de grade 2
8 grumes de classe C	10 grumes de grade 3
12 grumes de classe D	

Tableau 5.1 – Récapitulatif du classement visuel belge et allemand

Les résultats du classement visuel belge étaient attendus. L'épicéa des forêts belges ne dépasse que rarement une classe C. C'est encourageant car si le protocole permet de valoriser au mieux les 21 grumes testées, cela veut dire qu'il sera possible de valoriser un maximum d'épicéas belges. Il faut noter que le matériel d'étude provient du bois de Lauzelle à Louvain-la-Neuve. Cette zone géographique ne correspond pas du tout à la zone de croissance écologique et naturelle de l'épicéa qui est en général l'Ardenne à plus de 400m d'altitude.

En ce qui concerne la norme allemande, sur base de ces résultats, on cherche la résistance associée à chaque grume. Le tableau de la norme DIN 1052 [9], consultable en Annexe J, donne un résultat pour le moins surprenant. Quel que soit le grade, la grume ne peut pas dépasser une classe de résistance C16. Le classement visuel semble donc assez punitif en sachant qu'il est possible d'obtenir des résistances dépassant facilement le triple dans le cas de bois de bonne qualité. Le seul avantage de ce classement est sa rapidité dans une production industrielle.

On constate une dissemblance particulièrement frappante entre les deux classements. Près de la moitié des grumes sont classées en grade 1 pour la norme allemande alors que seulement une grume est classée B pour la norme belge. Malgré que l'objectif de ces deux classements soit différent, on pressent tout de même que la norme belge est plus exigeante que la norme allemande. Cette constatation a du sens. La norme allemande essaye de booster le classement visuel de ces éléments en sachant pertinemment que de toute façon, la classe de résistance maximale que l'on peut atteindre est du C16.

5.2 Photogrammétrie

La géométrie d'un tronc est très irrégulière. Les nœuds, la conicité ou encore la courbure sont tant de paramètres qui font que la section et l'inertie varient tout le long de la grume. Le mémoire est de nature exploratoire. Il est donc cohérent d'essayer de caractériser au mieux chaque élément que l'on souhaite tester pour pouvoir ensuite aider des études futures à interpréter les résultats. Dans cette optique, nous avons décidé d'utiliser la photogrammétrie. Cette technique permet, à partir d'un ensemble de photos, de créer un maillage en trois dimensions de la grume. On peut donc garder une trace numérique des éléments testés.

5.2.1 Principe

Le programme utilisé pour réaliser la photogrammétrie des troncs est *Metashape* developpé par *Agisoft*. Le fonctionnement du logiciel est relativement simple et peut se résumer en quatre étapes clefs, appliquées directement à une grume sur la Figure 5.5 :

1. **Alignement des photos** : Cette étape correspond au calcul de l'emplacement des photos dans l'espace. Le logiciel sélectionne aléatoirement des points à comparer entre différentes photos. Ceci permet d'aligner les prises de vue les unes à côté des autres ;
2. **Création d'un nuage de points dense** : Après avoir validé la position des photos dans l'espace, le logiciel va essayer de prendre le maximum de pixels dans chaque photo pour les utiliser ensuite dans le modèle 3D ;
3. **Création du maillage** : À partir du nuage de points dense, le programme peut créer un maillage avec le nombre de facettes de notre choix ;
4. **Création d'une photo-texture sur le maillage** : Grâce au nuage de points dense qui permet de capter un maximum de pixels dans chaque photo, le logiciel peut finalement produire un rendu réaliste de la grume.

La première et la dernière étapes sont particulièrement frappantes de la puissance de ce programme. La première phase, l'alignement des photos, permet en un coup d'œil de savoir si le modèle est fidèle à la réalité ou non. En effet, on observe principalement deux teintes de couleurs sur le modèle : verte et orangée. Ces couleurs correspondent à la confiance que le programme donne au modèle. On observe que pratiquement l'entièreté de la grume est verte, le programme est confiant dans le modèle. Il n'y a qu'aux extrémités où le modèle est orangé car les grumes étaient posées sur des trétaux et le programme n'a pas les informations exactes à cet endroit. La dernière phase, la création de la texture, semble donner une représentation tout à fait fidèle de la réalité. Cependant il faut rester critique. On observe que même aux extrémités, où il manque de l'information, le programme crée une texture en s'aidant des points adjacents. Pour pouvoir être sûr que cette texture représente bien la réalité, il faut s'aider de la première phase et voir si le modèle est confiant à l'endroit que l'on souhaite observer.

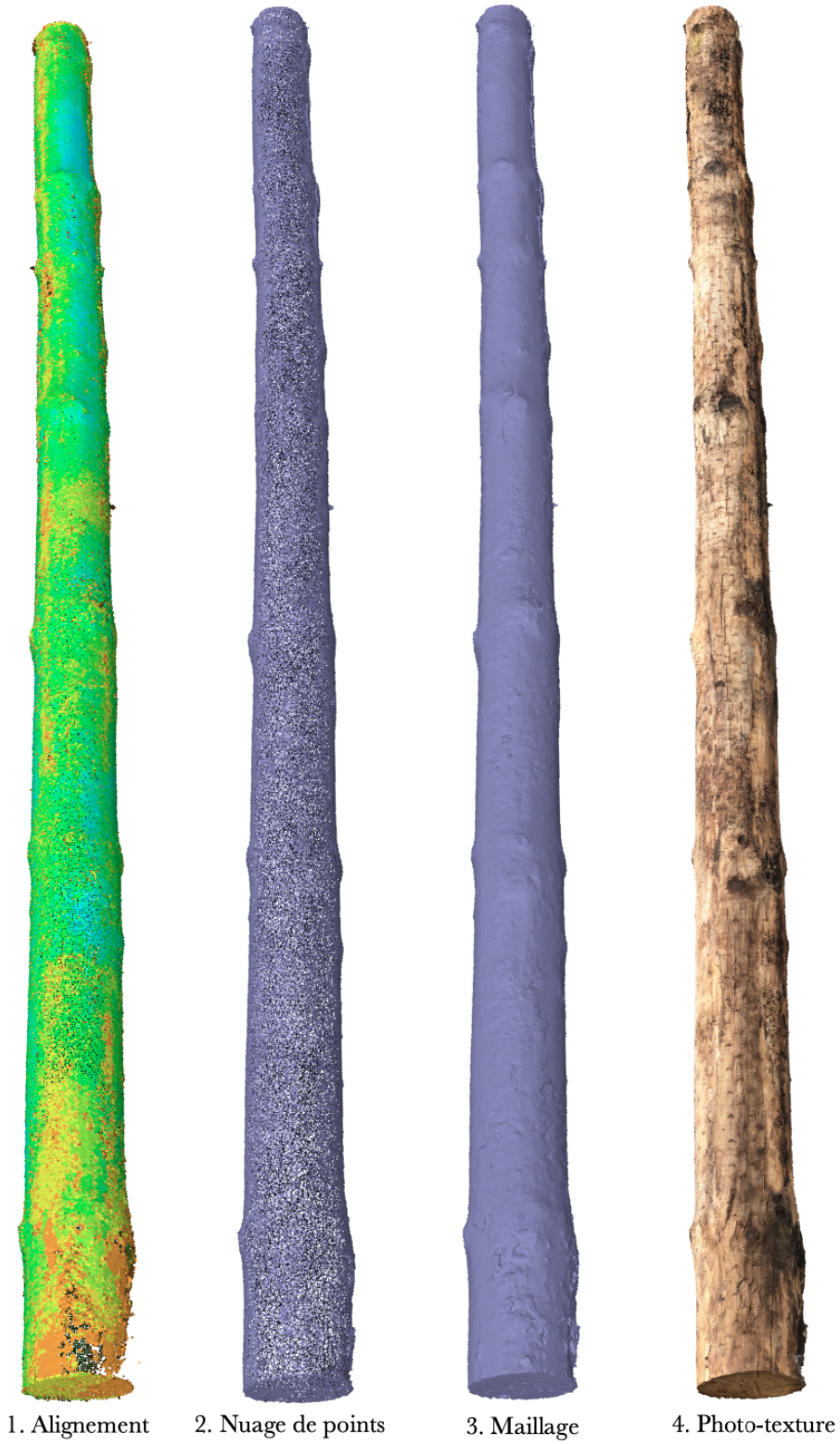


Figure 5.5 – Étapes clefs de la photogrammétrie

5.2.2 Mise en place des grumes

La Figure 5.6 présente la configuration choisie pour réaliser la photogrammétrie. La grume est posée sur deux trétaux à environ un mètre du sol.



FIGURE 5.6 – Vue panoramique du placement de la grume pour réaliser la photogrammétrie

Les éléments blancs présents tout autour de la grume sont des marqueurs nécessaires pour réaliser un modèle à l'échelle. En effet, la photogrammétrie ne fonctionne que par proportions entre les différentes photos. Les marqueurs blancs permettent de pouvoir poser certaines distances et donc de mettre à l'échelle le modèle. En spécifiant une distance d entre chaque capteur, voir Figure 5.7, le programme réussit à mettre le modèle aux bonnes dimensions.

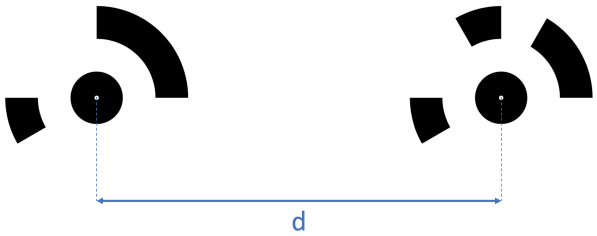


FIGURE 5.7 – Marqueur de type 12 bit

Une vingtaine de marqueurs ont été placés autour de la grume. Au-delà de six références d, le modèle ne gagne plus en précision. Nous avons donc choisi 6 paires de marqueurs, à différents endroits autour de la grume, pour mettre le modèle à l'échelle.

5.2.3 Précision du modèle 3D

La précision du modèle est un élément clef dans la validation ou non de la photogrammétrie des grumes. Chaque étape du processus est détaillée ci-dessous.

Photos des grumes

Pour réaliser chaque modèle, environ 100 photos ont été prises tout autour de la grume. Concernant la fréquence des prises de vue, chaque photo reprend au minimum la moitié de la photo suivante ou précédente. Ceci est représenté à la Figure 5.8. De plus, au minimum deux marqueurs doivent être visibles sur chaque photo pour permettre une mise à l'échelle précise. Un iPhone 8 a été utilisé pour réaliser les photos de chaque grume.



Figure 5.8 – Fréquence des prises de vue

Implémentation dans *Metashape*

Pour les quatre phases clefs du fonctionnement du logiciel, une précision devait être choisie. Ci-dessous, nous motivons notre choix pour chacune des étapes avec les commandes précises à réaliser dans le logiciel en Annexe K.1.

1. **Alignement des photos** → Précision « haute »
   On utilise une précision « haute » pour l'alignement puisque la grume possède des couleurs et contrastes assez monotones. La précision « haute » permet au logiciel de choisir un nombre de points aléatoires importants à comparer entre chaque photo ce qui optimise évidemment les chances que ces dernières soient bien placées ;
2. **Création d'un nuage de points dense** → Précision « moyenne »
   Cette étape est assez lourde et peut rapidement surcharger le modèle. Une précision « moyenne » permet un temps de calcul raisonnable en perspective avec la précision attendue du modèle ;
3. **Création du maillage** → Précision « faible »
   Le maillage se génère à partir du nuage de points dense que l'on aura nettoyé, c'est-à-dire sans les points parasites de l'environnement autour de la grume. La précision « faible » est choisie car ce paramètre permet d'avoir un modèle déjà très précis grâce à la précision haute de l'alignement des photos ;
4. **Création d'une photo-texture sur le maillage**
   On utilise les paramètres de base proposés par le logiciel qui suit les spécifications des trois étapes précédentes.

L'ensemble de ces étapes prend environ 1h30, sans compter le nettoyage du modèle de points parasites dus à l'environnement autour de la grume. L'ordinateur utilisé est un MacPro 2013 [2].

Comparaison du modèle à la réalité

La mesure la plus appropriée afin de comparer correctement le modèle 3D à la réalité est le périmètre de la grume. Afin d'être le plus représentatif possible, dix mesures de périmètres ont été choisies tout le long de la grume. Une erreur moyenne de **1,4%** est obtenue sur la mesure de périmètres de chaque grume. Le tableau reprenant ces erreurs pour chaque grume à l'Annexe K.2. Cette valeur est tout à fait encourageante par rapport à l'utilisation que l'on fait de ces modèles et des paramètres choisis pour les réaliser. De plus, il est à noter que ces erreurs peuvent venir d'un nombre important de paramètres qui ne sont pas directement liés à la précision du modèle comme la qualité de la mesure faite au mètre ruban, l'exactitude de l'endroit où la mesure doit être prise, etc.

5.2.4 Utilisation du modèle 3D

Un nombre important d'informations peut être tiré du modèle 3D. Pour ce faire, on importe le maillage sous le format « .obj » dans *Rhinoceros* et *Grasshopper*. Le modèle est ensuite orienté selon la disposition choisie au moment de l'essai, c'est-à-dire avec la fente de pré-retrait orientée vers le bas. Cette réorientation est possible grâce à la mesure de l'angle entre la fente de pré-retrait et une marque qui sert de référence, réalisée avant de faire la photogrammétrie, comme le montre la Figure 5.9.



FIGURE 5.9 – Angle de 128° entre la fente de pré-retrait et une marque pour réaliser la photogrammétrie

Le modèle étant correctement orienté, il est désormais possible de récupérer des informations géométriques classiques comme le périmètre, l'aire ou encore l'inertie à chaque endroit de la grume. Ces informations sont particulièrement intéressantes proche de l'endroit de rupture. En effet, il est possible de déterminer la contrainte maximale de

2. Processeur : 3,5 GHz 6-core Intel Xeon E5 / Mémoire RAM : 48 Go / Carte graphique : AMD FirePro D700 6144 MO

manière relativement précise en utilisant l'inertie de la grume dans le sens de chargement. La grume étant irrégulière, ceci est évidemment plus précis que de prendre simplement l'inertie d'un cercle.

Grâce au maillage texturé proposé par *Metashape*, il est également possible de visualiser numériquement la grume dans son état initial, c'est-à-dire avant la rupture. Ceci permet d'aider à mieux comprendre les mécanismes de rupture en analysant en amont les influences de certains paramètres comme les noeuds, la courbure ou encore les attaques d'insectes. En faisant plus d'essais, il serait peut-être possible de trouver un lien direct entre des défauts à certains endroits de la grume et la résistance espérée de cette dernière. Cette idée serait évidemment dans la continuité du classement visuel structural proposé par la norme allemande mais en y incluant l'influence de la position des défauts sur la résistance de la grume.

5.3 Mise en place de l'essai

La mise en place des essais a suivi les prescriptions de la norme NBN EN 14251 [7].

5.3.1 Les grumes

Les grumes testées sont issues du bois de Lauzelle situé à Louvain-la-Neuve, en Belgique. L'essence est de l'épicéa. Elles ont un diamètre nominal [3] variant de 22 à 32 cm pour une longueur aux alentours de cinq mètres. Avant les essais, les grumes ont été stockées dans la cour du laboratoire LEMSC.

Les dimensions des grumes testées sont conformes aux prescriptions de la norme NBN EN 14251 [7]. Les règles suivantes s'appliquent, en prenant les notations de la Figure 5.10 :

- Longueur totale : $L \geq 19 \cdot h$
- Longueur entre appuis : $l = 18 \cdot h \pm 3 \cdot h$
- Distance entre points d'application de la charge : $6 \cdot h$;
- Distance entre point d'application de la charge et appui : $6 \cdot h \pm 1,5 \cdot h$
- La symétrie autour du centre de l'élément doit toujours être vérifiée
- Les appuis sont simples : l'un à rotule, l'autre rouleau disposés à l'opposé de leur analogue au niveau des points d'application de la charge

3. Selon la norme NBN EN 14251 [7], le diamètre nominal vaut le diamètre moyen si la grume a une ovalisation inférieure à 5% et vaut le diamètre minimal si la grume a une ovalisation supérieure à 5%.

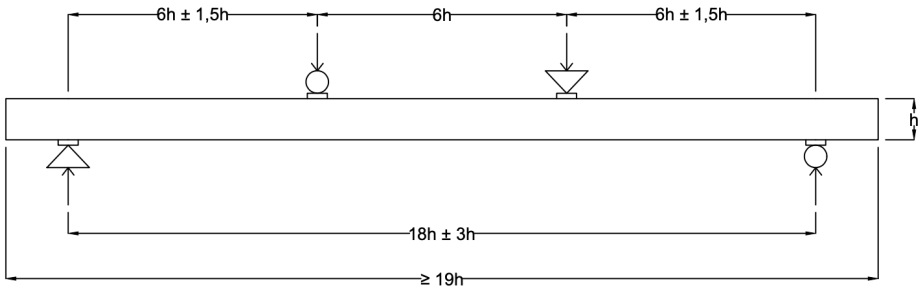


FIGURE 5.10 – Schéma du dispositif de flexion 4 points recommandé par la Norme NBN EN 14251 [7]

5.3.2 Matériel d'essai

Tester des grumes de cinq mètres de portée n'est pas chose courante au laboratoire. Il était donc indispensable de porter une attention particulière à tous les éléments nécessaires pour réaliser le montage du dispositif d'essai dont une schématisation réalisée sur *SolidWorks* se trouve en Figure 5.11.

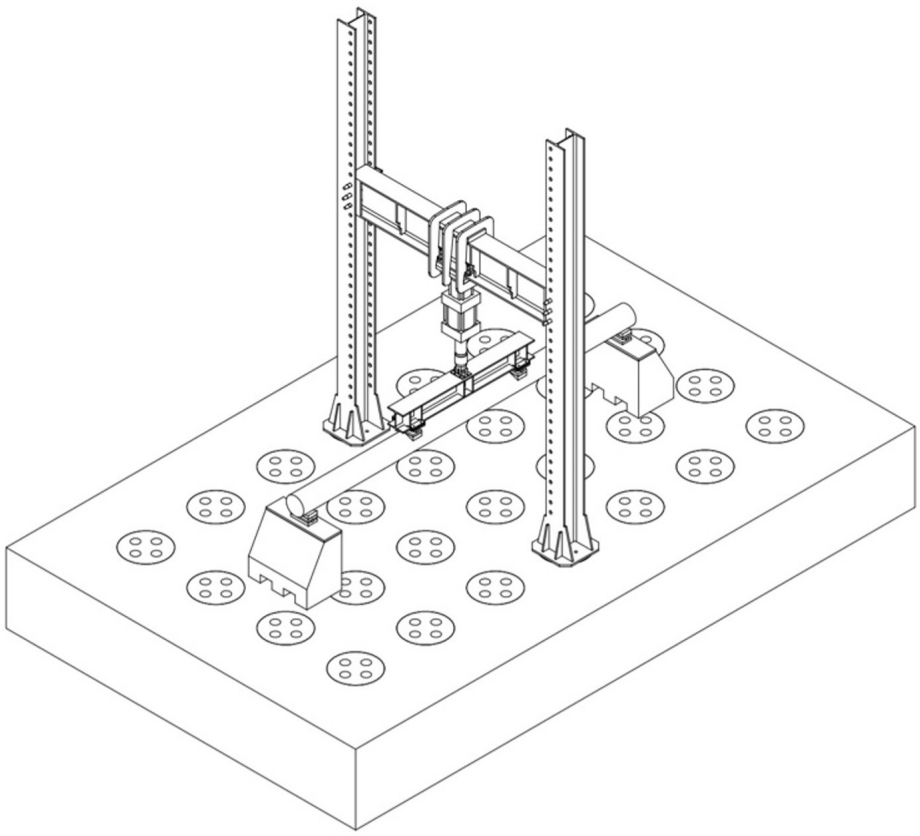


FIGURE 5.11 – Schéma *SolidWorks* du dispositif d'essai

Vérin

Un vérin d'une capacité maximale de 35 tonnes a été utilisé pour les essais. La cellule de force relative au vérin est d'une précision de 0,02% (Annexe L) et le capteur de déplacement relatif au vérin est d'une précision de 0,89% (Annexe L). Les grumes étant de dimensions assez variables, une rehausse est utile pour avoir une course de vérin assez importante. Une rotule permet également la jonction entre le vérin et la poutre de réparation afin que les charges se répartissent correctement sur les grumes dont la conicité est importante. L'ensemble du dispositif de mise en charge est présenté en Figure 5.12.

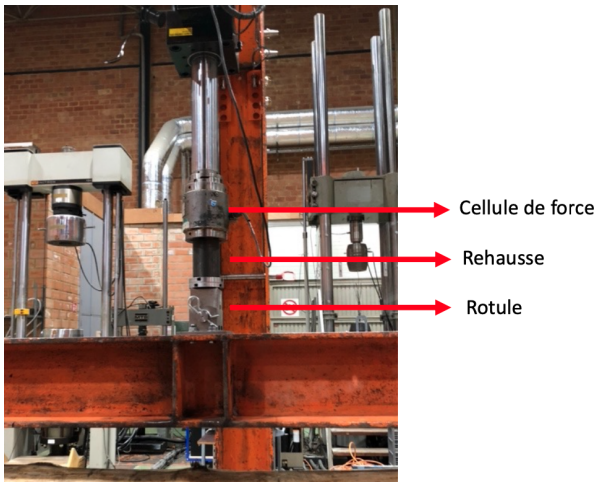


Figure 5.12 – Dispositif de mise en charge

Poutre de répartition

La poutre de répartition utilisée est de type HEB 260 et présentée en Figure 5.13.



Figure 5.13 – Poutre de répartition

Plots en béton

Il a été décidé avec le laboratoire LEMSC de concevoir des appuis en béton facilement transportable afin d'éviter de monopoliser un technicien de manière abusive. En effet, les grumes étant de dimensions variables, les distances du dispositif présentées à la Figure 5.10 devaient être adaptées pour chaque grume. Par conséquent, afin de faciliter cette mise en place, un plot en béton avec des encoches a été réalisé. Ce système permet qu'un transpalette puisse venir se glisser sous les appuis comme le montre la Figure 5.14.



FIGURE 5.14 – Plots en béton

Appuis

Afin d'éviter que les grumes puissent bouger pendant l'essai, des appuis en forme de « V » ont été utilisés. Ces derniers sont en acier et peuvent accueillir des grumes allant de 15 à 50 [cm] de diamètre.

De la même façon que les plots en béton devaient être facilement transportables, les appuis devaient l'être également. Pour les appuis relatifs à la poutre de répartition, un système de glissière a été conçu comme le montre la Figure 5.15. L'image de gauche présente l'appui rotulé et l'image de droite présente l'appui à rouleau.



FIGURE 5.15 – Appuis relatifs à la poutre de répartition

Pour les appuis relatifs aux plots en béton, ces derniers étaient simplement posés. Un système de cales, comme présenté à la Figure 5.16 a été utilisé. Ceci permettait de remonter l'extrémité de la grume dont le diamètre était le plus faible. Ceci permettait que la poutre de répartition soit le plus horizontal possible au moment de la mise en charge.



Figure 5.16 – Appuis relatifs aux plots en béton

5.3.3 Instruments de mesure

Un ensemble de huit appareils de mesure ont été utilisés lors de nos essais. Les références complètes de chaque instrument sont reprises en Annexe L. Une présentation générale de la disposition de ces instruments est présentée en Figure 5.17.

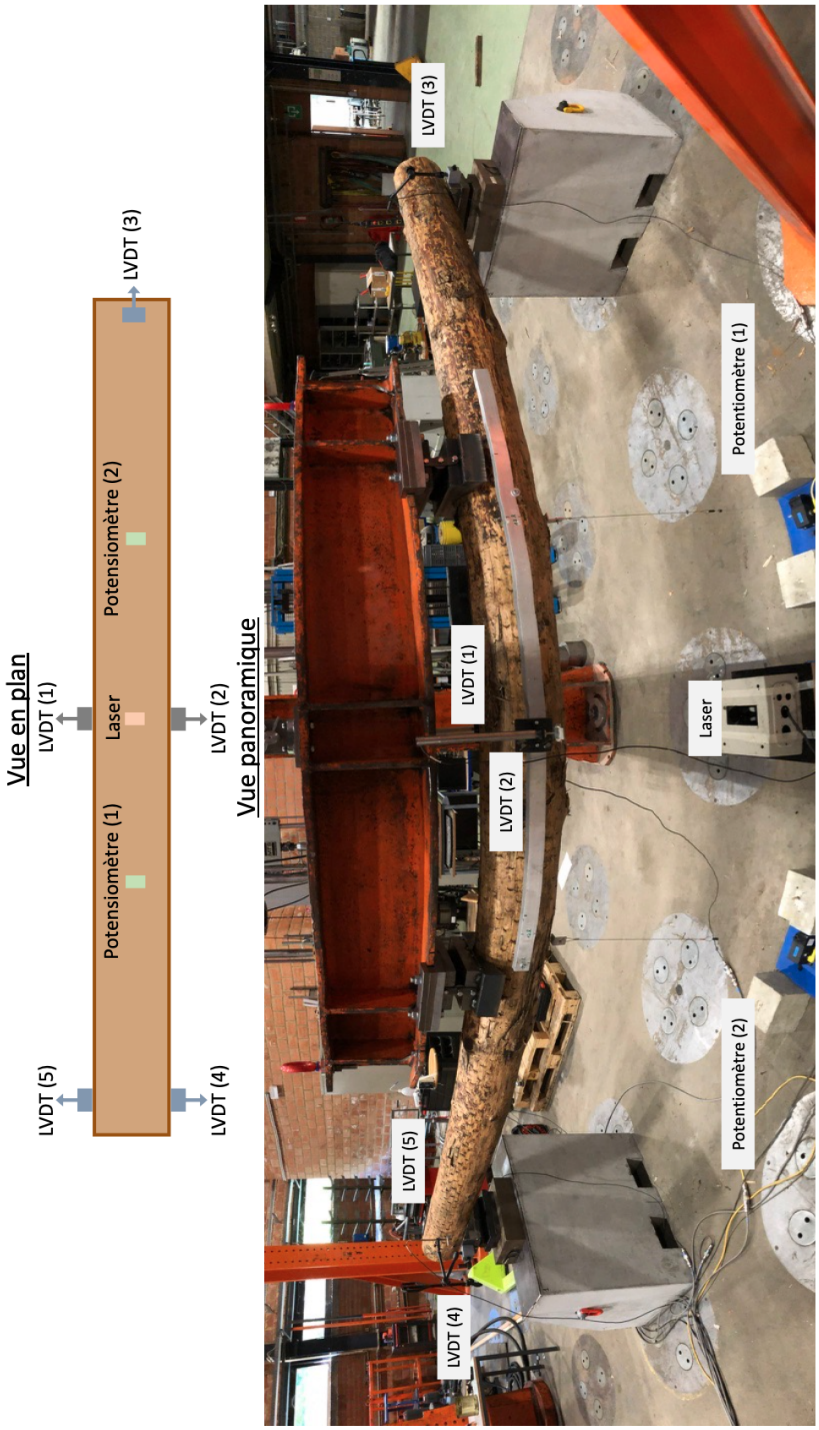


FIGURE 5.17 – Vues en plan et panoramique de l'ensemble des instruments de mesure

Mesure de la flèche globale

La flèche globale a été mesurée au centre de chaque grume à l'aide d'un laser d'une précision de 0,52% (Annexe L). L'utilisation d'un laser s'est justifiée par le fait qu'on pouvait le protéger dans une boite métallique et donc le laisser jusqu'à la rupture des grumes. Pour éviter tout endommagement, tous les autres capteurs devaient être retirés pour le cycle menant à la rupture. Comme le montre la Figure 5.18, une plaque d'aluminium collée sur le tronc (ou vissée si la grume est mouillée) permet que la mesure ne soit pas faussée par la fente de pré-retrait.



Figure 5.18 – Dispositif de mesure de la flèche globale

Mesures des flèches sous points d'attache du dispositif de flèche locale

Deux mesures de déplacement ont été prises sous chacun des points d'attaches du dispositif de flèche locale. Ces mesures ont été réalisées à l'aide de deux potentiomètres d'une précision de 0,1% (Annexe L et L). La Figure 5.19 montre ce dispositif de mesure. Il fonctionne à l'aide d'un fil qui se rétracte au fur et à mesure que la grume se déforme. Pour éviter d'endommager le capteur en cas de rupture prématurée de la grume, le fil est accroché à un aimant qui lui-même est tenu à une plaque d'acier collée sur la grume (ou vissée si la grume est mouillée). Seulement deux capteurs de cet acabit étaient disponibles au laboratoire. Le choix de les placer sous les points d'attache du dispositif de flèche locale permet deux choses. D'une part, ces deux potentiomètres, en complément du laser, permettent de faire l'approximation de la flèche maximale qui se trouve vraisemblablement dans la partie soumise au moment le plus important, c'est-à-dire dans le tiers central. D'autre part, comme les potentiomètres se situent sous les points d'attache du dispositif de flèche locale, la relation flèche globale égale à la flèche locale plus la flèche sous points d'attache devrait être respectée.



FIGURE 5.19 – Dispositif de mesure des flèches sous points d'attache du dispositif de flèche locale

Mesure de la flèche locale

La flèche locale a été mesurée au centre de chaque grume, de part et d'autre de la fibre moyenne, à l'aide de deux LVDTs d'une précision de 1,14% et 1,69% (Annexe L et L). La flèche locale est ensuite prise comme la moyenne de ces deux valeurs. Les gabarits, sur lesquels chaque LVDT est placé, sont fixés à une distance de cinq fois le diamètre de la grume. Comme le montre la Figure 5.20, le dispositif est légèrement en retrait par rapport à la grume pour éviter de toucher un noeud ou un appui en V.



FIGURE 5.20 – Dispositif de mesure de la flèche locale

Mesure des tassements aux appuis

Les tassements aux appuis ont été mesurés à chaque extrémité de la grume à l'aide de trois LVDTs d'une précision de 0,34%, 0,22% et 0,23% (Annexe L, L et L). D'un côté de la grume, deux LVDTs mesurent le tassement au niveau de la fibre neutre. De l'autre côté, un LVDT mesure le tassement directement sur l'extrémité supérieure de la grume. La Figure 5.21 présente ces capteurs. Le choix de mettre un ou deux LVDTs pour mesurer le tassement est délibéré. En effet, les deux mesures semblent correctes à prendre et l'objectif était de vérifier que ces dernières donnaient des résultats du même ordre de grandeur.



Figure 5.21 – Dispositif de mesure des tassements aux appuis

5.3.4 Validation du dispositif d'essai

Matériel d'essai

Chaque composant s'adaptait aux grumes testées et permettait une manutention relativement facile de celles-ci. Que ce soit les plots en béton ou les appuis en forme de V, tout était aisément maniable et permettait une mise en place rapide de l'essai. Cette rapidité est tout à fait essentielle vu que le dispositif doit être adapté pour chaque grume à cause de leur propriétés géométriques très variables. Il a d'ailleurs été possible de tester la robustesse des appuis et du système de mise en charge grâce à des grumes présentant

parfois des courbures importantes, une décroissance élevée ou encore une forte ovalité. Dans tous les cas, l'essai s'est déroulé normalement et aucune incohérence de mesure n'a été détectée.

Instruments de mesure

Tous les instruments de mesure fournissaient la précision attendue mais certains ne semblent pas être indispensables pour de futurs essais.

Pour les tassements aux appuis, trois mesures ont été prises mais aucun tassement significatif n'a été mesuré. Cependant, étant donné la mauvaise qualité des grumes, il est difficile de se prononcer. En effet, avec des grumes de meilleure qualité, la mise en charge pourra monter bien plus haut et éventuellement causer des tassements.

Pour la mesure de la flèche locale, cette dernière était peu pertinente et n'offrait pas d'informations utiles pour améliorer le protocole. Celle-ci est d'ailleurs la plus compliquée à mettre en oeuvre et il est évident que cette mesure ne sera plus prise dans un usage industriel. Sa précision est également discutable. En effet, lorsque l'on fait le calcul de la différence entre la mesure du laser et celle de la moyenne des potentiomètres, devant logiquement donné la mesure de la flèche locale, on obtient en moyenne une valeur éloignée de 20%. Ceci n'est pas étonnant. Estimer l'endroit de la fibre neutre, stabiliser le dispositif ou tout simplement fixer le dispositif sur une surface arrondie sans tant de paramètres qui complexifient une prise de mesure fiable de la flèche locale.

Pour les mesures de flèches réalisées à l'aide d'un laser et de deux potentiomètres, ces dernières étaient indispensables et on estime que ces trois mesures permettaient une compréhension suffisante de la déformée globale de la grume.

À retenir

Phase préparatoire des essais sur grumes :
- Relativement chronophage ;
- Réalisation d'un classement visuel « d'aspect » selon une norme belge et d'un classement visuel « structural » selon une norme allemande pour du bois rond ;
- Technique d'imagerie réalisée à l'aide de la photogrammétrie pour tirer les caractéristiques géométriques de l'élément ;
- Matériel d'essai robuste et instruments de mesure précis.

CHAPITRE VI

ESSAIS SUR GRUMES

6.1 Le protocole

Le protocole sur les grumes est bien entendu très proche de celui de la phase d'élaboration (p. 56) étant donné les résultats prometteurs. Il se passera comme suit :

1. **1er chargement ELS (cycles 1 à 5)** : Cinq cycles jusqu'à $l/250$ seront réalisés. Ils permettent de stabiliser la grume et de déterminer les propriétés mécaniques, la rigidité et la force maximale, avec certitude. En effet, les différentes valeurs convergent lorsqu'on multiplie les cycles allant à un même palier de déplacement imposé. Contrairement aux précédentes batteries, il est maintenant possible d'imposer un déplacement relatif. En d'autres mots, lors de son chargement, le vérin parcourra la distance $l/250$ peu importe le déplacement résiduel du cycle précédent. Cinq répétitions sont choisies car elles permettent d'identifier une convergence tout en restant dans le nombre d'itérations réalisées sur les éprouvettes équarries ;
2. **Chargement ELU (cycle 6)** : Un cycle chargera jusqu'à l'obtention de la force ELU F_{ELU}. En principe, celle-ci se détermine à l'aide de la force ELS, F_{ELS}, c'est-à-dire la force maximale mesurée lors du 1er chargement ELS. Cette détermination se fait conformément à ce qui a été décrit dans l'introduction : $F_{\text{ELU}} = 3,25 \cdot F_{\text{ELS}}$. Cette fois-ci, il sera possible de programmer le vérin pour calculer F_{ELU} en temps réel ;
3. **2e chargement ELS (cycles 7 à 11)** : Une deuxième série de cinq cycles jusque $l/250$ sera réalisée. Elle permet d'observer une éventuelle différence avec la première série et, dès lors, de déterminer l'impact du cycle jusque F_{ELU} ;
4. **Attente** : Un temps de repos de 10 minutes sous la charge minimale est laissé à la grume avant le chargement de vérification. Cette force sert à maintenir la grume en place, elle vaut environ 100 kg. Initialement, le délai prévu était de 5 minutes. Cependant, les premiers essais ont montré que 10 minutes permettent d'atteindre une stabilisation de la convergence du déplacement résiduel ;
5. **Chargement de vérification (cycle 12)** : Afin de contrôler que la grume est capable de dépasser F_{ELU}, un chargement comme en statique sera réalisé. Bien entendu, ce dernier chargement jusqu'à la rupture ne se fait que dans le cadre de ce travail. Il n'y aurait aucun intérêt à détruire la grume si on compte l'installer dans un bâtiment.

L'analyse complète est réalisée à l'Annexe G. Les éléments importants sont repris dans le corps du texte.

6.2 « Nervience »

L'explication de ce qui est entendu par « nervience » se basera sur la Figure 6.1. Elle donne une vue d'ensemble du comportement de la grume 1. Malgré la mauvaise qualité des grumes, le comportement attendu a tout de même été atteint. En effet, ce comportement est très proche de celui observé sur les éprouvettes équarries (Figure 4.5). Il existe au moins trois informations clés sur la Figure 6.1, celles-ci sont les caractéristiques de la « nervience ».

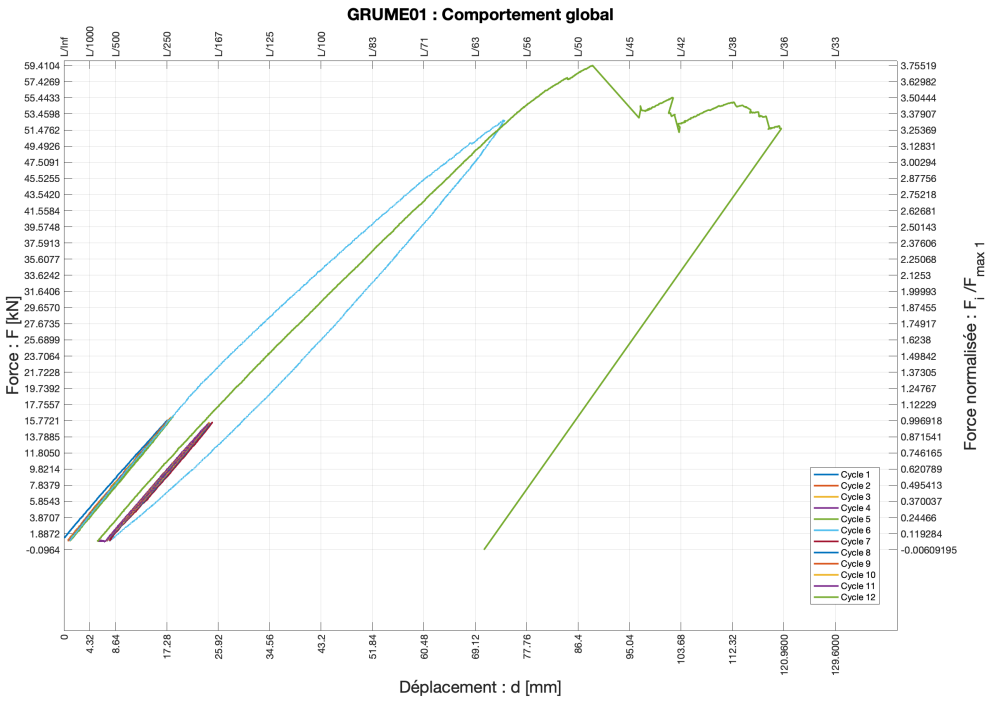


FIGURE 6.1 – Comportement global de la grume 1

6.2.1 Rupture en cascade

Comme la Figure 6.2 le montre, sur la majorité des grumes la rupture se déroule en plusieurs temps. Entre chaque pré-rupture, la grume regagne un peu de résistance. Ce phénomène est la transposition mécanique de ce qu'on appelle le « nerf du bois », comme expliqué au Point 4.2.2, à la page 55.

Cette propriété est-elle propre à l'épicéa ? Est-elle liée à la vitesse de chargement ? Tant de questions nécessitent de plus amples études.

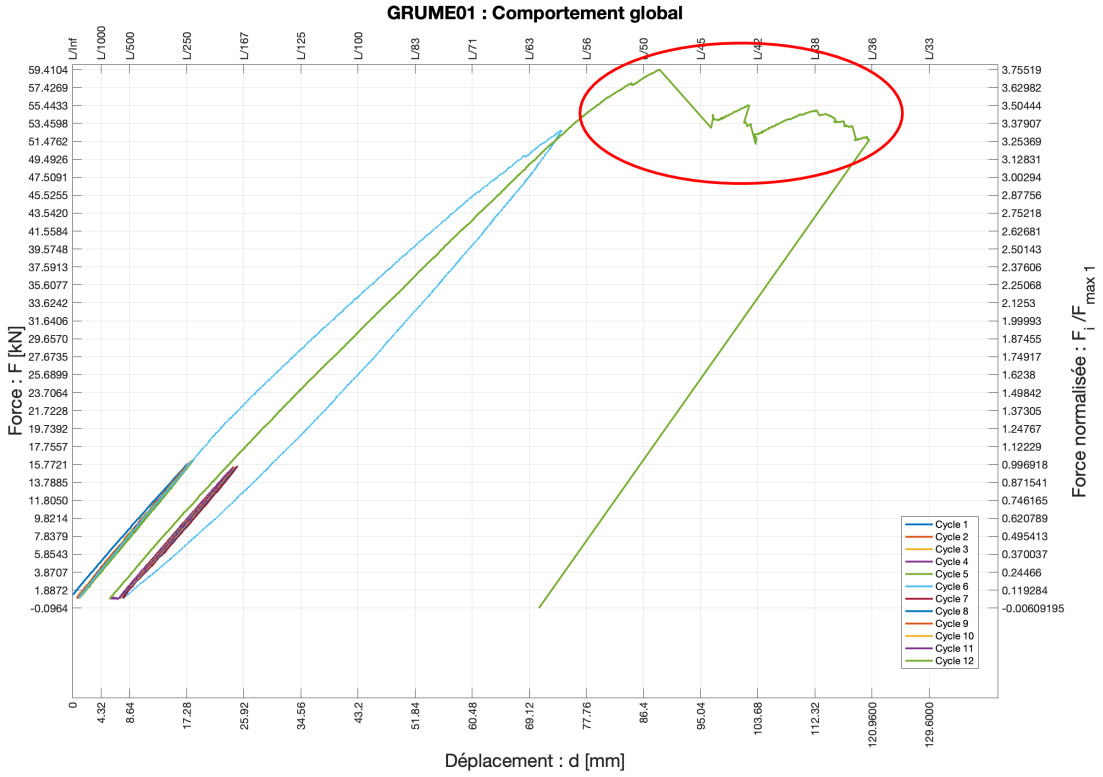


Figure 6.2 – Comportement global de la grume 1 avec mise en évidence de la rupture en cascade

6.2.2 Réduction de la plasticité par action du temps

La Figure 6.3 met en évidence la réduction de plasticité observée par une simple attente tout en maintenant une charge minimale afin que la grume reste en place. Il était certes attendu que le délai soit favorable au vu des essais sur éprouvettes équarries. Cependant, le gain en seulement 5 minutes est de 20%. Ceci est prometteur si on sait que les grumes seront testées puis laissées tranquilles pendant éventuellement plusieurs semaines avant d'être mises en place dans un bâtiment.

Quelle est la réduction maximale que l'on peut espérer ? Quelle est la valeur de l'asymptote ? Quand est-ce qu'elle devient problématique ? Tant de questions nécessitent de plus amples études.

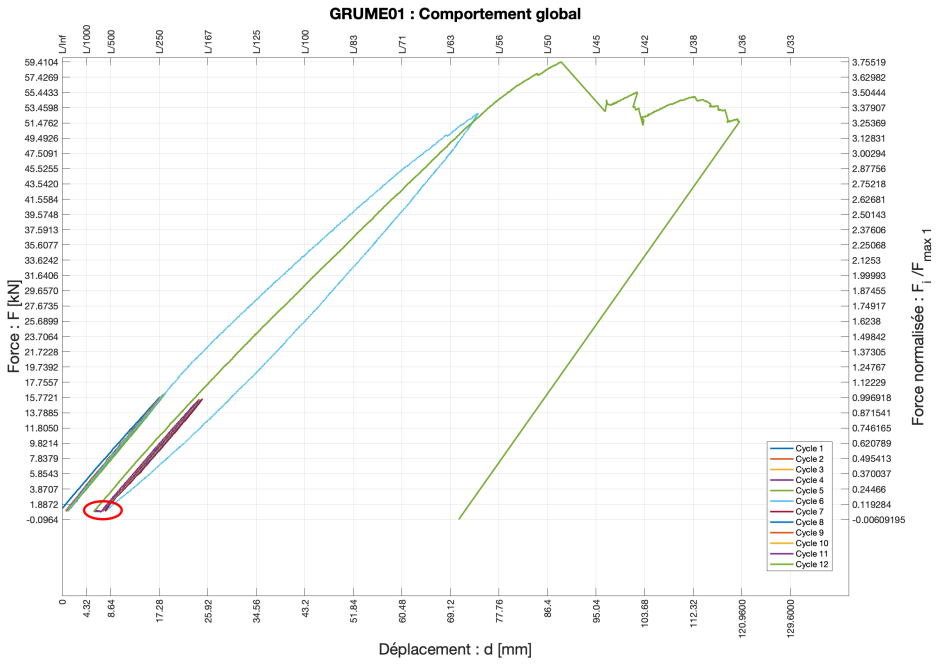


FIGURE 6.3 – Comportement global de la grume 1 avec mise en évidence de la diminution de la plasticité

6.2.3 Repasse par le dernier extremum

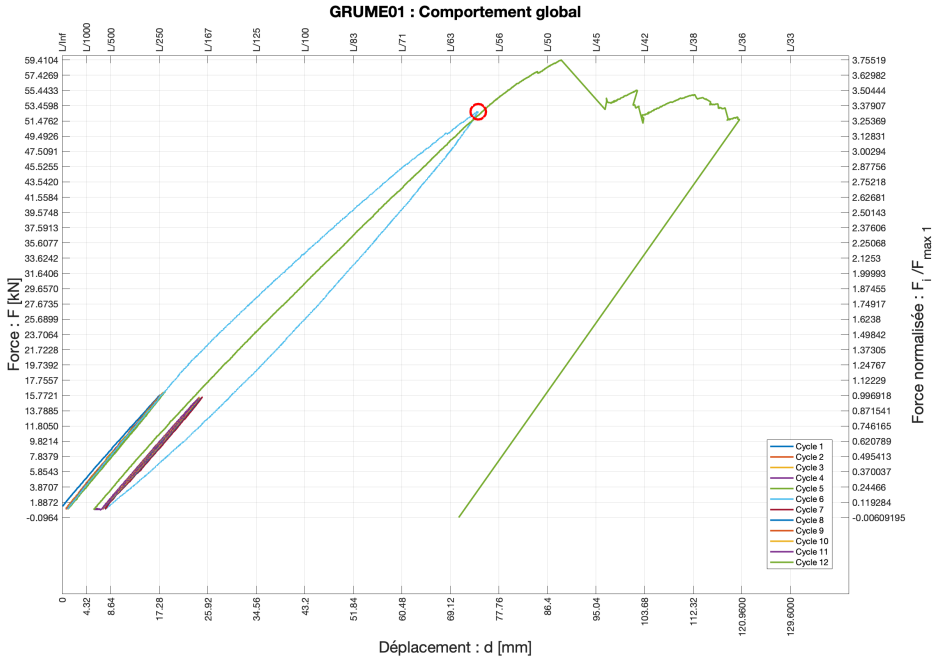


FIGURE 6.4 – Comportement global de la grume 1 avec mise en évidence du second passage par le dernier extremum

La dernière caractéristique, et pas des moindres, est la repasse de la grume par le dernier extremum de chargement atteint. Certes, la verte passe un tantinet en-dessous. Comme nous le voyons sur la Figure 6.4, la courbe verte passe à 2 ou 3% de la pointe de la courbe bleue. Cela n'est pas grave. Effectivement, la force maximale atteinte lors du deuxième chargement ELS est légèrement inférieure. Par conséquent, la force ELU calculée à partir de celle-ci est plus petite que celle du chargement ELU. La magie est que la courbe verte passe au-dessus de cette nouvelle force ELU comme le montre la Figure 6.5.

Cette propriété tout à fait insolite demande confirmation au près d'autres essences.

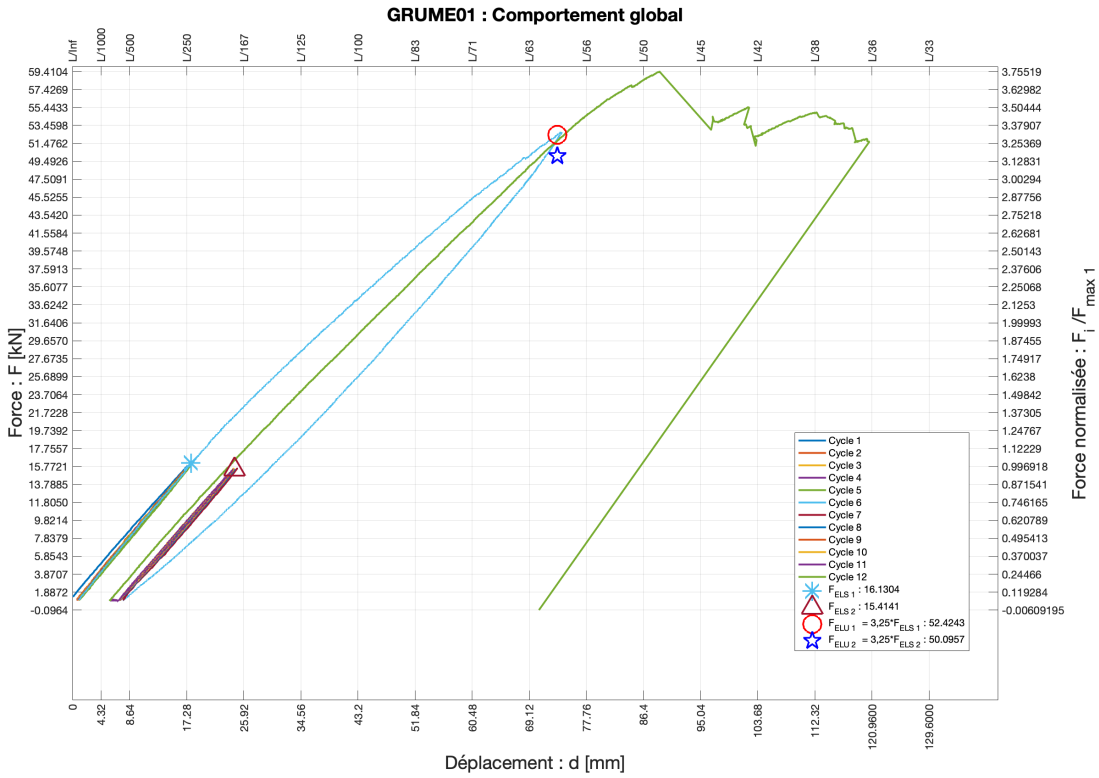


Figure 6.5 – Comportement global de la grume 1 avec mise en évidence des forces ELS mesurées et des forces ELU calculées à partir de ces mesures

6.3 Conclusion

Dans le présent chapitre, la grume 1 a été prise en exemple. Il est important de rappeler que l'analyse des autres grumes, en particulier celles ayant passé le protocole (grumes 9, 12, 19 et 20), est faite à l'Annexe G.

La repasse par le dernier extremum, la réduction de la plasticité par action du temps et la rupture en cascade sont des phénomènes résultant d'une même cause. Le bois veut au mieux résister aux charges et s'adapte en conséquence. Nous appelons cette volonté la « nervience ». Il s'agit de la grande découverte expérimentale de ce mémoire.

Le plus incroyable est que ces observations sont vraies malgré une rupture subtile de la grume. Les yeux avertis auront remarqué une anomalie dans la montée du cycle 6 sur les Figures 6.1 à 6.5. En effet, vers 50 kN, la courbe est légèrement plate. Cette anomalie de la courbe montre une petite rupture du bois. D'ailleurs, lors de l'essai, cette rupture a été entendue. La Figure 6.6 met en évidence l'anomalie. D'autres grumes montrent ce phénomène de manière plus exacerbée (par exemple Figure **??**).

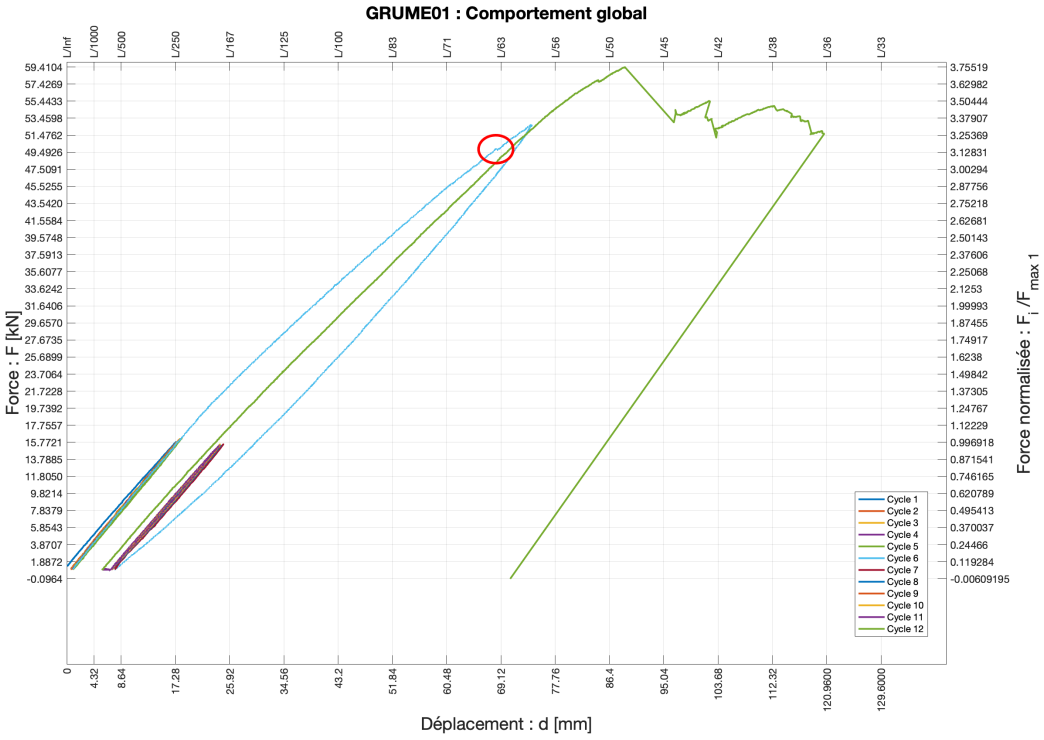


FIGURE 6.6 – Comportement global de la grume 1 avec mise en évidence de l'anomalie

Bien que les informations tirées des grumes ne soient pas généralisables, le Tableau 6.1 donne les informations importantes les concernant. On peut y voir que seules les grumes 1, 9, 12, 19 et 20 ont survécu au protocole. Globalement, la déformation à la rupture est relativement faible comparée à celle obtenue sur les éprouvettes équarries. Les contraintes sont terriblement basses par rapport à la littérature [53]. La rigidité flexionnelle baisse de 5 à 15% entre le premier et le second chargements ELS. En moyenne, le déplacement résiduel après temps de repos de 10 minutes vaut entre 5 et 10% du déplacement à la rupture.

Naturellement, au vu des résultats, il ne peut être que conclu que le protocole est valable. Tout du moins dans le cadre des grumes qui, malgré leur état, ont pu le passer.

Grume	Aboutissement protocole oui/non	Humidité NBN EN 13183 [%]	Densité humide [kg/m^3]	Flèche relative à la rupture	Contrainte à la rupture [MPa]	Endommagement $\frac{\bar{EI}_{(7\ à\ 11)}-\bar{EI}_{(1\ à\ 5)}}{\bar{EI}_{(1\ à\ 5)}}$ [%]	Plasticité $d_{\text{résiduel}}/d_{\max}$ [%]
1	oui	18,0	471,4	$l/48,65$	36,88	-6,76	6,26
2	non	25,7	537,2	$l/48,04$	28,04		
3	non	21,8	493,9	$l/62,26$	36,14		
4	non	23,5	494,9	$l/67,16$	36,61		
5	non	24,6	533,5	$l/69,33$	23,80		
6	non	24,6	529,1	$l/87,51$	20,74		
7	non	25,6	517,6	$l/67,91$	34,51		
8	non	27,3	519,0	$l/44,74$	14,21		
9	oui	22,6	540,9	$l/42,37$	32,00	-7,52	4,76
10	non	23,2	517,6	$l/85,65$	31,18		
11	non	27,0	590,0	$l/77,36$	40,36		
12	oui	22,0	485,0	$l/45,73$	33,33	-15,9	9,77
13	non	25,5	492,2	$l/47,09$	37,90		
14	non	30,6	532,4	$l/61,68$	23,58		
15	non	43,3	506,7	$l/96,46$	14,42		
16	non	22,0	529,0	$l/76,84$	21,18		
17	non	23,1	513,8	$l/84,17$	38,95		
18	non	22,1	488,9	$l/43,19$	21,74		
19	oui	22,8	501,7	$l/48,89$	38,68	-12,98	6,28
20	oui	30,3	575,9	$l/49,86$	29,71	-14,66	5,84
21	non	24,7	477,3	$l/67,46$	23,56		

Tableau 6.1 – Tableau récapitulatif des grumes

CHAPITRE VII

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

7.1 Conclusion

Il est temps de prendre du recul sur le travail accompli et de rappeler les points clefs permettant la compréhension globale de la problématique de ce mémoire. Cette dernière est l'établissement d'un protocole d'essai non destructif dont l'objectif est de caractériser les propriétés mécaniques des grumes.

Le sujet de ce travail s'inscrit dans une rationalisation de l'utilisation du bois. Habituellement, les propriétés mécaniques d'un élément de structure sont déduites de celle de son matériau. Malheureusement, une telle approche est particulièrement punitive pour le bois car, à cause de sa grande variabilité et de sa complexe combinaison de comportement, il est difficile de donner des valeurs de propriétés propres au matériau sans prendre une grande marge de sécurité. La philosophie derrière ce travail est alors de ne plus réfléchir en termes généraux mais spécimen par spécimen. Autrement dit, l'objectif n'est plus de trouver une valeur de résistance ou de rigidité valable pour toute une espèce mais d'en donner une pour chaque élément testé. Plus précisément, les éléments étudiés sont des grumes, c'est-à-dire des arbres abattus et ébranchés. Deux autres avantages majeurs sont également à retenir pour les grumes. En effet, étant donné qu'elles sont une des formes les plus brutes de l'arbre, elles représentent des coûts économique et écologique inférieurs en rapport avec les éléments usinés.

Afin de comprendre le bois, de déterminer et évaluer les paramètres influençant le protocole, une pléthore d'essais sur des éprouvettes équarries de petites dimensions et sans défaut a été réalisée. Malgré un comportement globalement élastoplastique, la transition entre le domaine élastique et plastique n'est pas nette. Il est difficile de parler d'élasticité ou de plasticité puisque les mêmes comportements ont été observés tout du long des chargements des éléments. Seule l'intensité de ceux-ci diffère. Quoi qu'il en soit, sur éprouvettes équarries, cette transition se fait entre des déplacements imposés de $l/55$ et $l/40$. Les batteries d'essais ont pu mettre en évidence une influence favorable d'un délai d'attente entre deux cycles de chargement-déchargement. Par contre, les vitesses de chargement et de déchargement n'ont que peu d'impact. La répétition de cycles à une même valeur de déplacement imposé ne crée aucun problème dans le bois et permet d'observer une convergence de ses propriétés. Cependant, la multiplication de paliers de déplacement imposé est à proscrire. Ces essais sur échantillons de petites dimensions ont surtout pu mettre en évidence la « nervience ».

Pour confirmer ces découvertes, des essais sur grumes ont été réalisés. Avant cela, elles ont été classées visuellement. Deux classements ont été suivis : une norme belge dite « d'aspect » et une allemande dite « structurale ». L'objectif de cette démarche est double. D'une part, les contrôles de la qualité des grumes et de leur représentativité par rapport aux classes d'épicéa généralement rencontrées en Belgique. D'autre part, de comparer les possibilités offertes par des classements visuels avec celles d'un mécanique. À cette occasion, des modèles 3D des grumes ont été réalisés à l'aide d'un système d'imagerie. Ils permettent de garder une trace informatique de la géométrie de la grume ainsi que de déterminer avec précision l'inertie, l'aire des sections, la courbure, ... Ces données sont difficiles à prendre directement sur les grumes car elles ont des dimensions

variant de manière indéterminée tout le long de la grume.

Les essais mécaniques sur grumes ont montré que les appuis et différents dispositifs créés pour l'occasion sont globalement fiables. Malheureusement, il s'est avéré que les 21 grumes testées étaient fortement dégradées. Elles montraient de sérieux signes d'altération biologique, bleuissement et échauffure, ou encore d'autres défauts, bois de réaction et roulure, les déclassant automatiquement de toute utilisation structurale. Il est dès lors tout à fait impossible de tirer des conclusions généralisables à toutes les grumes. Toutefois, les 5 grumes ayant procédé à la totalité du protocole se sont comportées comme attendu à la suite des essais sur éprouvettes équarries. En effet, la « nervience » a à nouveau été observée. Il s'agit là principalement de la capacité du bois à repasser très près [1] de son dernier extremum de chargement. Autrement dit, dans le plan force-déplacement (ou contrainte-déformation), un nouveau chargement repassera par le dernier maximum atteint.

L'aboutissement du travail est le protocole suivant :

1. **1er Chargement ELS** : Cinq cycles jusque δ_{ELS} ;
2. **Chargement ELU** : Un cycle charge jusqu'à l'obtention de la force ELU, F_{ELU}, se déterminant en appliquant le facteur multiplicateur θ à la force maximale mesurée lors du 1er Chargement ELS ;
3. **2e Chargement ELS** : Une deuxième série de cinq cycles jusque δ_{ELS} permettant d'observer toute variation avec la première.

Les informations retirées sont la rigidité prise sur les derniers cycles du 2e Chargement ELS et la résistance donnée par $F_{\text{ELU}} = \theta \cdot F_{\text{ELS,2}}$ où $F_{\text{ELS,2}}$ est la plus petite force maximale des derniers cycles du 2e chargement ELS. À toute fin utile, la force liée au déplacement autorisé, c'est-à-dire la plus grande force maximale des derniers cycles du 2e Chargement ELS est fournie.

Il ressort de ce travail que la détermination non destructive des propriétés mécaniques des grumes à l'aide d'un essai en flexion 4 points est possible. Cependant, étant donné la mauvaise qualité des grumes, il est nécessaire de vérifier les résultats obtenus sur des éléments sains. Une série de perspectives et de pistes d'améliorations est détaillée dans la section suivante.

1. Sur grumes de qualité médiocre, la différence était de 2 à 3%.

7.2 Perspectives

7.2.1 Point de vue scientifique

Réalisation d'essais sur éprouvettes équarries issues des grumes testées

Les grumes testées dans ce travail n'étaient pas de bonne qualité. En effet, elles présentaient de nombreuses altérations biologiques comme de la pourriture ou de l'échauffure ainsi que des noeuds, parfois morts et pourris, de dimensions conséquentes. Ces défauts sont probablement une des causes de leurs mauvaises propriétés mécaniques.

Il serait intéressant de tester des échantillons équarris de petites dimensions issus de ces grumes. Cela permettrait de comparer leur comportement avec celui du bois à l'échelle d'une grume. Pour ce faire, il faudrait dans un premier temps prélever des échantillons dans des zones avec et sans échauffure pour permettre d'isoler son influence sur les propriétés mécaniques de la grume. La même chose peut être réalisée dans des zones de bleuissement ou comportant d'autres altérations. Il sera également intéressant de pouvoir tester des échantillons issus du bois juvénile et adulte de la grume.

Réalisation d'essais sur d'autres grumes

Dans ce mémoire, seul un certain type de bois a été testé. En l'occurrence, les troncs d'arbres étaient de l'épicéa issus du bois de Lauzelle à Louvain-la-Neuve en Belgique, dont les diamètres variaient de 22 à 32 centimètres pour des longueurs aux alentours de 5 mètres.

Il est clair que la suite du travail doit s'ouvrir à de nouvelles essences, provenances, dimensions ou encore à des âges différents. L'épicéa n'est peut-être pas l'essence la plus adaptée à la construction en bois brut. De surcroît, les comportements identifiés pourraient ne lui être que propre.

Développement de méthodes numériques

Il serait intéressant de développer des méthodes numériques capables, à partir de la force et du déplacement, de connaître toutes les caractéristiques importantes de l'élément comme son module de Young E et son inertie I sur toute la longueur. En effet, il est probablement possible de disposer stratégiquement quelques capteurs sur la fibre inférieure de la grume. Avec un modèle, on pourrait alors faire une approximation de sa déformée. Ceci permettrait de s'affranchir des méthodes d'imagerie des grumes comme la photogrammétrie.

Établissement de la relation entre le court terme et le long terme

Pour l'établissement du protocole, on se base sur une hypothèse de court terme. En effet, les valeurs certifiées par le protocole d'essai ne prennent pas en compte les effets dans le temps. Pour ce faire, il faudrait mettre en oeuvre des grumes dans des situations réelles et, après un certain temps, vérifier que les performances mécaniques attendues de la grume soient toujours atteintes.

Passage d'échantillons équarris à des grumes

À l'avenir, il serait intéressant de pouvoir déterminer une loi de transposition entre le comportement général sur échantillons équarris et celui sur grumes. Ceci permettrait de diminuer la quantité d'essais sur ces dernières. Le gain de temps et d'argent seraient considérables au vu de la difficulté de manutention des grumes ainsi que leurs prix en comparaison avec des échantillons équarris de petites dimensions.

Ceci n'est évidemment possible que si les comportements des échantillons équarris et des grumes sont tous les deux maîtrisés. Il faudrait, pour chacun d'eux, trouver les relations d'évolution du déplacement résiduel et de la rigidité. Cette tâche semble ardue puisqu'aucune différence nette entre les régimes élastique et plastique n'a pu, à ce jour, être identifiée.

7.2.2 Point de vue industriel

Conservation des grumes

La conservation des grumes est un point d'attention important. Deux paramètres jouent un rôle décisif : la durée et la méthode de conservation. Dans notre cas, les éléments sont restés plus d'un an en forêt. Des risques de dégradation par attaques d'insectes et de champignons étaient à prévoir. D'autres méthodes de conservation sont évidemment bien plus efficaces pour éviter d'altérer la grume. Elles peuvent être principalement de trois types :

- Méthode de conservation par **voie sèche** : « elle consiste à sécher le bois pour le protéger des champignons et à le maintenir à une humidité inférieure à 20% » [16] ;
- Méthode de conservation par **voie humide** : « elle consiste à maintenir le bois à une humidité supérieure à 80 % ce qui évite le développement des champignons et insectes incapables de survivre dans des milieux saturés en eau » [21] ;
- Méthode de conservation en **atmosphère confiné** : « elle consiste à mettre le bois dans une atmosphère appauvrie en oxygène stoppant ainsi tout développement d'espèce vivante aérobie » [21].

Le type de conservation dépend évidemment de l'humidité que l'on souhaite avoir pour réaliser nos essais. Soit les essais se déroulent directement après abattage de l'arbre et

le bois sera alors encore à l'état vert ou du moins humide, soit ils sont réalisés après conservation et il est alors possible que le bois soit séché. Quoi qu'il en soit, conserver correctement le bois est primordial pour obtenir les meilleures conditions possibles.

Photogrammétrie

La photogrammétrie est un outil remarquable par sa simplicité d'utilisation. Par contre, elle n'est guère adaptée à un processus industrialisé. En effet, ce système n'est pas automatique puisqu'une intervention humaine est nécessaire pour prendre les photos et ensuite réaliser le traitement du modèle. À l'avenir, il serait intéressant d'explorer d'autres techniques d'imagerie des troncs comme le système *Chroma+scan* qui permet de scanner une grume automatiquement dès son arrivée à la scierie [43].

Optimisation du magasin de grumes

Cette idée vient en amont de la problématique de ce mémoire. En effet, elle s'inquiète de la fourniture des grumes. La méthode la plus optimisée d'utiliser le bois est de passer par un magasin où le stock de spécimens serait infini. Pour rendre cela possible, il est nécessaire d'optimiser les moyens d'entreposage et la base de données relative.

Validation du dispositif d'essai

Le dispositif expérimental utilisé pour tester les 21 grumes a fonctionné correctement, que ce soit au niveau du matériel d'essai ou des instruments de meure. Les deux objectifs principaux du dispositif d'essai étaient une manutention des grumes faciles et un système d'appuis robuste, même pour des grumes tordues. Ces conditions sont remplies ! Pour autant, il serait intéressant d'approfondir encore l'utilité de tous les capteurs de mesure, surtout pour un objectif d'application industrielle. En effet, les mesures choisies doivent être peu nombreuses et faciles à mettre en place pour assurer un flux important de grumes.

ANNEXE A

RÉDUCTIONS DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE DE SÉCHAGE

Table 2. Strength Properties Reduction (%) of Different Wood Species Influenced by Temperature during Drying (according to Teischinger 1992 and updated) #

Botanical Name	T(°C)	MOR	MOE	CS	SS	Reference
Softwoods						
Abies balsamea	116	16				Cech, Huffman (1974)
Larix decidua	120	0	0			Frühwald (2007)
Larix decidua	170	0	0			Frühwald (2007)
Larix decidua	190	0	0			Frühwald (2007)
Picea abies	103	9.1	7.1	6.7		Müller et al. (2003) *
Picea abies	110	0	0			Teischinger (1992)
Picea abies	115	9.5	0			Bengtsson, Betzold (2000)
Picea abies	116	s.r.		s.r.		Egner (1952)
Picea abies	120	11.5	0			Bengtsson, Betzold (2000)
Picea abies	120	5.5	0			Frühwald (2007)
Picea abies	170	7.4	0			Frühwald (2007)
Picea abies	190	2.3	0			Frühwald (2007)
Picea abies	200	44 - 50	0			Bekhta, Niemz (2003) **
Picea abies	210	16	d.r.			Frühwald (2007)
Picea glauca	116	4	3			Cech, Huffman (1971)
Picea glauca	116	10				Cech, Huffman (1974)
Picea glauca	160-180	13.7	15			Zhou, Smith (1991) **
Picea sitchensis	138	d.r.		0		Köhler (1933)
Picea sitchensis	160	s.r.	s.r.			Kubojima et al. (2000)
Pinus banksiana	116	16				Cech, Huffman (1974)
Pinus contorta	104	5	i. 2		2.5	Troxell, Luza (1972)
Pinus contorta	104	10	3		9.6	Troxell, Luza (1972)
Pinus palustris	100	8	i.6			Thompson Stevens (1972)
Pinus palustris	107	14	i.13			Thompson Stevens (1972)
Pinus palustris	110	0				Comstock (1963)
Pinus palustris	116	4				Koch (1971)
Pinus palustris	116	0	0			Yao, Taylor (1979)
Pinus palustris	83.3		1.6	6.1		Thompson (1969)
Pinus sylvestris	60	17.2	12.8			Terziev, Daniel (2002)
Pinus sylvestris	100				3	Sehlstedt-Persson (1995)
Pinus sylvestris	110			→9	→12	Leont'ev et al. (1957)
Pinus sylvestris	110	3		0		Schneider (1973)
Pinus sylvestris	115				17	Sehlstedt-Persson (1995)
Pinus sylvestris	115	7.8	5.4			Terziev, Daniel (2002)
Pinus sylvestris	116	0	0			Comben (1955)
Pinus sylvestris	121		0			Petri, Ananyin (1960)
Pinus sylvestris	130	0		i. 1		Schneider (1973)

Figure A.1 – Réductions des propriétés mécaniques pour un très grand nombre d'essences en fonction de la température de séchage

Pinus sylvestris	130	8		6		Schneider (1973)
Pinus sylvestris	150	7		i. 2		Schneider (1973)
Pinus sylvestris	150	30		7		Schneider (1973)
Pinus sylvestris	180	19		2		Schneider (1973)
Pinus sylvestris	180	32		2		Schneider (1973)
Pseudotsuga menziesii	94	3	1			Graham (1957)
Pseudotsuga menziesii	104	7	8			Graham (1957)
Pseudotsuga menziesii	107	10	5	i.6		Eddy Graham (1955)
Pseudotsuga menziesii	110	→15				Comstock (1963)
Pseudotsuga menziesii	110	→20	0			Kozlik (1968)
Pseudotsuga menziesii	110	5	12		15-20	Kozlik(1967)
Pseudotsuga menziesii	110	17		→14		Salamon (1963)
Pseudotsuga menziesii	121	13	2	12		Eddy Graham (1955)
Tsuga canadensis	71-113	0-s.i.		0-s.i.		Salamon (1965)
Tsuga canadensis	107	0		0		Salamon (1965)
Tsuga canadensis	>100	0				Ladell (1953)
Tsuga heterophylla	110	0	0			Kozlik (1968)
Tsuga heterophylla	110	12	4		8	Kozlik(1967)
Tsuga heterophylla	116	8.1	0		14	Thiam et al. (2002)
Hardwoods						
Alnus rubra	115	0	0			Layton et al. (1986)
Betula alleghaniensis	102-104		s.r.			Ladell (1956)
Betula papyrifera	200-230	d.r.	0			Poncsák et al. (2006)
Fagus sylvatica	110	4		i.3		Schneider (1973)
Fagus sylvatica	116	s.i.	s.i.	s.i.		Keylwerth (1952)
Fagus sylvatica	130	7		i.3		Schneider (1973)
Fagus sylvatica	150	9		i.16		Schneider (1973)
Fagus sylvatica	180	23		i.4		Schneider (1973)
Liriodendron tulipifera	113	0	i.4			Gerhards (1983)
P. tremula x tremuloides.	180	13.7	i. 2.5	i. 13		Junkkonen, Heräjärvi (2006)
Populus tremula	180	8.5	i. 12.7	i. 12.5		Junkkonen, Heräjärvi (2006)

Legend: SS-shear strength; CS-compression strength; MOR-modulus of rupture; MOE-modulus of elasticity; d.r.-definite reduction; d.i.- definite increase; s.r.-slightly reduced; s.i.-slightly increased; i. -increased; → up to

Values given are compared to low or normal temperature drying (exceptions: *-compared with DIN 68364 (1979); **-compared with HT-drying). Due to incomplete information, strength adjustments for moisture content differences were not made.

FIGURE A.2 – Réductions des propriétés mécaniques pour un très grand nombre d'essences en fonction de la température de séchage

ANNEXE B

ANALYSE STATISTIQUE

L'objectif de cette partie est de décrire l'approche statistique prise pour traiter les résultats des essais. Une étude statistique a deux avantages majeurs. Premièrement, elle permet de montrer que les différents essais sont comparables entre eux. En effet, en montrant la constance de certains paramètres à travers les différents types d'essai, il est mis en évidence que les différences de comportement sont relatives au type d'essai et non à une variation due aux éprouvettes. Deuxièmement, elle permet de généraliser des valeurs sur l'ensemble d'une population d'échantillons. Au lieu de comparer les valeurs de chaque éprouvette aux autres, il est possible de tirer des valeurs globales propres au type de l'essai étudié.

Afin de procéder à une telle étude, la norme NBN EN 14358 [11] a été suivie. Elle indique la démarche afin de déterminer des valeurs « caractéristiques » et moyennes. Une valeur « caractéristique » est « une estimation de la propriété de la population de référence et peut être fondée sur une valeur correspondant au fractile à 5% d'exclusion pour la résistance ou la masse volumique ainsi qu'une valeur moyenne pour la rigidité » [11] . Autrement dit, la valeur caractéristique d'une propriété est la valeur pour laquelle la valeur « réelle » sera supérieure dans 95% des cas. Ces valeurs caractéristiques sont importantes dans la conception de bâtiments et est l'approche retenue jusqu'à présent. Elle permet de s'assurer que l'élément placé dans la structure tiendra le coup. Cependant, cette approche peut être terriblement punitive si le matériau étudié a une courbe de Gauss plate. Par exemple, en prenant 100 éléments allant d'une valeur de 1 à 100 par pas de 1, la valeur caractéristique avec laquelle on concevrait les ouvrages sera de 5 pour tous les éléments. Nous pouvons ici directement constater la perte immense. Bien entendu, comme vous le savez maintenant, le bois est un matériau ayant des propriétés aux valeurs éparses.

Étant donné que ce travail cherche à comprendre le matériau bois et à s'affranchir de cette approche punitive, les conclusions se baseront sur le comportement réel du bois. Autrement dit, elles seront tirées des valeurs moyennes. Dans la suite de cette annexe, il est expliqué la méthode prescrite par la norme NBN EN 14358 [11].

Avant toute chose, il convient de définir un niveau de confiance, α. Il représente la probabilité que la valeur caractéristique réelle soit supérieure à celle estimée. En effet, la valeur trouvée n'est qu'une estimation. La norme recommande d'utiliser $\alpha = 75\%$. Ce pourcentage est également utilisé par la norme EN 1990 [6].

La valeur caractéristique est définie en statistique de la manière suivante : « La valeur caractéristique m_k d'un paramètre de résistance de matériau ou d'une résistance m modélisée sous la forme d'une variable aléatoire, est définie comme étant le fractile d'ordre p dans la fonction de distribution de m, correspondant à une série d'essais supposée infinie ». p doit être pris comme égal à 5 %.

B.1 Détermination des valeurs caractéristiques à 5 et 95 % d'exclusion

La norme décrit 2 méthodes de détermination des valeurs caractéristiques. La première est paramétrique. Forcément, la deuxième est non-paramétrique. Dans ce second cas, la norme indique qu'elle n'est réservée qu'au population de plus de 40 individus. Les essais réalisés dans le cadre de ce travail ne dépasseront *a priori* jamais une vingtaine d'éprouvettes. Dès lors, seule la première méthode sera décrite.

Normalité

La première étape consiste à déterminer le type de distribution statistique qu'a la population. La norme recommande d'utiliser une distribution log-normale pour les paramètres de résistance sauf si une distribution normale est plus appropriée. Pour la masse volumique, il faut d'office passer par une distribution normale.

Afin de déterminer la normalité de la population, un mixte d'approches statistiques a été utilisé. Il se base sur le travail de Öner et Deveci Kocakoç [48]. Ils ont compilé dans *Matlab* 10 méthodes classiques de vérification de la normalité d'une distribution. Pour vérifier si une distribution est log-normale, il suffit de vérifier la normalité du logarithme de la population étudiée. Nous avons considéré la distribution comme normale ou log-normale quand au moins 9 des 10 méthodes la considéraient comme telle. Pour éviter de trop facilement rejeter la normalité d'une distribution, nous avons procédé à un test supplémentaire lorsqu'au moins 7 des 10 méthodes indiquaient que la distribution était normale ou log-normale. Ce test supplémentaire consistait en un test de Chi-carré, écrit par nos soins. Les 10 méthodes sont reprises dans le Tableau B.1. L'ensemble des codes Matlab sont décrits dans l'Annexe C.2.

#	Méthode	#	Méthode
1	KS Limiting Form	6	Cramer-Von Mises Test
2	KS Stephens Modification	7	Shapiro-Wilk Test
3	KS Marsaglia Method	8	Shapiro-Francia Test
4	KS Lilliefors Modification	9	Jarque-Bera Test
5	Anderson-Darling test	10	DAgostino & Pearson Test

Tableau B.1 – Méthodes utilisées pour déterminer la normalité d'une distribution

Calculs de moyenne et d'écart-type

La seconde étape calcule la moyenne et l'écart-type de la population. Bien entendu, le calcul diffère selon la distribution. Les Équations ci-dessous donnent les formules pour les moyennes ($\bar{y}$) et les écart-types (s_y).

Log-normale :

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln(m_i) \tag{B.1}$$

$$s_y = \max\left(\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\ln(m_i)-\bar{y})^2}; 0,05\right) \tag{B.2}$$

Normale :

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} m_i \tag{B.3}$$

$$s_y = \max\left(\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(m_i-\bar{y})^2}; 0,05\cdot\bar{y}\right) \tag{B.4}$$

Calcul de coefficient

Pour déterminer la valeur caractéristique, il faut encore trouver le coefficient $k_s(n) = \frac{k_\alpha(n)}{\sqrt{n}}$, directement relatif au nombre d'individus de la population. $k_\alpha(n)$ est le fractile d'ordre α selon une distribution t-Student avec $n-1$ degrés de liberté et non-centrée avec un paramètre de non centralité $\lambda = u_{1-p}\cdot\sqrt{n}\cdot u_{1-p}$ est le fractile d'ordre $1-p$ de la distribution normale centrée et réduite. Autrement dit, $u_{1-p} = \mu+\sigma\cdot\mathrm{erf}^{-1}(2\cdot(1-p)-1)$. La moyenne, μ, et l'écart-type, σ, de la distribution normale centrée et réduite valent respectivement 0 et 1 .

Pour trouver $k_\alpha(n)$, il suffit de déterminer la valeur d'abscisse de la fonction cumulative de densité de probabilité de la distribution t-Student non-centrée qui donne une probabilité de α. Analytiquement, c'est une formule complexe. Cependant, il existe des méthodes numériques, notamment sur *Matlab* avec nctcdf (k_α, n, λ), permettant de réaliser facilement ce calcul.

La norme NBN EN 14358 [11] propose une formule simplifiée pour calculer $k_s(n)$: $k_s(n) = \frac{6{,}5n+6}{3{,}7n-3}$. Le Tableau B.2 reprend quelques valeurs de $k_s(n)$. Nous y constatons qu'à partir

de $15-20$ éprouvettes, k_s se stabilise. Le rapport gain et charge de travail supplémentaire en manutention et essai explique que nous nous limitons à une vingtaine d'éprouvettes par essai.

n	$k_s(n)$
3	3,15
5	2,46
10	2,10
15	1,99
20	1,93
50	1,81
100	1,76
500	1,69
∞	1,64

Tableau B.2 – Valeur de k_s en fonction de n, le nombre d'échantillons

Valeurs caractéristiques

Finalement, il reste plus qu'à calculer les valeurs caractéristiques. Il suffit de suivre les formules décrites dans le Tableau B.3.

Fractile	Log-normale	Normale
Percentile 5%	$m_k = e^{\bar{y}-k_s(n)\cdot s_y}$	$m_k = \bar{y} - k_s(n)\cdot s_y$
Percentile 95%	$m_k = e^{\bar{y}+k_s(n)\cdot s_y}$	$m_k = \bar{y} + k_s(n)\cdot s_y$

Tableau B.3 – Formules pour trouver les valeurs caractéristiques

B.2 Détermination des valeurs caractéristiques moyennes

Ici, les calculs sont plus aisés. En effet, il n'y a plus de considérations faites par rapport à la nature de la distribution. Dès lors la moyenne et l'écart-type sont calculés ainsi :

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} m_i \tag{B.5}$$

$$s_y = \max\left(\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(m_i - \bar{y})^2}; 0,05 \cdot \bar{y}\right) \tag{B.6}$$

À nouveau, il est possible de déterminer un coefficient $k_s(n) = \frac{t_{\alpha,n-1}}{\sqrt{n}}$. Il permet d'utiliser les intervalles de confiance. $t_{\alpha,n-1}$ est le fractile d'ordre α selon une distribution t-Student centrée avec n − 1 degré de liberté. Autrement dit, le facteur de non-centralité λ est égal à 0. Encore une fois, la norme propose une équation simplifiée : $k_s(n) = \frac{0,78}{n^{0,53}}$. Le Tableau B.4 reprend quelques valeurs de ce $k_s(n)$.

n	$k_s(n)$
3	0,471
5	0,331
10	0,222
15	0,179
20	0,154
50	0,096
100	0,068
500	0,03
∞	0

Tableau B.4 – Valeur de k_s en fonction de n, le nombre d'échantillons

ANNEXE C

CODES *MATLAB*

C.1 Implémentation de la norme NBN EN 14358 [11]

```
function [m05, m95, mmean] = N14358(m, Type, k, moy)
% Calcul de valeurs caracteristiques :
%-m est le parametre que nous etudions [1xn]
%-Type est le type de parametre qu'on etudie
%       E : rigidite ==> Lognormale (sinon normale)
%       R : resistance ==> Lognormale (sinon normale)
%       Rho : densite ==> Normale
%-k est un booleen indiquant si on souhaite avoir les valeurs
% caracteristiques a 95% et 5% d'exclusion
%-moy est un booleen indiquant si on souhaite avoir la valeur moyenne de
    la
% population

m = NanCleaner(m') ';
m = m(m ~=0);

% Suivons a la lettre la norme EN 14358

% n est le nombre d'essais dans la serie
if size(m, 1) > 1 && size(m, 2) == 1
    m = m';
elseif size(m, 1) > 1 && size(m, 2) > 1
    error('m n est pas un vecteur');
end
n = size(m, 2);

if n == 1 || isempty(m)
    m05 = NaN;
    m95 = NaN;
    mmean = NaN;
    return;
end

%alpha = niveau de confiance : la probabilite que la valeur
    caracteristique
%soit superieure a l'estimation qui en est faite. Pour EN 1990 : alpha =
%75%
alpha = 0.75;

%mk est la valeur caracteristique de m, un parametre de resistance ou une
%resitance modelisee sous la forme d'une variable aleatoire. mk est le
%fractile d'ordre p dans la fonction de distribution de m, correspondant a
%une serie d'essais supposee infinie
p = 0.05;

%% Valeurs Caracterisitques

if k

    %Il faut supposer que les parametres de resistance ont une
        distribution
```

```
49  %lognormale sauf si une analyse demontre qu'une distribution normale
        est
50  %plus appropriee. La masse volumique est selon une distribution
        normale.
51
52  %[Donc ici on fera le test de la normalite : pas oublier de citer l'
        auteur
53  %de la methode "normalitytest"]
54
55  Normal = normalitytest(m, false);
56
57  if sum(Normal(:, 3)) >= 9
58      Normal = true;
59  elseif sum(Normal(:, 3)) >= 7 && EstNormal(m, max(4, round(n/5)))
60      Normal = true;
61      disp('Normal fonctionne dans moins de 9 cas sur 10 mais plus de 7'
            )
62  else
63      Normal = false;
64  end
65  Lognormal = normalitytest(log(m), false);
66  if sum(Lognormal(:, 3)) >= 9
67      Lognormal = true;
68  elseif sum(Lognormal(:, 3)) >= 7 && EstLognormal(m, max(4, round(n/5))
        )
69      Lognormal = true;
70      disp('Lognormal fonctionne dans moins de 9 cas sur 10 mais plus de
            7')
71  else
72      Lognormal = false;
73  end
74
75
76  % Il faut trouver un facteur k_s(n) pour envisager la suite de la
77  % procedure. k_s(n) = k_alpha(n)/sqrt(n).
78
79  %k_alpha(n) est le fractile d'ordre alpha selon une distribution t non
80  %centree avec n-1 degres de liberte et ou le parametre de non
        centralite
81  %est lambda = u_{1-p} * sqrt(n).
82
83  %u_{1-p} est le fractile d'ordre 1-p de la distribution normale
84  % 0 est la moyenne de la distribution normale reduite, son centre est
        en 0
85  % Le 1 (juste apres le "+") est l'ecart-type de la distribution
        normale
86  % reduite
87  u = 0 + 1 * sqrt(2) * erfinv(2 * (1-p) - 1);
88  lambda = u * sqrt(n);
89
90  % Boucle permettant de trouver le k_alpha tel qu'il existe alpha
        chance
91  % qu'on se trouve dans cette partie de la distribution student t non
92  % centree
```

```
93      k_alpha = -5 * lambda;
94      Y = nctpdf(k_alpha,n-1,lambda);
95      while Y < alpha && k_alpha < 100*lambda
96          Y = nctcdf(k_alpha, n-1, lambda);
97          k_alpha = k_alpha + 0.01;
98      end
99
100     k_s = k_alpha/sqrt(n);
101
102
103     if strcmp(Type, 'E') || strcmp(Type, 'R')
104         if Lognormal
105             mu = sum(log(m))/n;
106             s = max(std(log(m)), 0.05);
107             m05 = exp(mu - k_s * s); % percentile 5%
108             m95 = exp(mu + k_s * s); % percentile 95%
109         elseif Normal
110             mu = sum(m)/n;
111             s = max(std(m), 0.05 * mu);
112             m05 = mu - k_s * s; % percentile 5%
113             m95 = mu + k_s * s; % percentile 95%
114         else
115             disp('Distribution (E ou R) ni lognormale, ni normale');
116             m05 = NaN;
117             m95 = NaN;
118         end
119     elseif strcmp(Type, 'Rho')
120         if Normal
121             mu = sum(m)/n;
122             s = max(std(m), 0.05 * mu);
123             m05 = mu - k_s * s; % percentile 5%
124             m95 = mu + k_s * s; % percentile 95%
125         else
126             disp('Distribution (Rho) pas normale');
127             m05 = NaN;
128             m95 = NaN;
129         end
130     else
131         error('Valeur du parametre "Type" inconnue');
132     end
133     % Le point 3.2.3 de la norme EN 14358 parle de al determination non
134     % parametrique. Cependant, elle indique qu'il ne doit pas etre
            utilisee
135     % pour les series d'echantillons de moins de 40 individus. Dans notre
            cas,
136     % nous n'iront probablement jamais au-dela de 20 echantillons. Nous
            passons
137     % directement au point 3.3 reserve a la determination des valeurs
138     % caracteristiques moyennes.
139 else
140     m05 = NaN;
141     m95 = NaN;
142 end
143
```

```
144 %% Valeurs moyennes
145 if moy
146     % En utilisant des intervalles de confiance
147 
148     % Il faut a nouveau determiner un k_s = k_alpha/sqrt(n). Cependant,
            k_alpha
149     % est maintenant la valeur de la distribution student t centree
150 
151     k_alpha = -5;
152     Y = nctpdf(k_alpha,n-1,0);
153     while Y < alpha && k_alpha < 100
154         Y = nctcdf(k_alpha, n-1, 0);
155         k_alpha = k_alpha + 0.001;
156     end
157 
158     k_s = k_alpha/sqrt(n);
159 
160     mu = sum(m)/n;
161     s = max(std(m), 0.05 * mu);
162 
163     mmean = mu - k_s * s;
164 else
165     mmean = NaN;
166 end
```

C.2 Implémentation du calcul des modules de Young selon la norme NBN EN 408 [10]

Version fidèle à la norme

```
1  function [Em_l, Em_g, Erreur, R] = Young_norme(F_max, A, Longueur, c,
       Grume)
2  A = NanCleaner(A);
3  
4  if isempty(A)
5      disp('A est vide');
6      Em_l = NaN;
7      Em_g = NaN;
8      R = NaN;
9      Erreur = NaN;
10     return;
11 end
12 
13 a = Longueur/3;
14 o1 = Longueur;
15 o = Longueur;
16 if Grume
17     I = pi * c^4/64;
18 else
```

```
19      I = c^4/12;
20  end
21
22      F_b = 0.1 * F_max;
23      i_b = find( abs( A(:, 2) - F_b ) == min( abs( A(:, 2) - F_b ) ) );
24      F_h = 0.4 * F_max;
25      i_h = find( abs( A(:, 2) - F_h ) == min( abs( A(:, 2) - F_h ) ) );
26      F_02 = 0.2 * F_max;
27      i_02 = find( abs( A(:, 2) - F_02 ) == min( abs( A(:, 2) - F_02 ) ) );
28      F_03 = 0.3 * F_max;
29      i_03 = find( abs( A(:, 2) - F_03 ) == min( abs( A(:, 2) - F_03 ) ) );
30
31
32  if i_b > i_h
33      ii = i_b;
34      i_b = i_h;
35      i_h = ii;
36  end
37
38
39  if i_h - i_b < 10
40      disp('OUILLE 1');
41      Em_l = NaN;
42      Em_g = NaN;
43      R = NaN;
44      Erreur = NaN;
45      return;
46  end
47
48  %disp(size(A));
49  [R, p] = corrcoef(A(i_b:i_h, 1), A(i_b:i_h, 2));
50
51  while R(1, 2) < 0.99 && p(1, 2) > 0.05
52      if i_b >= i_02 && i_h <= i_03
53          Em_l = NaN;
54          Em_g = NaN;
55          R = NaN;
56          Erreur = NaN;
57          disp('OUILLE 2');
58          return;
59      end
60      if i_b + 1 < i_02
61          i_b = i_b + 1;
62      end
63      if i_h - 1 > i_03
64          i_h = i_h - 1;
65      end
66      [R, p] = corrcoef(A(i_b:i_h, 1), A(i_b:i_h, 2));
67  end
68
69  R = R(1, 2);
70
71  Em_l = a * o1^2 * (A(i_h, 2) - A(i_b, 2))/(16 * I * (A(i_h, 1) - A(i_b, 1)
        ));
```

```
72
73 Em_g = (3 * a * o^2 - 4 * a^3)/(2 * c * c^3 * (2 * (A(i_h, 1) - A(i_b, 1))
       /(A(i_h, 2) - A(i_b, 2))));
74
75 G = Em_g/(2*(1+0.3));
76 Erreur = (6 * a /(5 * G * c * c))/(2 * (A(i_h, 1) - A(i_b, 1))/(A(i_h, 2)
       - A(i_b, 2)));
```

Version modifiée

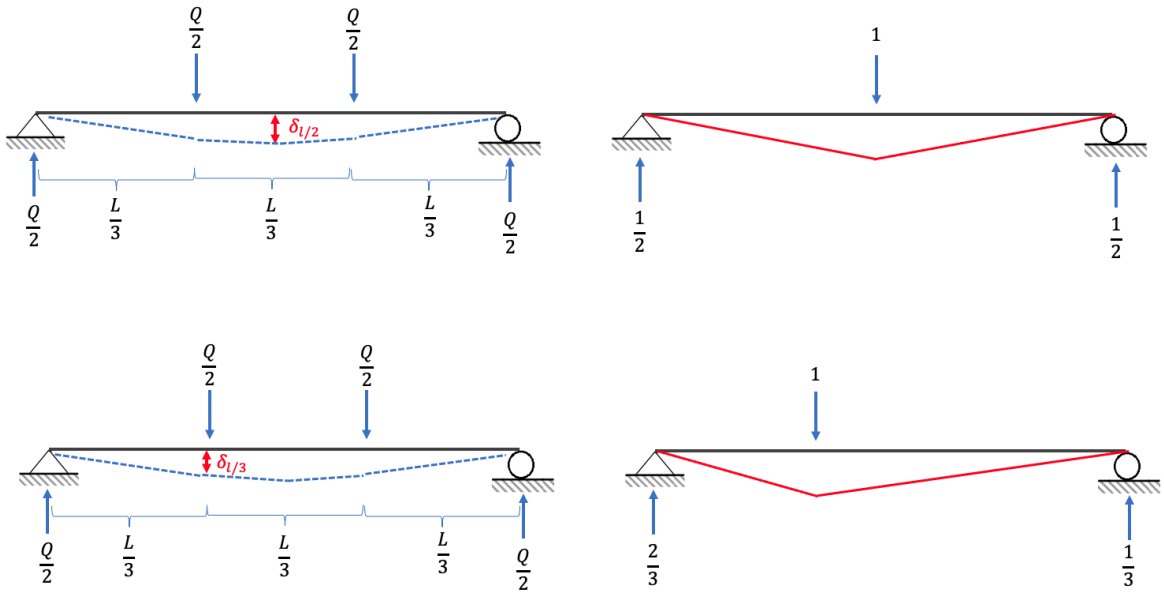
```
1  function [Em_l, Em_g, Erreur, R] = Young_norme_modified(F_max, A, Longueur
       , c, Grume)
2
3  A = NanCleaner(A);
4
5  if isempty(A)
6      disp('A est vide');
7      Em_l = NaN;
8      Em_g = NaN;
9      R = NaN;
10     Erreur = NaN;
11     return;
12 end
13
14 a = Longueur/3;
15 o1 = Longueur;
16 o = Longueur;
17 if Grume
18     I = pi * c^4/64;
19 else
20     I = c^4/12;
21 end
22
23 F_b = 0.1 * F_max;
24 i_b = find( abs( A(:, 2) - F_b ) == min( abs( A(:, 2) - F_b ) ) );
25 F_h = 0.7 * F_max;
26 %F_h = 1 * F_max;
27 i_h = find( abs( A(:, 2) - F_h ) == min( abs( A(:, 2) - F_h ) ) );
28 F_02 = 0.2 * F_max;
29 i_02 = find( abs( A(:, 2) - F_02 ) == min( abs( A(:, 2) - F_02 ) ) );
30 F_03 = 0.6 * F_max;
31 i_03 = find( abs( A(:, 2) - F_03 ) == min( abs( A(:, 2) - F_03 ) ) );
32
33 if i_b > i_h
34     ii = i_b;
35     i_b = i_h;
36     i_h = ii;
37 end
38
39 if i_h - i_b < 10
40     disp('OUILLE 1');
41     Em_l = NaN;
```

```
42      Em_g = NaN;
43      R = NaN;
44      Erreur = NaN;
45      return;
46  end
47
48  %disp(size(A));
49  [R, p] = corrcoef(A(i_b:i_h, 1), A(i_b:i_h, 2));
50
51  while R(1, 2) < 0.99 && p(1, 2) > 0.05
52      if i_b >= i_02 && i_h <= i_03
53          Em_l = NaN;
54          Em_g = NaN;
55          R = NaN;
56          Erreur = NaN;
57          disp('OUILLE 2');
58          return;
59      end
60      if i_b + 1 < i_02
61          i_b = i_b + 1;
62      end
63      if i_h - 1 > i_03
64          i_h = i_h - 1;
65      end
66      [R, p] = corrcoef(A(i_b:i_h, 1), A(i_b:i_h, 2));
67  end
68
69  R = R(1, 2);
70
71  Em_l = a * o1^2 * (A(i_h, 2) - A(i_b, 2))/(16 * I * (A(i_h, 1) - A(i_b, 1)
        ));
72
73  Em_g = (3 * a * o^2 - 4 * a^3)/(2 * c * c^3 * (2 * (A(i_h, 1) - A(i_b, 1))
        /(A(i_h, 2) - A(i_b, 2))));
74
75  G = Em_g/(2*(1+0.3));
76  Erreur = (6 * a /(5 * G * c * c))/(2 * (A(i_h, 1) - A(i_b, 1))/(A(i_h, 2)
        - A(i_b, 2)));
```

ANNEXE D

PASSAGE DE LA FLÈCHE SOUS CHARGEMENT À LA FLÈCHE CENTRALE

Le passage de la flèche sous chargement à la flèche centrale se réalise à l'aide d'un simple rapport géométrique. Pour trouver les expressions des deux flèches, la méthode de la force unité est utilisée, comme présenté en Figure **??**.



Le calcul se fait comme suit :

$$\delta_{l/2} = \frac{L}{3} \cdot 2 \cdot \frac{1}{EI} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{Q}{2} \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{3} + \frac{L}{6} \cdot 2 \cdot \frac{1}{EI} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{QL}{6} \cdot (\frac{1}{2} \cdot \frac{L}{3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{2})$$

$$\rightarrow \delta_{l/2} = \frac{QL^3}{162EI} + \frac{5QL^3}{432EI} = 0,0177 \cdot \frac{QL^3}{EI}$$

$$\delta_{l/3} = \frac{L}{3} \cdot \frac{1}{EI} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{Q}{2} \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{2L}{9} + \frac{L}{3} \cdot \frac{1}{EI} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{QL}{6} \cdot (\frac{2}{3} \cdot \frac{L}{3} + \frac{1}{3} \cdot \frac{L}{3}) + \frac{L}{3} \cdot \frac{1}{EI} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{Q}{2} \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{L}{3}$$

$$\rightarrow \delta_{l/3} = \frac{QL^3}{243EI} + \frac{QL^3}{108EI} + \frac{QL^3}{486EI} = 0,0154 \cdot \frac{QL^3}{EI}$$

Finalement, le rapport de flèche est :

$$\frac{\delta_{l/2}}{\delta_{l/3}} = 1,15$$

ANNEXE E

CALCUL DE L'HUMIDITÉ ET DES DENSITÉS POUR LES ÉCHANTILLONS ÉQUARRIS ET LES GRUMES

E.1 Calcul de l'humidité et des densités pour les échantillons équarris

Le calcul de la teneur en humidité se fait d'après la norme NBN EN 13183 [5].

Le calcul de la densité pour une teneur en humidité de 12 % se fait conformément à la norme NBN EN 384 [12]. Cette norme n'est normalement applicable que pour des échantillons dont la teneur en humidité au moment de l'essai se trouve entre 8 % et 18 %. Nous faisons l'hypothèse que la norme est tout de même applicable pour les échantillons testés vu la faible différence observée.

Batterie d'essai numéro 3

Batterie d'essai numéro 3 : Sans délai							
Référence de la planche	Numéro de l'échantillon	Masse de l'échantillon avant séchage [g]	Masse de l'échantillon anhydre [g]	Teneur en humdité [%]	Densité humide [kg/m^3]	Densité sèche [kg/m^3]	Densité pour un teneur en humidité de 12 % [kg/m^3]
A	2	50,8	47,6	6,3	466,5	437,1	452,1
C	3	52,3	48,8	6,7	480,3	448,1	464,5
C	5	48,7	45,4	6,8	447,2	416,9	432,3
D	2	54,3	50,8	6,4	498,6	466,5	482,9
D	5	54,9	51,4	6,4	504,1	472,0	488,4
			Moyenne :	6,5	479,3	448,1	464,0

Batterie d'essai numéro 3 : Délai de 300 [s]							
Référence de la planche	Numéro de l'échantillon	Masse de l'échantillon avant séchage [g]	Masse de l'échantillon anhydre [g]	Teneur en humdité [%]	Densité humide [kg/m^3]	Densité sèche [kg/m^3]	Densité pour un teneur en humidité de 12 % [kg/m^3]
A	2	49,7	46,6	6,2	456,4	427,9	442,4
C	3	51,2	47,8	6,6	470,2	438,9	454,8
C	5	51,9	48,3	6,9	476,6	443,5	460,3
D	2	53,5	49,9	6,7	491,3	458,2	475,0
D	5	54,7	51	6,8	502,3	468,3	485,6
			Moyenne :	6,7	479,3	447,4	463,6

Figure E.1 – Humidité et densités des échantillons de la batterie numéro 3

Batterie d'essai numéro 4

Batterie d'essai numéro 4 : v = 0,0495 [mm/s]							
Référence de la planche	Numéro de l'échantillon	Masse de l'échantillon avant séchage [g]	Masse de l'échantillon anhydre [g]	Teneur en humdité [%]	Densité humide [kg/m^3]	Densité sèche [kg/m^3]	Densité pour un teneur en humidité de 12 % [kg/m^3]
C	1	48,1	44,9	6,7	441,7	412,3	427,3
C	2	49,9	46,4	7,0	458,2	426,1	442,4
D	3	55,7	51,8	7,0	511,5	475,7	493,9
D	4	55,9	52,1	6,8	513,3	478,4	496,2
E	1	45,7	42,7	6,6	419,7	392,1	406,1
			Moyenne :	6,8	468,9	436,9	453,2

Batterie d'essai numéro 4 : v = 0,2475 [mm/s]							
Référence de la planche	Numéro de l'échantillon	Masse de l'échantillon avant séchage [g]	Masse de l'échantillon anhydre [g]	Teneur en humdité [%]	Densité humide [kg/m^3]	Densité sèche [kg/m^3]	Densité pour un teneur en humidité de 12 % [kg/m^3]
C	1	50,2	46,9	6,6	461,0	430,7	446,1
C	2	51,1	47,8	6,5	469,2	438,9	454,4
D	3	55,7	51,9	6,8	511,5	476,6	494,3
D	4	54,8	51,2	6,6	503,2	470,2	487,0
E	1	47,3	44,2	6,6	434,3	405,9	420,4
			Moyenne :	6,6	475,8	444,4	460,4

FIGURE E.2 – Humidité et densités des échantillons de la batterie numéro 4

Batterie d'essai numéro 5

Batterie d'essai numéro 5							
Référence de la planche	Numéro de l'échantillon	Masse de l'échantillon avant séchage [g]	Masse de l'échantillon anhydre [g]	Teneur en humdité [%]	Densité humide [kg/m^3]	Densité sèche [kg/m^3]	Densité pour un teneur en humidité de 12 % [kg/m^3]
A	4	17,9	16,2	9,5	591,7	535,5	564,0
A	5	17,7	16,3	7,9	585,1	538,8	562,3
A	6	18,2	16,6	8,8	601,7	548,8	575,6
B	1	13	11,7	10,0	429,8	386,8	408,5
B	3	13,3	12,2	8,3	439,7	403,3	421,8
B	4	14,9	13,9	6,7	492,6	459,5	476,3
B	5	15,6	14,6	6,4	515,7	482,6	499,5
C	3	12,3	11,4	7,3	406,6	376,9	392,0
C	4	12,2	11,3	7,4	403,3	373,6	388,7
C	5	12,3	11,4	7,3	406,6	376,9	392,0
			Moyenne :	8,0	487,3	448,3	468,1

FIGURE E.3 – Humidité et densités des échantillons de la batterie numéro 5

Batterie d'essai numéro 6

Batterie d'essai numéro 6							
Référence de la planche	Numéro de l'échantillon	Masse de l'échantillon avant séchage [g]	Masse de l'échantillon anhydre [g]	Teneur en humdité [%]	Densité humide [kg/m^3]	Densité sèche [kg/m^3]	Densité pour un teneur en humidité de 12 % [kg/m^3]
A	2	17,5	16,1	8,0	578,5	532,2	555,7
A	3	17,2	15,8	8,1	568,6	522,3	545,8
B	2_1	12,9	11,9	7,8	426,4	393,4	410,2
B	2_2	13,1	12,1	7,6	433,1	400,0	416,8
B	6	14	13	7,1	462,8	429,8	446,6
C	1	13,1	12,1	7,6	433,1	400,0	416,8
C	2_1	12,4	11,5	7,3	409,9	380,2	395,3
C	2_2	12,1	11,1	8,3	400,0	366,9	383,7
C	6_1	12,1	11,2	7,4	400,0	370,2	385,4
C	6_2	12,3	11,4	7,3	406,6	376,9	392,0
			Moyenne :	7,7	451,9	417,2	434,8

Figure E.4 – Humidité et densités des échantillons de la batterie numéro 6

Batterie d'essai numéro 7

Batterie d'essai numéro 7 : Sans délai							
Référence de la planche	Numéro de l'échantillon	Masse de l'échantillon avant séchage [g]	Masse de l'échantillon anhydre [g]	Teneur en humdité [%]	Densité humide [kg/m^3]	Densité sèche [kg/m^3]	Densité pour un teneur en humidité de 12 % [kg/m^3]
A	4	17,7	16,5	6,8	585,1	545,5	565,6
A	5	18,3	16,8	8,2	605,0	555,4	580,5
A	6	17,7	16,2	8,5	585,1	535,5	560,7
B	1	13,4	12,6	6,0	443,0	416,5	430,0
B	3	15,3	14,2	7,2	505,8	469,4	487,9
B	4	13,3	12,3	7,5	439,7	406,6	423,4
B	5	14	13	7,1	462,8	429,8	446,6
C	3	12,1	11,3	6,6	400,0	373,6	387,0
C	4	12,1	11,3	6,6	400,0	373,6	387,0
C	5	12,5	11,7	6,4	413,2	386,8	400,2
			Moyenne :	7,1	484,0	449,3	466,9

Batterie d'essai numéro 7 : Délai de 300 [s]							
Référence de la planche	Numéro de l'échantillon	Masse de l'échantillon avant séchage [g]	Masse de l'échantillon anhydre [g]	Teneur en humdité [%]	Densité humide [kg/m^3]	Densité sèche [kg/m^3]	Densité pour un teneur en humidité de 12 % [kg/m^3]
A	4	17,8	16,4	7,9	588,4	542,1	565,6
A	5	17,8	16,5	7,3	588,4	545,5	567,3
A	6	18,3	16,9	7,7	605,0	558,7	582,2
B	1	12,4	11,5	7,3	409,9	380,2	395,3
B	3	14,1	13	7,8	466,1	429,8	448,2
B	4	12,8	11,8	7,8	423,1	390,1	406,9
B	5	14,6	13,4	8,2	482,6	443,0	463,1
C	3	12,2	11,3	7,4	403,3	373,6	388,7
C	4	12,4	11,5	7,3	409,9	380,2	395,3
C	5	12,4	11,5	7,3	409,9	380,2	395,3
			Moyenne :	7,6	478,7	442,3	460,8

Figure E.5 – Humidité et densités des échantillons de la batterie numéro 7

E.2 Calcul de l'humidité et des densités pour les grumes

Un échantillon cylindrique a été prélevé sur chaque grume afin de pouvoir calcul l'humidité et les densités.

Le calcul de la teneur en humidité se fait de deux manières. D'une part, à l'aide d'un hydromètre. D'autre part, d'après la norme NBN EN 13183 [5]. Nous faisons l'hypothèse que cette norme est valable pour des échantillons cylindriques.

Le calcul de la densité pour une teneur en humidité de 12 % se fait conformément à la norme NBN EN 384 [12]. Cette norme n'est normalement applicable que pour des échantillons dont la teneur en humidité au moment de l'essai se trouve entre 8 % et 18 %. Nous faisons l'hypothèse que la norme est tout de même applicable pour les échantillons testés.

Numéro de la grume correspondante	Masse de l'échantillon avant séchage [g]	Masse de l'échantillon anhydre [g]	Teneur en humidité calculée selon les normes [%]	Teneur en humidité mesurée à l'hydromètre [%]	Densité humide [kg/m^3]	Densité sèche [kg/m^3]	Densité pour une teneur en humidité à 12 % [kg/m^3]
1	1706,2	1399,9	18,0	15,0	486,1	398,8	471,6
2	1613,1	1198,4	25,7	26,3	502,2	373,1	467,8
3	1613,2	1261,6	21,8	24,0	484,1	378,6	460,4
4	1481,7	1133	23,5	31,6	476,4	364,2	448,9
5	2629,1	1981,3	24,6	19,5	562,0	423,5	526,4
6	2319	1749	24,6	25,2	529,5	399,3	496,2
7	3751	2790,1	25,6	24,5	495,4	368,5	461,7
8	1845,2	1342,30	27,3	35,0	450,7	327,8	416,3
9	1569,1	1214,2	22,6	26,0	513,0	396,9	485,7
10	2735,7	2101,4	23,2	26,2	543,7	417,6	513,3
11	2522,1	1840,3	27,0	23,7	606,9	442,8	561,3
12	1990,9	1552,6	22,0	21,5	527,8	411,6	501,4
13	2432,9	1813,6	25,5	22,3	477,9	356,3	445,8
14	2891,6	2007,9	30,6	30,0	505,9	351,3	459,0
15	3232,7	1834,4	43,3	21,1	577,0	327,4	486,9
16	2446,2	1907,4	22,0	28,0	485,4	378,5	461,1
17	4000,6	3078,10	23,1	26,1	508,7	391,4	480,6
18	1701	1325,2	22,1	19,3	505,9	394,2	480,4
19	3059,1	2362	22,8	23,7	512,7	395,9	485,1
20	2473,5	1723,1	30,3	28,0	504,4	351,4	458,2
21	2647,5	1994,8	24,7	24,1	508,7	383,3	476,5
		Moyenne :	25,2	24,8	512,6	382,5	478,3

FIGURE E.6 – Humidité et densités des grumes

ANNEXE F

ANALYSE DÉTAILLÉE DES ESSAIS SUR LES ÉPROUVETTES ÉQUARRIES

Dans cette annexe, les résultats sont analysés conformément à ce qui a été dit dans le Chapitre 3. Afin de garder une vue d'ensemble tout en appréciant les détails, il est recommandé de constamment garder le Tableau 4.4 à portée de main. L'Annexe M a toutes les informations nécessaires pour assouvir la curiosité de quiconque. Elle contient les graphes et les valeurs de chaque mesure par éprouvette. Il s'y trouve également les rigidités flexionnelles. Ces dernières ne figurent pas dans l'analyse détaillée car l'intérêt est limité. D'une part, cette information est en partie proportionnelle aux dimensions des éprouvettes rendant la comparaison entre les différentes batteries difficile. D'autre part, elle est identique au module de Young à une constante près étant donné que la présente annexe concerne des éprouvettes équarries qui ont nécessairement des dimensions contrôlées et constantes conférant alors à l'élément un moment d'inertie identique sur toute sa longueur.

F.1 Phase de prospection

Première batterie d'essais : Chargement cyclique

Cette première batterie vise à comprendre le comportement du bois sous chargement cyclique. Il est attendu d'en avoir un semblable à de l'élastoplasticité.

Protocole

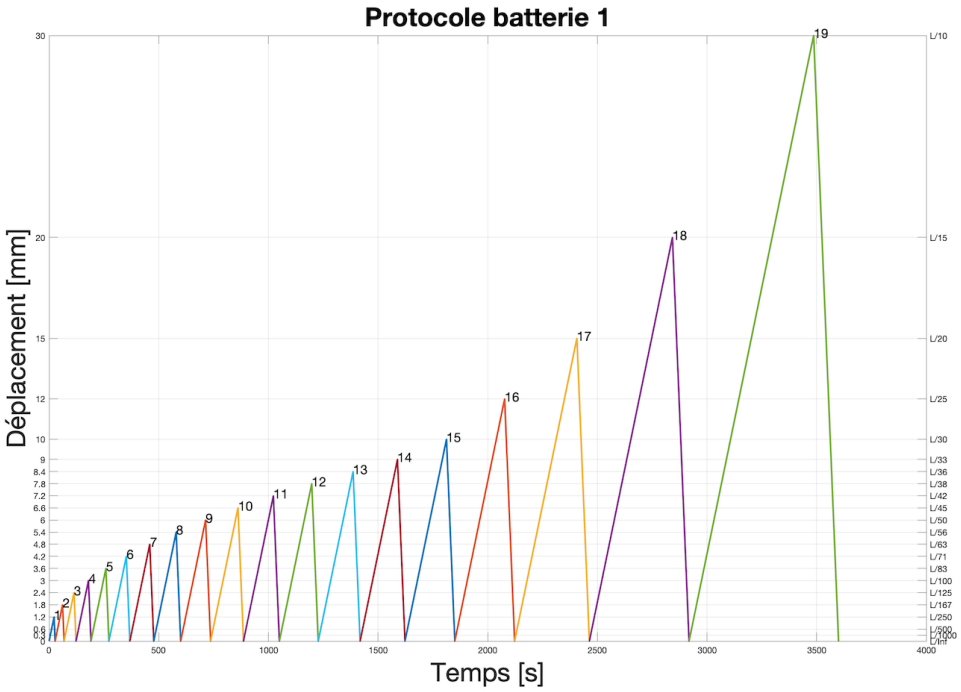


Figure F.1 – Représentation graphique du protocole de la première batterie

Global

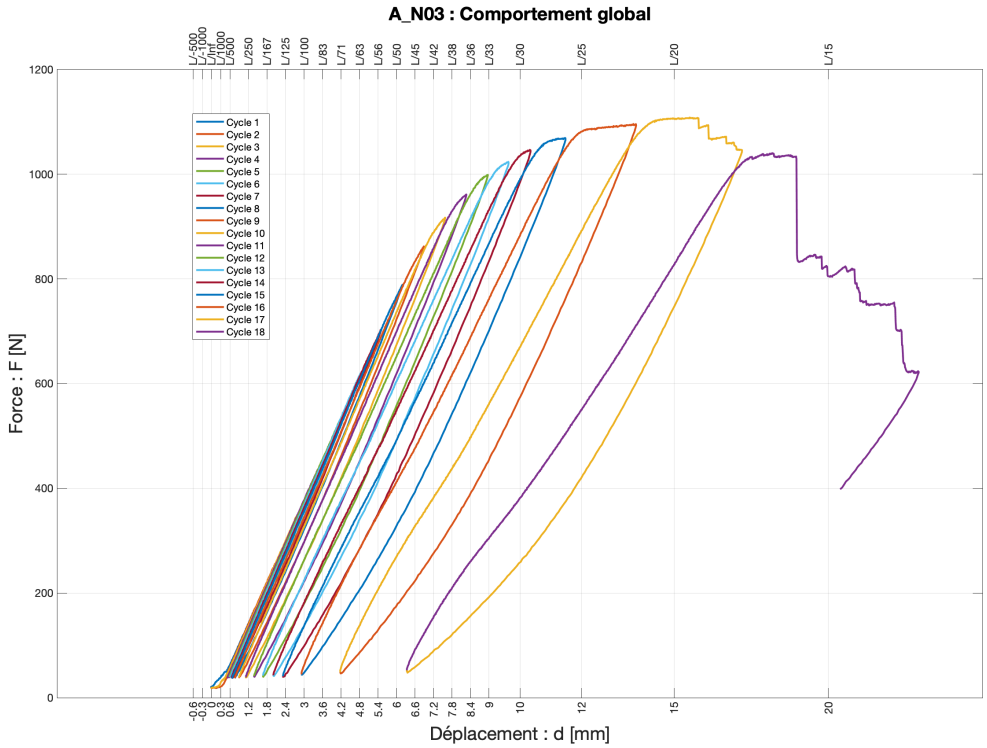


FIGURE F.2 – Comportement global de l'éprouvette 3 de la première batterie

- **Linéarité** : Jusqu'une flèche relative de $l/50$, les courbes sont linéaires ;
- **Plateau** : Vers $l/40$, un aplatissement de la courbe apparaît. Avec l'observation précédente, ils forment la base d'un comportement élasto-plastique ;
- **Rupture en cascade** : La rupture se fait en plusieurs temps. Entre chacun, le bois récupère un peu de résistance.

Éprouvette	Cycle de rupture	Flèche relative imposée	Déplacement imposé [mm]	Force maximale [N]	Contrainte [MPa]	Module de Young [GPa]
2	13e	$l/35,71$	8,4	893,66	59,68	
3	18e	$l/15$	20	1108,48	74,03	9,33
4	14e	$l/30$	10	1024,07	68,39	8,24
5	17e	$l/20$	15	1137,1	75,94	9,45
6	17e	$l/20$	15	1262,16	84,29	10,29
7	17e	$l/20$	15	1283,09	85,69	10,5
8	17e	$l/20$	15	1096,56	73,23	9,21
9	18e	$l/15$	20	1059,14	70,73	9,35
10	16e	$l/25$	12	1094,8	73,11	9,12
11	18e	$l/15$	20	1126,89	75,25	9,79
12	18e	$l/15$	20	1170,4	78,16	10,08
13	15e	$l/30$	15	1034,29	69,07	9,02
14	13e	$l/35,71$	8,4	1034,37	69,08	
15	11e	$l/41,67$	7,2	904,31	60,39	
16	16e	$l/25$	12	915,18	61,12	7,98
Moyenne	16e	$l/25$	12	1055,44	70,49	9,21

Tableau F.1 – Valeurs à la rupture de la première batterie

- **Flèche** : En sachant que les flèches autorisées lors de la mise en place de poutres dans la construction tourne autour de $l/250$, nous voyons que la rupture apparaît tardivement. En effet, elle survient à 10 fois le critère habituel ;
- **Contrainte** : Les contraintes sont particulièrement élevées. Effectivement, l'épicéa de construction est souvent considéré comme ayant une résistance de 24 MPa. Ceci s'explique notamment par l'inexistence de défauts dans les éprouvettes testées ;
- **Module de Young** : Il est relativement peu élevé compte tenu qu'il tourne généralement autour de 12 GPa [30]. Il faut garder un oeil critique face à ce résultat. En effet, comme énoncé au Point 4.1.1 (p. 46), le dispositif utilisé n'était pas précis. Notamment, la raideur de ses rouleaux n'était pas parfaite et ils n'étaient pas toujours en contact avec le bois. Ces données sont l'occasion idéale de rappeler que ces batteries d'essais n'ont aucune ambition ou capacité à déterminer des résultats quantitatifs. Seules des tendances peuvent être dégagées.

Déplacement résiduel

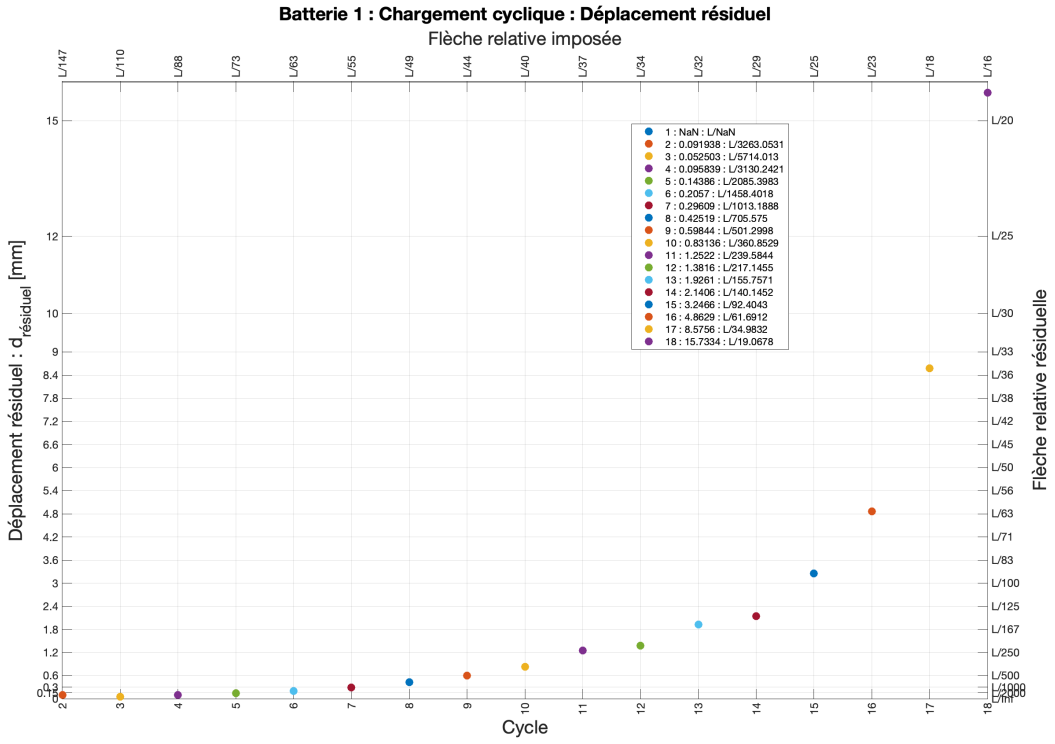


FIGURE F.3 – Déplacement résiduel par cycle de la première batterie

- **Augmentation forte à partir de** $l/50$;
- **Évolution exponentielle ou bilinéaire** : À première vue, le déplacement résiduel semble évoluer de manière exponentielle. D'aucuns penseraient que cette évolution est bilinéaire avec un point d'inflexion aux environs de $l/50$, soit le 6e cycle. La mise en évidence d'un tel point d'inflexion démontrerait une séparation nette entre un comportent élastique et plastique. Ce graphe ne permet cependant pas de se prononcer que ce soit sur la présence d'élasticité ou d'un point d'inflexion. *Stricto sensu*, la plasticité est par contre bien présente dès les premiers chargements puisqu'il existe une déformation irréversible.

Force maximale

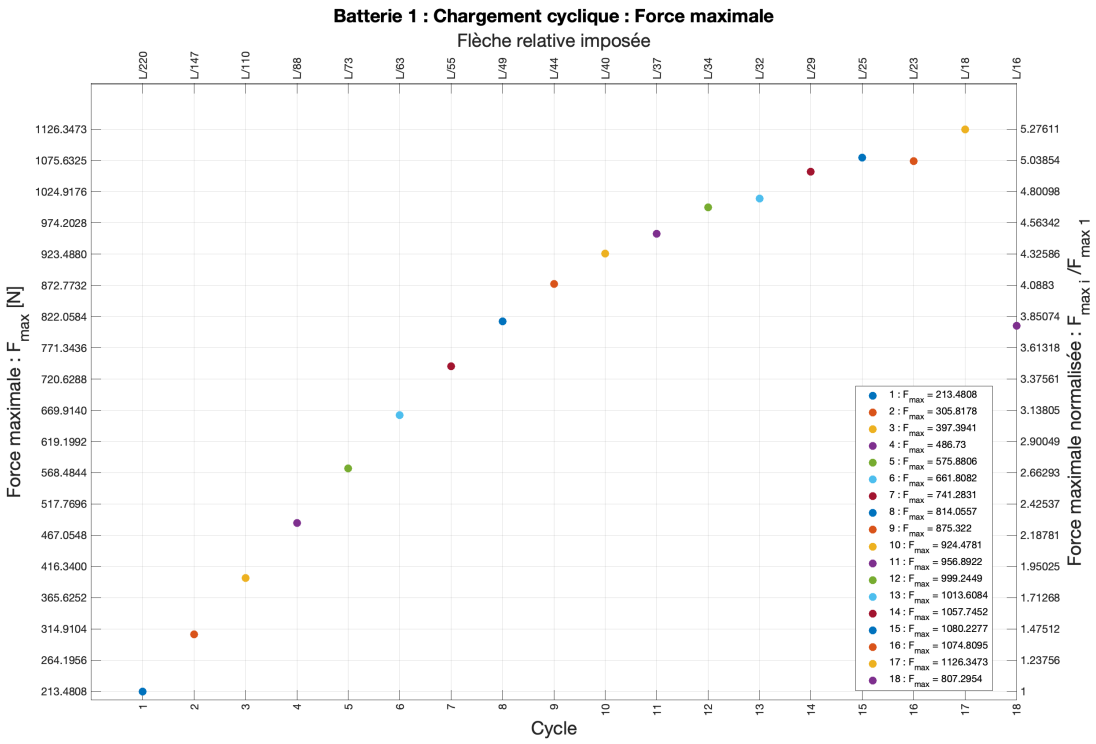


Figure F.4 – Force maximale par cycle de la première batterie

- **Analogue au chargement statique** : Les points permettent de retrouver une courbe semblable à celles observées lors d'essais en chargement statique ;
- **Linéarité** : Les points sont sur une droite jusqu'au 8e cycle, soit $l/50$;
- **Plateau** : À partir du 12e cycle, soit $l/30$, la force maximale se stabilisent.

Rigidité

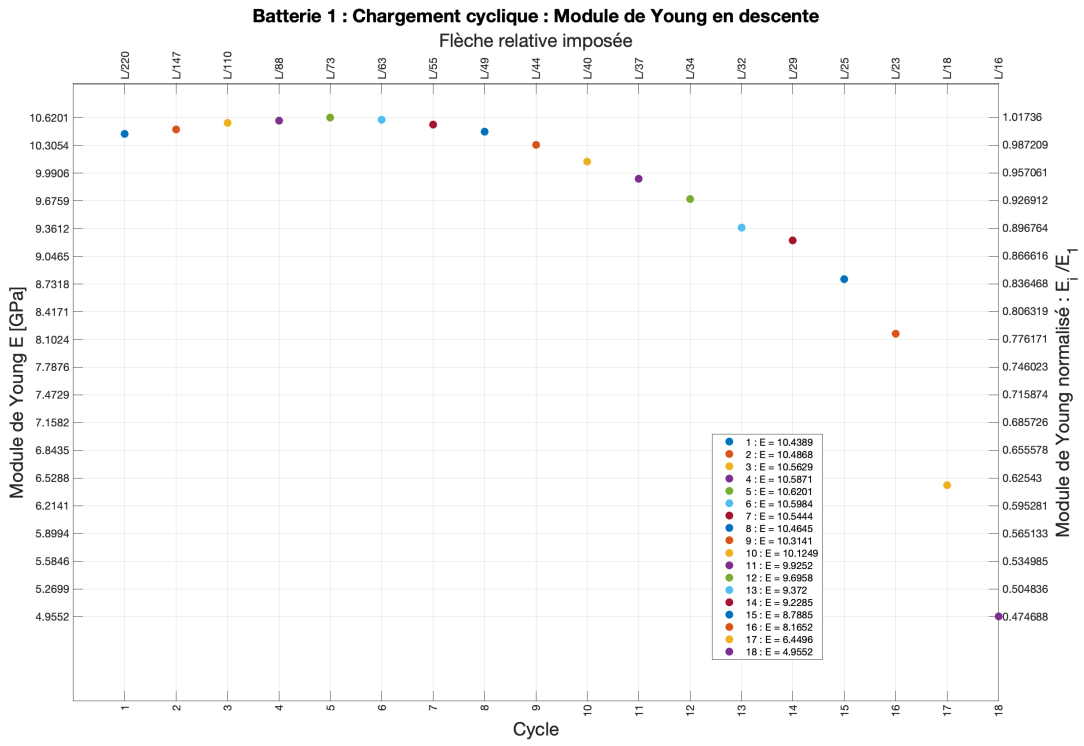


FIGURE F.5 – Module de Young, en descente, par cycle de la première batterie

- **Augmentation** : Bien que faiblement, la rigidité s'accroît dans les premiers cycles ;
- **Diminution** : La rigidité a tendance à diminuer avec les cycles à partir du 8e, soit $l/50$;
- **Constance** : L'essentiel des valeurs restent à moins de 20% d'écart avec celle du premier cycle.

Fonction S

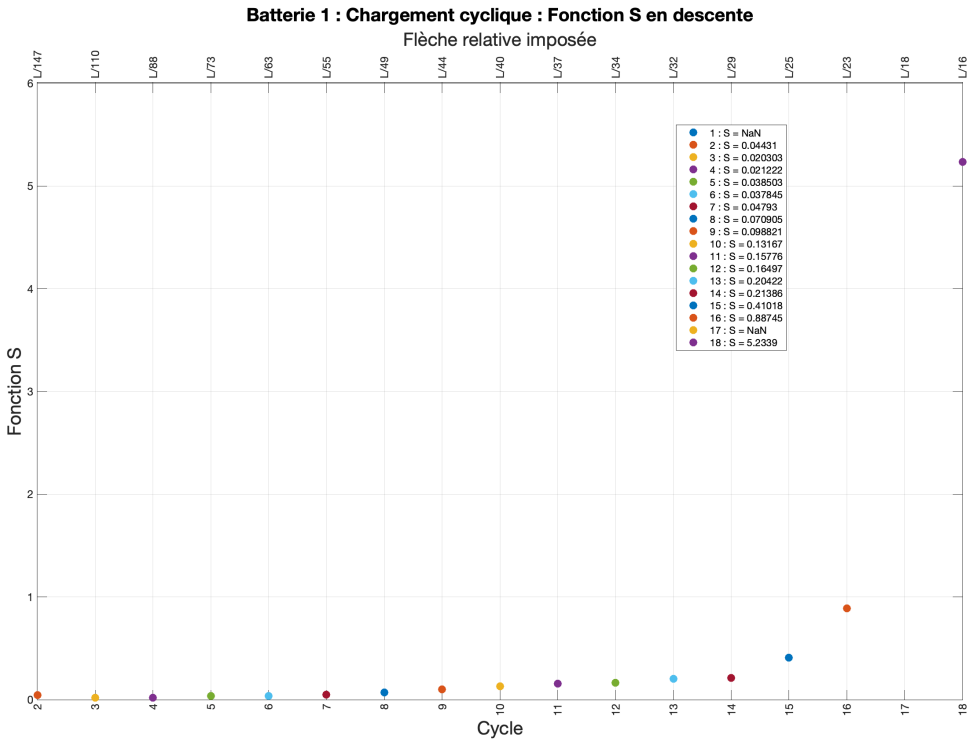


Figure F.6 – Fonction S, en descente, par cycle de la première batterie

- **Faible évolution** : Les premiers cycles sont caractérisés par une augmentation presque nulle. Autrement dit, le chemin emprunté dans le plan force-déplacement est presque identique. C'est un indicateur d'un impact peu conséquent sur le déplacement résiduel et sur la rigidité ;
- **Forte évolution** : Les derniers cycles présentent une augmentation importante de S. En d'autres termes, l'élément ne réagit pas du tout de la même manière d'un cycle à l'autre ;
- **Exponentielle** : Globalement, l'évolution de S est exponentielle.

Conclusion

- **Qualitatif** : Il convient de rappeler que les résultats n'ont que l'humble ambition d'être pris qu'à titre qualitatif ;
- **Élastoplasticité** : Il ressortirait de cette première batterie que le bois répond à une logique élastoplastique comme expliquée dans l'état de l'art (Point 2, p. 16) ;
- **Élasticité/Plasticité** : Bien que les déplacements résiduels soient particulièrement faibles dans les premiers cycles, il y a un déplacement *a priori* permanent

à la fin du cycle peu importe la force appliquée. Autrement dit, il y aura de la plasticité quoi que l'on fasse ;
- **Linéarité/Plateau** : Il existe une zone visiblement linéaire suivi d'une partie pratiquement plate. La transition se fait entre $l/55$ et $l/40$.

Deuxième batterie d'essais : Chargement statique

Cette batterie s'inscrit dans le seul but d'avoir des données comparatives avec celles obtenues dans la première batterie, se passant en chargement cyclique. Ces essais permettent d'avoir une référence établie selon les recommandations de la norme NBN EN 408+A1 [10].

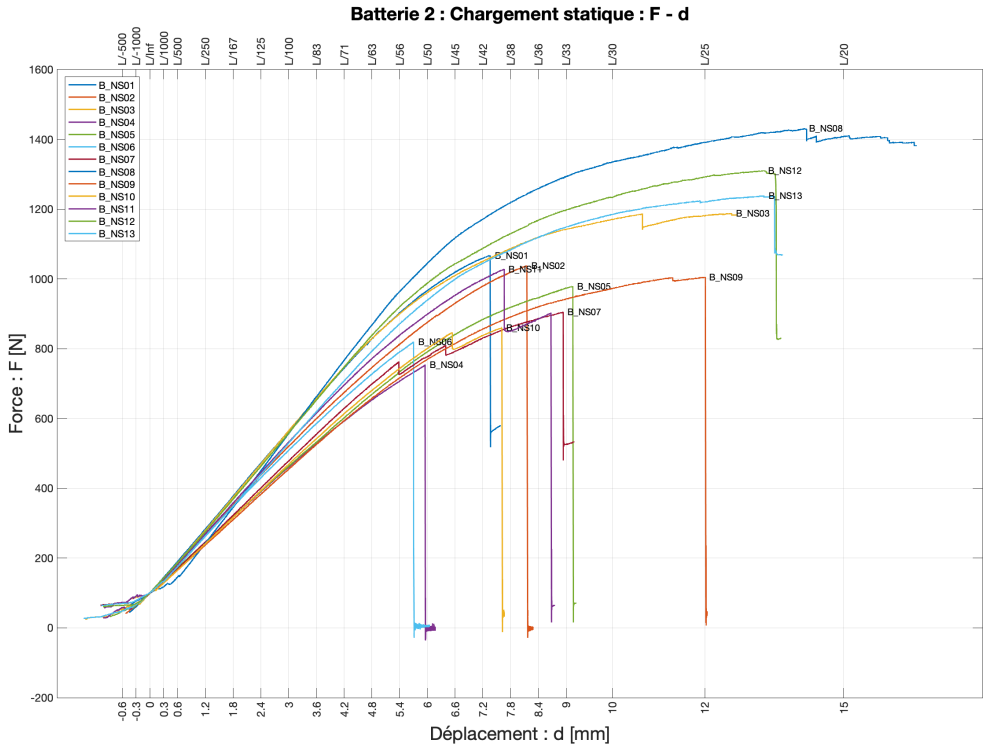


FIGURE F.7 – Comportement des 13 éprouvettes de la deuxième batterie. Pour les comparer, le point à F = 100 N a été aligné pour chaque éprouvette.

- **Diversité** : L'envergure des courbes est grande en comparaison à des courbes de matériaux produits en usine. Il s'agit d'une des caractéristiques typiques du bois. La diversité de ses propriétés à travers les éléments testés explique la distribution normale « étalée » du bois comme vu dans l'introduction du travail (Points 1.1.2 et 1.4) ;
- **Linéarité** : Le début des courbes est linéaire. Sa longueur et sa pente varient selon les éprouvettes. Dans la majorité des cas, la linéarité s'arrête aux alentours de $l/50$;

- **Fragile** : Environ la moitié des éprouvettes ont eu une rupture fragile. Autrement dit, elles se sont rompues avant de subir une déformation importante, dès leur sortie de la zone «linéaire» ;
- **Ductile** : Environ la moitié des échantillons ont suivi un comportement ductile. Autrement dit, il y a eu une forte déformation avant la rupture caractérisée par l'aplatissement de la courbe. Ce comportement s'oppose au fragile ;
- **« Nerf du bois »** : est la capacité du bois, après une première rupture, à diminuer sa déformation sous charge constante ou à en supporter une plus importante que celle de la première rupture. Sur le graphe, nous voyons, notamment aux éprouvettes NS03 et NS10, que l'élément a eu une première rupture mais à continuer à supporter une certaine charge avant d'arriver à sa rupture définitive.

Éprouvette	Déplacement à la rupture [mm]	Flèche relative	Force maximale [N]	Contrainte [MPa]	Module de Young [GPa]
1	8,94	$l/33,56$	1067,3	71,27	10,48
2	9,94	$l/30,18$	1038,38	69,35	9,46
3	16	$l/18,75$	1188,71	79,39	10,57
4	7,96	$l/37,67$	754,08	50,36	8,05
5	11,46	$l/26,18$	979,8	65,43	8,24
6	8,17	$l/36,73$	819,99	54,76	9,21
7	11,44	$l/26,23$	905,45	60,47	8,71
8	16,69	$l/17,98$	1431,45	95,6	11,77
9	13,89	$l/21,6$	1006,02	67,19	8
10	9,21	$l/32,58$	860,55	57,47	7,36
11	9,9	$l/30,31$	1028,36	68,68	9,73
12	16,36	$l/18,34$	1311	87,55	10,34
13	16,4	$l/18,29$	1238,67	82,72	9,89
Moyenne	11,37	$l/25,4$	1010,04	67,45	9,13
Percentile 5%			704,46	47,05	

Tableau F.2 – Valeurs à la rupture de la deuxième batterie

- **Flèche** : Tout comme pour les essais cyclique de la première batterie, les déplacements à la rupture sont importants et varient de $l/45$ à $l/20$;
- **Contrainte** : Les contraintes sont dans le même ordre de grandeur que pour le chargement cyclique ;
- **Rigidité** : À nouveau, les résultats sont comparables à ceux de la première batterie.

Conclusion

Voir Point 4.2.1, p. 53.

F.2 Phase d'étude

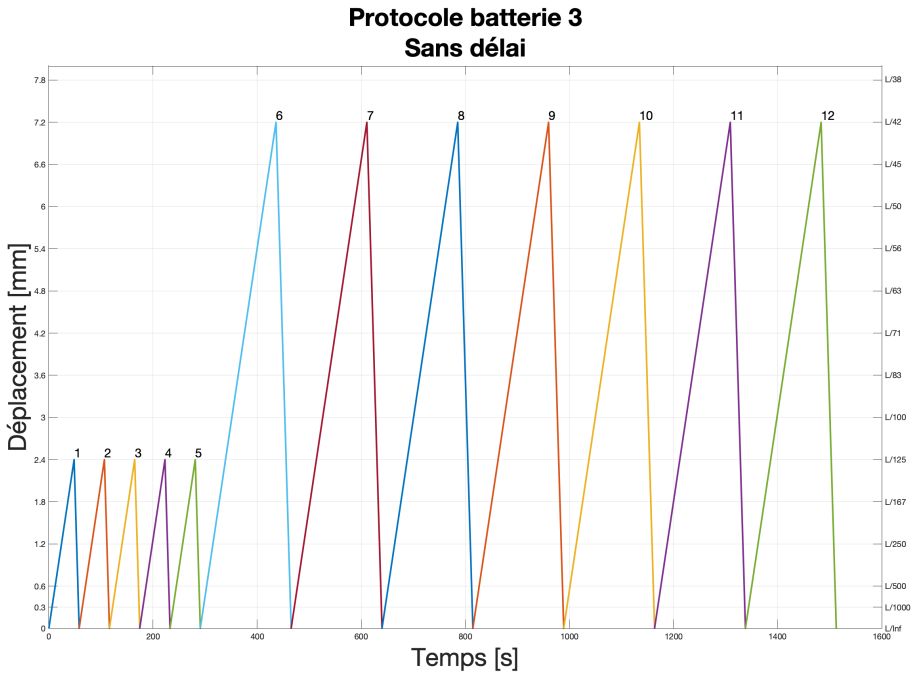
Cette phase est en directe réaction à la précédente. Elle vise à étudier le bois selon les paramètres énoncés dans la conclusion (Point 4.2.1, p. 54). À nouveau, il convient de rappeler que les résultats sont qualitatifs et ne permettent que de déterminer si un paramètre est influençant ou non. Il ne s'agit dès lors que d'appréciation.

Troisième batterie d'essais : Délai entre deux cycles

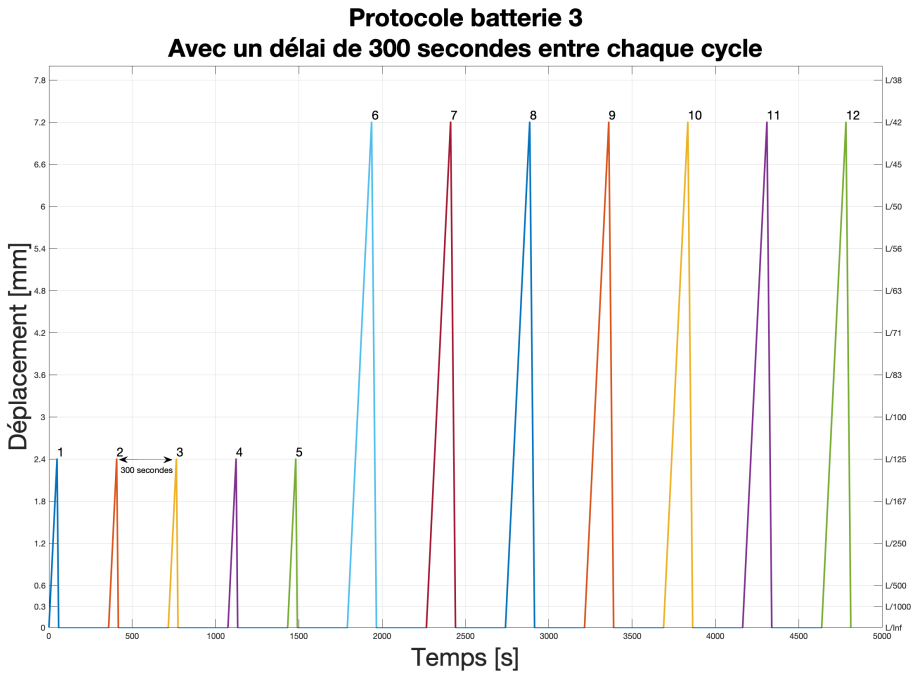
Cette troisième batterie étudie l'influence d'un temps d'attente entre deux cycles de chargement-déchargement. L'attente se passe naturellement après le déchargement. Durant ce temps, une force minimale $F_{\min}$ est maintenue pour assurer que l'éprouvette reste en place. Un essai de fluage a été réalisé pour déterminer l'influence de la force minimale sur la déformation du bois. Il consistait à simplement maintenir la charge $F_{\min}$ pendant une heure sur une éprouvette. Aucune augmentation de la déformation n'a été observée.

Pour rappel, cette batterie, étant donné qu'elle compare deux valeurs d'un même paramètre, suit une approche comparative. Dès lors, les échantillons ont été réalisés par duo comme expliqué au Point 4.1.2 (p. 47) et rappelé dans le Tableau 4.4. Comme ces duos sont dans la même pente de fil et a fortiori dans le même tronc, les différences de comportement observées résultent en principe des différentes valeurs du paramètre étudié. Cette réflexion se base sur l'hypothèse que les fibres gardent leurs propriétés mécaniques sur une longueur raisonnable (moins d'un mètre).

Protocole



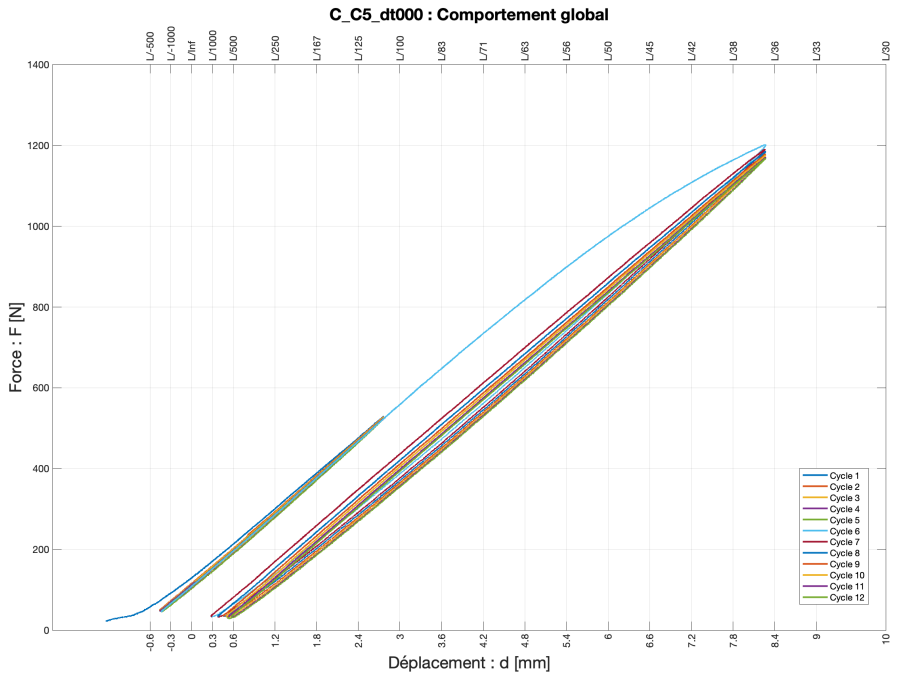
(a) Sans délai



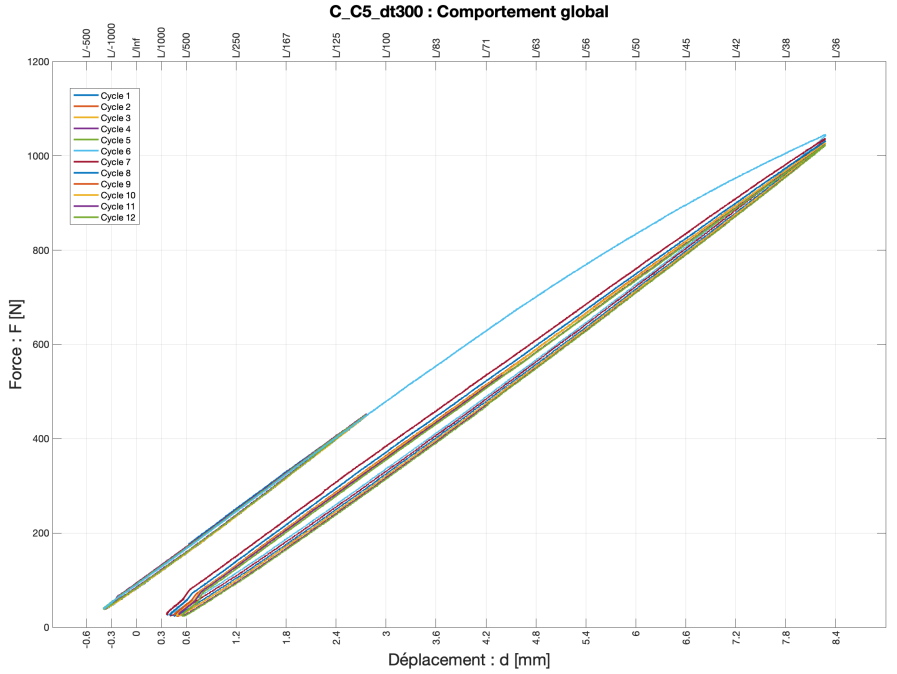
(b) Avec un délai de 5 minutes, soit 300 secondes

Figure F.8 – Représentation graphique des protocoles de la troisième batterie

Global



(a) Sans délai



(b) Avec un délai de 5 minutes, soit 300 secondes

FIGURE F.9 – Comportement global des éprouvettes C5 de la troisième batterie

- **Semblable** : Les Figures F.9a et F.9b ne sont globalement pas différentes. Le comportement avec ou sans délai suit la même logique ;
- **Proximité des courbes** : Avec un temps d'attente, les courbes sont plus proches les unes des autres faisant penser que l'impact est réduit par rapport à celles sans délai.

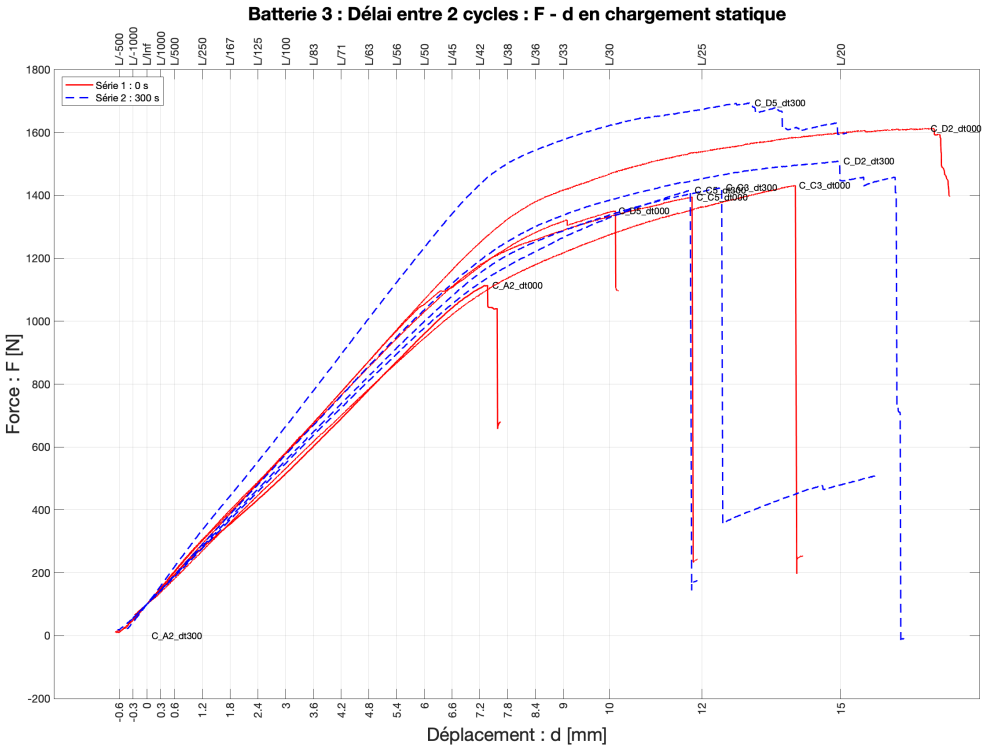


Figure F.10 – Comportement lors du chargement statique des éprouvettes de la troisième batterie ayant préalablement subies un protocole en chargement cyclique

- **Longueur de la linéarité** : La linéarité est plus longue que lors de la deuxième batterie ;
- **Transition linéarité/plateau** : La transition est plus nette, l'angle entre le plateau et la droite est plus fort que lors de la deuxième batterie ;
- **Influence du délai** : Aucune différence notable entre les éprouvettes ayant subies un essai avec ou sans délai n'est remarquée ;
- **Rupture en cascade** : La rupture se fait en plusieurs temps. Entre chacun, le bois récupère un peu de résistance. Il s'agit là du «nerf du bois » précédemment identifié (Points F.1, p. 127 et F.1, p. 134).

Éprouvette	Déplacement à la rupture [mm]	Flèche relative	Force maximale [N]	Contrainte [MPa]	Module de Young [GPa]
	Sans délai				
A2	8,7	$l/34,47$	1114,3	74,42	9,32
C3	16,34	$l/18,36$	1432,14	95,64	9,86
C5	13,82	$l/21,7$	1395,34	93,19	10,81
D2	20,09	$l/14,94$	1613,36	107,75	10,72
D5	12,34	$l/24,31$	1350,84	90,21	10,87
Moyenne	12,84	$l/20,29$	1321,64	88,26	10,09
Percentile 5%			985,04	65,78	
	Avec un délai de 5 minutes				
A2 [1]					
C3	14,31	$l/20,97$	1424,95	95,16	10,38
C5	13,82	$l/21,7$	1417,26	94,65	10,12
D2	17,87	$l/16,79$	1509,43	100,8	10,78
D5	15,44	$l/19,43$	1694,6	113,17	12,71
Moyenne	14,67	$l/18,89$	1462,16	97,65	10,55
Percentile 5%			1206,32	80,56	

Tableau F.3 – Valeurs à la rupture lors du chargement statique des éprouvettes de la troisième batterie ayant préalablement subies un protocole en chargement cyclique

- **Flèche** : Il n'y a pas de différence fondamentale entre les valeurs de déplacement à la rupture des éprouvettes avec ou sans délai. Il faut faire attention au fait que l'éprouvette du duo A5 ayant eu le protocole avec délai s'est cassée lors de ce dernier. Étant donné que c'est ce duo qui plombe les résultats du protocole sans délai, les données sont forcément sensiblement différentes. L'ordre de grandeur de la troisième batterie est le même que celui des deux premières ;
- **Contrainte** : Les forces et contraintes sont bien supérieures (+50%) aux données de la deuxième batterie ;
- **Rigidité** : Les modules de Young sont pratiquement identiques entre les deux protocoles utilisés. Bien que légèrement supérieurs à ceux des deux batteries précédentes, ils restent dans le même ordre de grandeur.

1. Cette éprouvette s'est cassée lors de l'essai cyclique. Elle ne pouvait alors subir un essai en chargement statique.

Déplacement résiduel

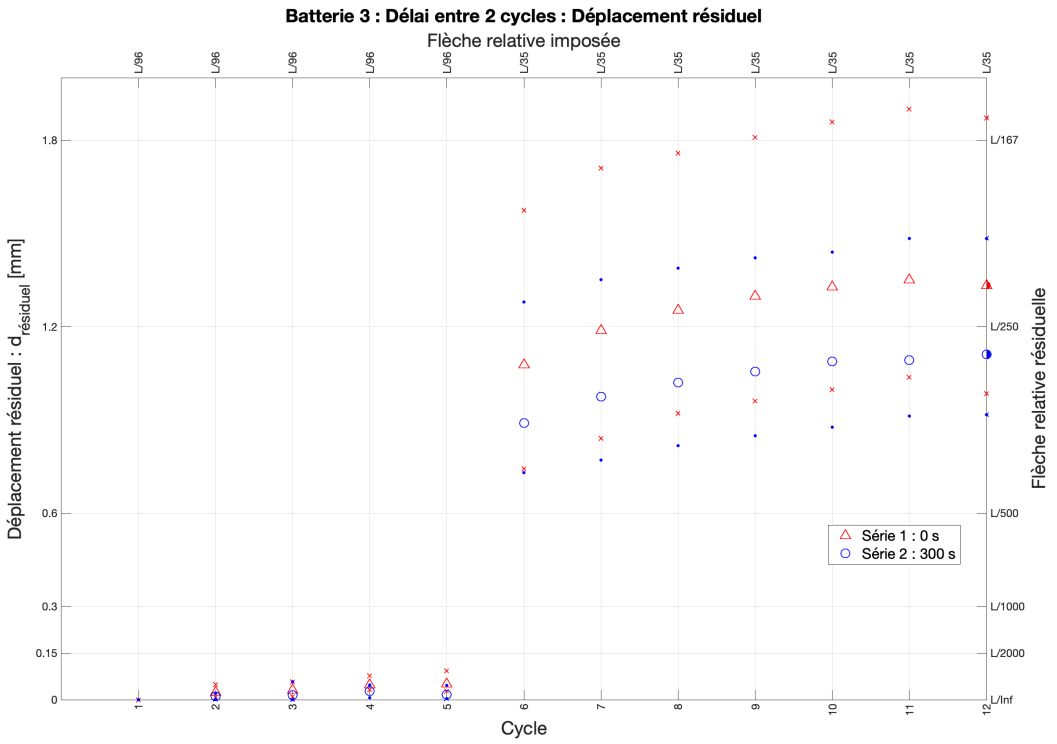


Figure F.11 – Déplacement résiduel par cycle de la troisième batterie. Les triangles rougeâtres ont été obtenues lors du protocole sans délai. Les autres formes (bleuâtres) ont été prises durant celui avec un délai de 5 minutes.

- **Le délai est favorable** : Pour tous les cycles, le déplacement résiduel est plus petit avec un délai de 5 minutes ;
- **Le délai uniformise les données** : Les données sans délai sont plus éparses. En effet, les «x» sont moins proches des triangles que les «•» des ronds ;
- **Convergence** : Dans les deux cas, les données convergent vers une valeur. Ceci pourrait impliquer l'existence d'une plasticité maximale pour un certain chargement.

Force maximale

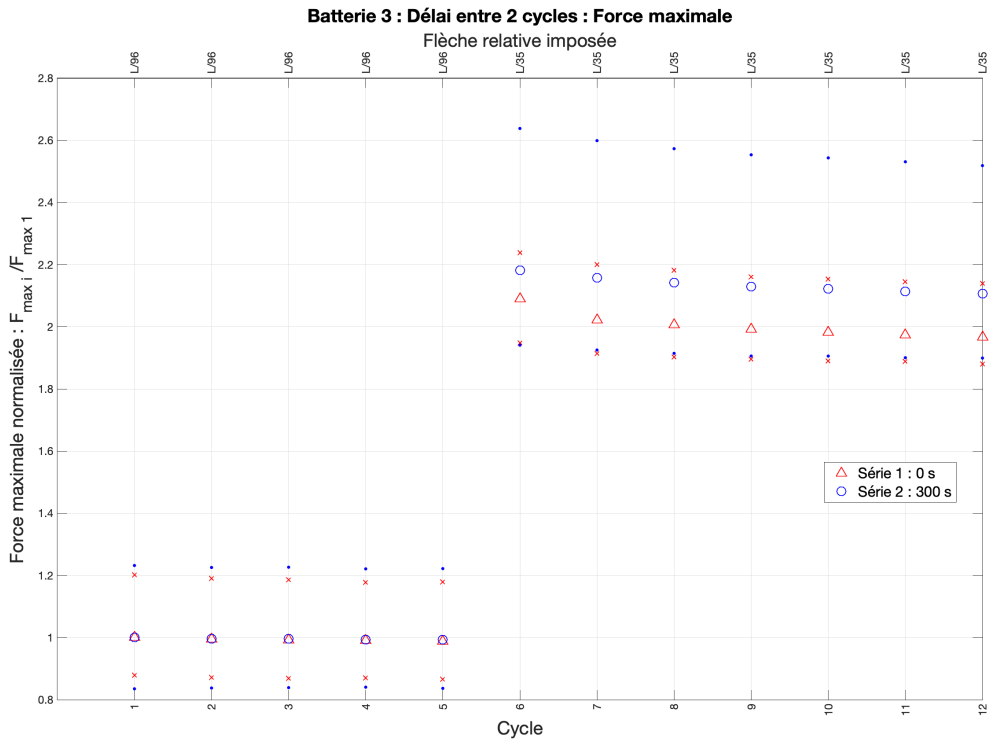


FIGURE F.12 – Force maximale par cycle de la troisième batterie. Les triangles rougeâtres ont été obtenues lors du protocole sans délai. Les autres formes (bleuâtres) ont été prises durant celui avec un délai de 5 minutes.

- **Miroir inversé du déplacement résiduel** : La force maximale est le miroir inversé du déplacement résiduel. Cela s'explique par le fait que le déplacement imposé ne s'actualisait pas en fonction du déplacement résiduel du cycle précédent. Par exemple, s'il restait un déplacement $d_{res_i} = 3$ mm au cycle i et que le déplacement imposé du cycle $i+1$ était 10 mm, le bois ne subirait qu'une différence de déplacement de 7 mm. Or au cycle i, il avait dû subir une différence de déplacement de 10 mm pour trouver sa force maximale. Dès lors, étant donné que $\Delta d_{res_{i+1}} < \Delta d_{res_i}$, $F_{\max_{i+1}} < F_{\max_i}$. Le raisonnement suit simplement d'une règle de trois puisque visiblement (Figure F.10) la relation liant la force au déplacement est linéaire. Au vu de ce qui est dit, les observations faites pour le déplacement résiduel sont également valables pour la force maximale (Point F.2).

Rigidité

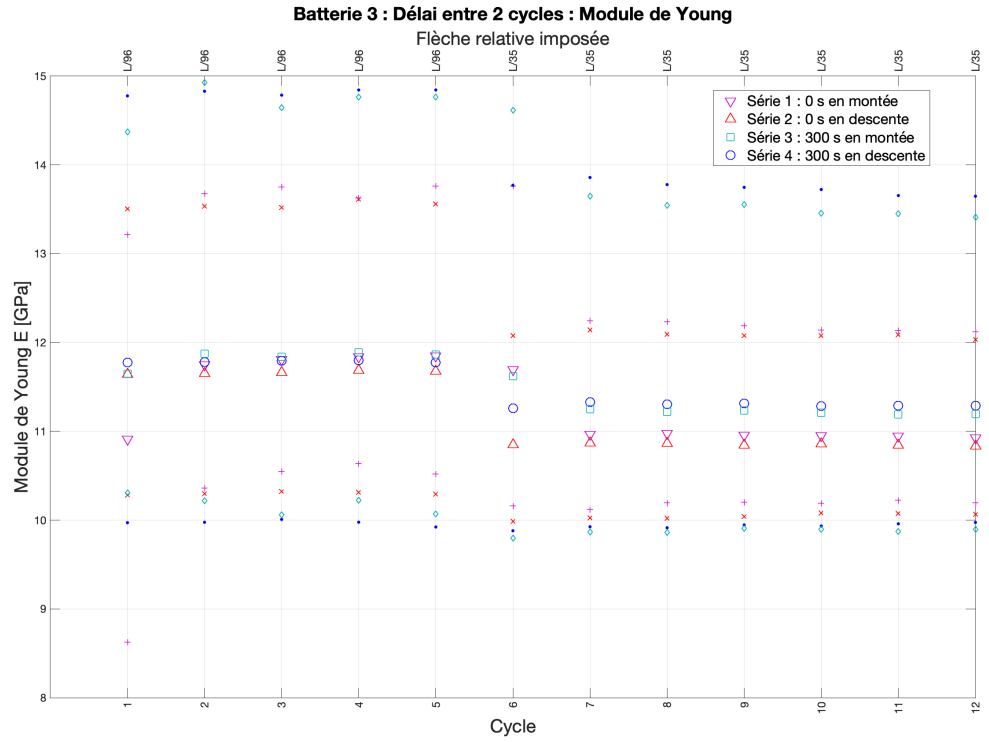


Figure F.13 – Module de Young par cycle de la troisième batterie. Les triangles rougeâtres ont été obtenues lors du protocole sans délai. Les autres formes (bleuâtres) ont été prises durant celui avec un délai de 5 minutes. Les couleurs primaires (le triangle vers le haut et le rond) ont été prises en descente.

- **Confusion** : Les quatre mesures de rigidité se confondent dans la première partie du graphe (jusqu'au cycle 5) ;
- **Le délai est favorable** : Dans la seconde partie (à partir du 6e cycle), les mesures prises lors du protocole avec un délai de 5 minutes sont supérieures aux autres. Cette différence reste cependant tout à fait minime étant donné qu'elle tourne autour de 5% ;
- **Identité entre la montée et la descente** : Il n'existe pas de différence notable entre la prise d'information lors du chargement ou du déchargement ;
- **Le délai diversifie les données** : Contrairement au déplacement résiduel, les données sans délai sont moins éparses. En effet, les «x» et «+» sont plus proches des triangles que les «•» et «◇» des ronds ou carrés.

Fonction S

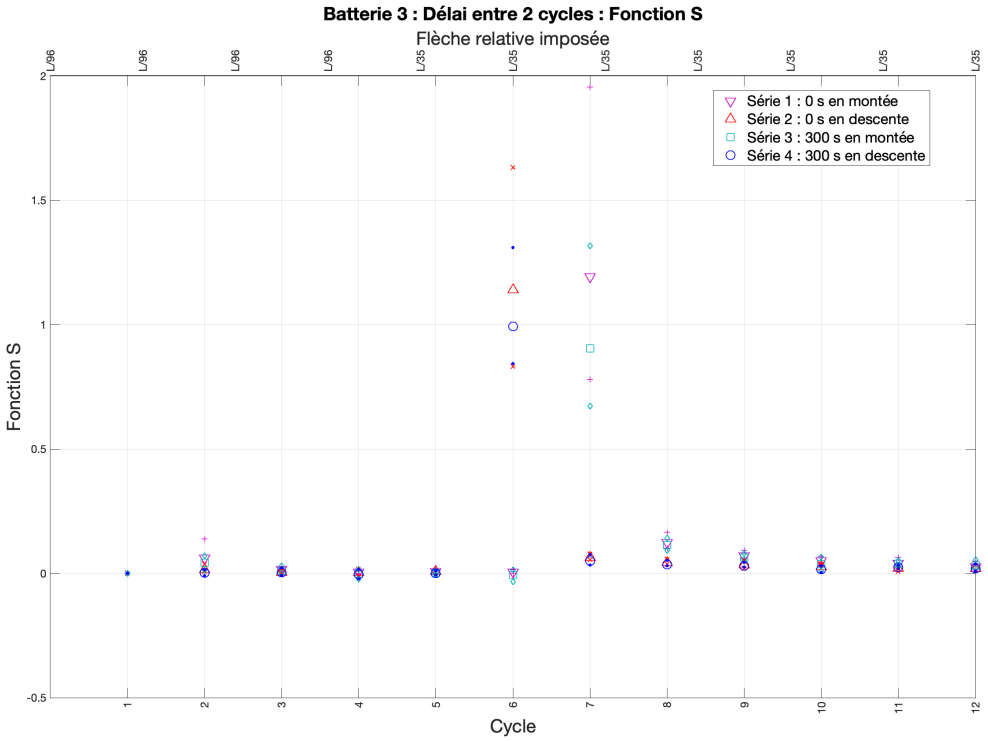


FIGURE F.14 – Fonction S par cycle de la troisième batterie. Les triangles rougeâtres ont été obtenues lors du protocole sans délai. Les autres formes (bleuâtres) ont été prises durant celui avec un délai de 5 minutes. Les couleurs primaires (le triangle vers le haut et le rond) ont été prises en descente.

Cette mesure peut être prise en montée comme en descente. Comme nous le voyons à la Figure F.14, la valeur la plus importante ne se trouve pas au même cycle selon qu'on regarde la descente ou la montée. Cela est normal. En effet, lorsque l'on a fait plusieurs cycles jusqu'à un même palier de déplacement, la montée du cycle allant à un déplacement plus important se fera le long de ces cycles. Ceci est observable à la Figure F.9 (p. 137) avec la courbe du cycle 6 (en bleu). La fonction S sera proche de 0 en montée : $S_{6_{montée}} \approx 0$. En effet, la fonction S calcule la somme des différences de position que sur le segment des forces communes aux deux courbes. Cependant, toujours sur la Figure F.9 (p. 137), nous voyons que la descente du cycle 6 se trouve fort loin de celle du 5e. Dès lors, la fonction S sera différente de 0 : $S_{6_{descente}} > 0$. Tout l'inverse est vrai pour le cycle suivant le premier chargement à un nouveau palier de déplacement, le 7e cycle dans l'exemple (Figure F.9, p. 137). En effet, la montée du 7e cycle sera loin de celle du 6e. Dès lors, $S_{7_{montée}} > 0$. Par contre, la descente sera très proche de celle du 6e : $S_{7_{descente}} \approx 0$.

- **Nouveau chargement influe** : Seul le premier chargement à un nouveau palier

de déplacement crée une valeur importante de S comme en témoigne les valeurs de descente des cycles 2 et 7. Autrement dit, le premier cycle provoque un fort déplacement de la courbe dans le plan force-déplacement en comparaison avec les autres cycles. Dès lors, une fois cette étape difficile passée, l'élément de bois à tendance à repasser par le même chemin de force. La dissonance observée entre les données en montée et en descente est normale au vu de ce qui est dit plus haut ;
- **Convergence vers 0** : La convergence vers 0 aussi bien dans la première que la deuxième partie implique qu'à terme, l'éprouvette passera exactement par le chemin du plan force-déplacement emprunté par le cycle précédent. Ceci est concordant avec le graphe de déplacement résiduel (Figure F.11) ;
- **Le délai impacte peu** : Aucune distinction forte n'est notée entre les deux protocoles. Lors d'un nouveau palier de déplacement, la valeur du protocole sans délai est légèrement supérieure. Cette différence disparaît dès le second cycle d'un palier.

Conclusion

- **Qualitatif** : Il convient de rappeler que les résultats n'ont que l'humble ambition d'être pris qu'à titre qualitatif ;
- **Le délai est favorable** : Protocole avec un délai de 5 minutes par rapport à celui sans délai : le déplacement résiduel est moindre, la force maximale et la rigidité sont supérieures ;
- **Nouveau chargement impactant** : Le premier chargement à un palier de déplacement est celui qui impacte le plus les échantillons au vu des observations. En effet, c'est là que sont notées les plus grandes valeurs de S. C'est aussi à partir de cette transition que des phénomènes différents sont observés : Nouvelle valeur du module de Young et, naturellement, de la force maximale et du déplacement résiduel ;
- **Convergence** : Bien qu'il existe un déplacement résiduel, il converge ;
- **Linéarité accrue** : Lors des essais statiques *a posteriori*, la zone linéaire est plus importante que lors de la deuxième batterie. Bien qu'il semble tout à fait illusoire, l'écrouissage du bois reste un doux fantasme. Il mérite certainement une étude approfondie, sortant du cadre de ce travail.

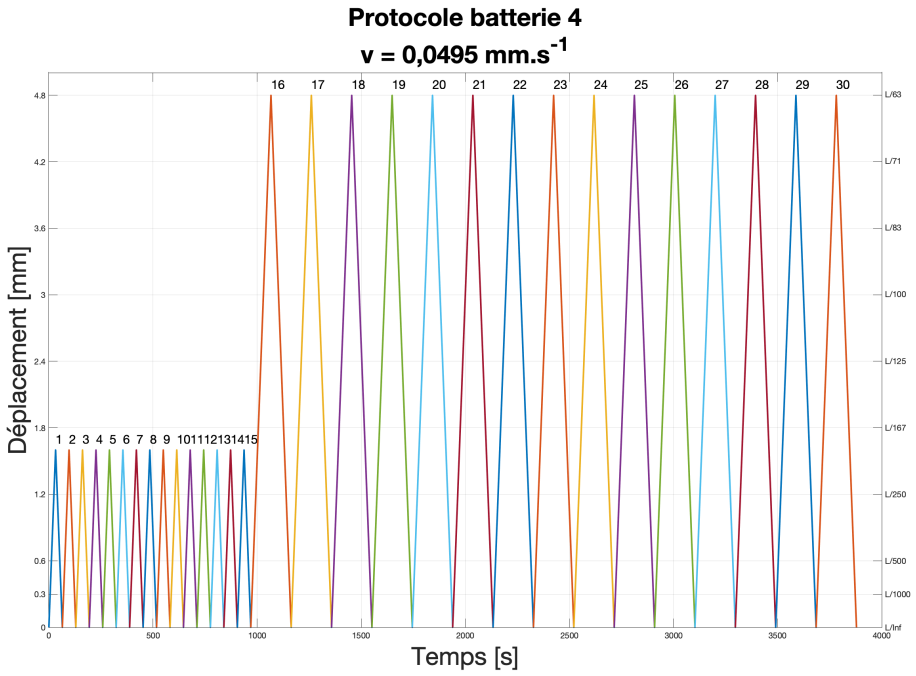
Quatrième batterie d'essais : Vitesses de chargement et déchargement

Cette quatrième batterie étudie l'influence des vitesses de chargement et déchargement. Cette batterie est assez proche de la précédente. Elles sont toutes les deux réalisées sur le même dispositif avec des éprouvettes de dimensions identiques. Les résultats de la précédente seront dès lors représentés sur les figures à l'aide de marques vertes de forme étoilée. Ils sont intéressants car lors de cette batterie les vitesses de chargement et

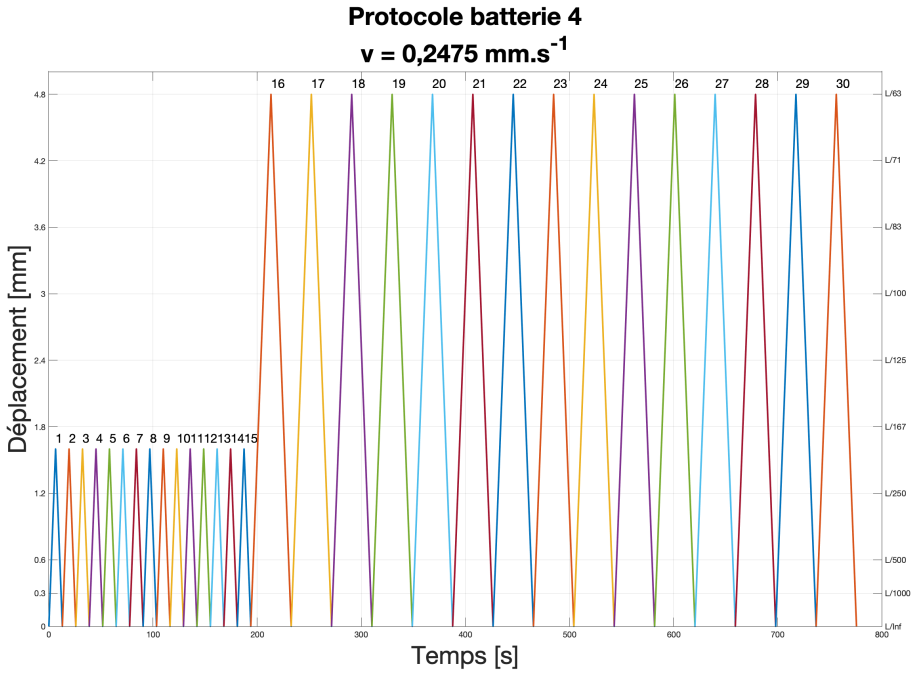
déchargement étaient différentes, respectivement 0,0495 et 0,2475 mm/s. Tandis que dans la présente batterie, les vitesses de chargement et déchargement sont toujours identiques. Pour la première moitié des éprouvettes, elles valent 0,0495 mm/s et, pour la seconde moitié, elles valent 0,2475 mm/s.

Cette batterie, étant donné qu'elle compare deux valeurs d'un même paramètre, suit une approche comparative. Dès lors, les échantillons ont été réalisés par duo comme expliqué au Point 4.1.2 et rappelé dans le Tableau 4.4. Comme ces duos sont dans la même pente de fil et a fortiori dans le même tronc, les différences de comportement observées résultent en principe des différentes valeurs du paramètre étudié. Cette réflexion se base sur l'hypothèse que les fibres gardent leurs propriétés mécaniques sur une longueur raisonnable (moins d'un mètre).

Protocole



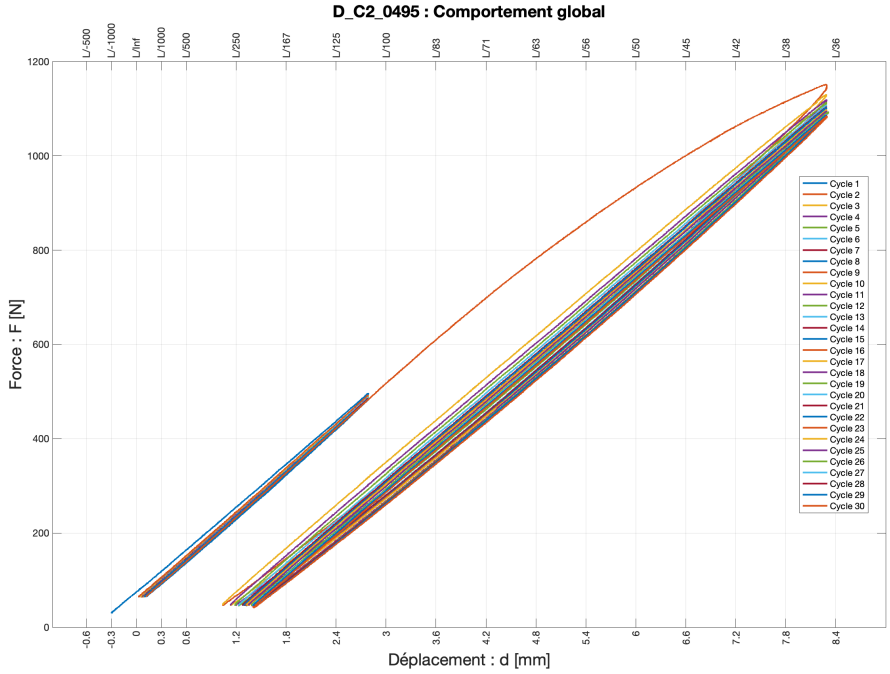
(a) Avec une vitesse de 0,0495 mm/s pour le chargement et le déchargement



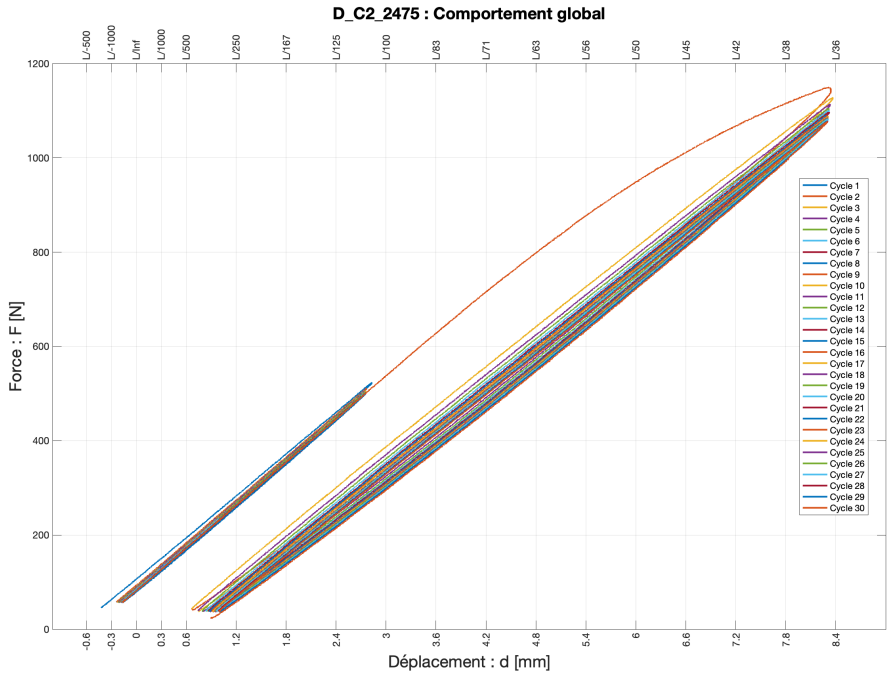
(b) Avec une vitesse de 0,2475 mm/s pour le chargement et le déchargement

Figure F.15 – Représentation graphique des protocoles de la quatrième batterie

Global



(a) Avec une vitesse de 0,0495 mm/s pour le chargement et le déchargement



(b) Avec une vitesse de 0,2475 mm/s pour le chargement et le déchargement

FIGURE F.16 – Comportement global des éprouvettes C2 de la quatrième batterie

- **Semblable** : Les Figures F.16a et F.16b ne sont globalement pas différentes. Le comportement avec une haute ou basse vitesse suit la même logique. Nous remarquons que pour le duo d'éprouvettes présenté, les résultats des deux protocoles sont particulièrement proches. Le comportement global de chaque éprouvette de la présente batterie se trouve à l'Annexe M (p. 268) ;
- **Comparaison avec la troisième batterie** : Peu importe le temps d'attente ou la vitesse appliquée, le comportement global en chargement cyclique reste dans la même philosophie que les batteries précédentes.

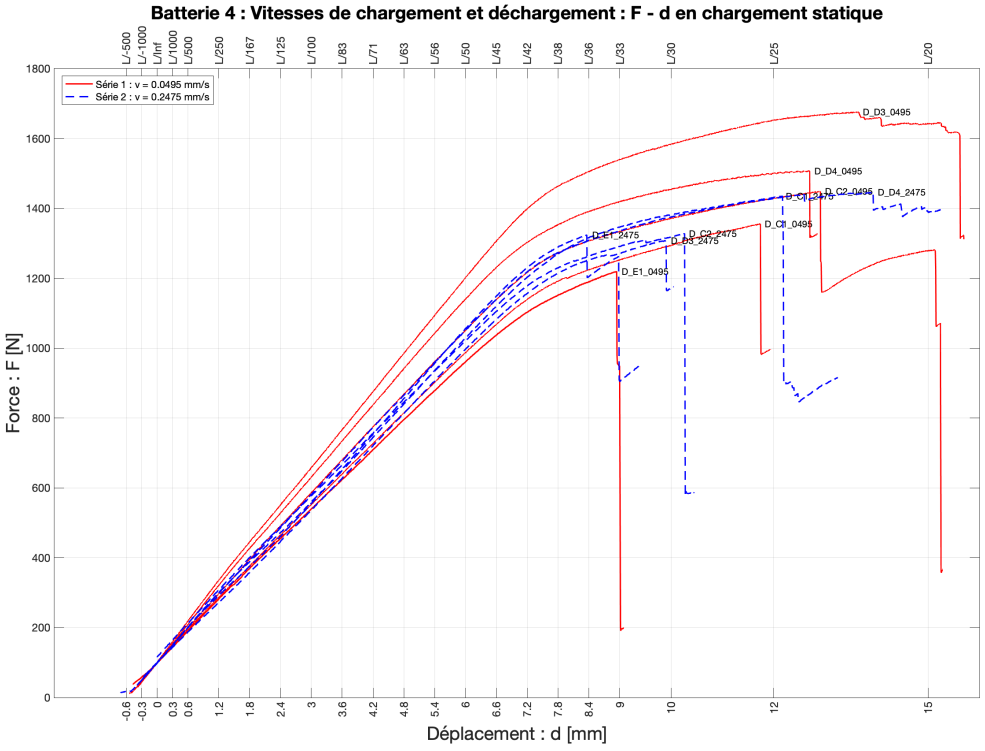


Figure F.17 – Comportement lors du chargement statique des éprouvettes de la quatrième batterie ayant préalablement subies un protocole en chargement cyclique

- **Confirmation** : Cette figure confirme les observations de la troisième batterie. Hormis le point sur l'influence du délai, elles sont identiques (Point F.2, p. 138) ;
- **Influence de la vitesse** : Aucune différence notable entre les éprouvettes ayant subies un essai avec une haute ou une basse vitesse n'est remarquée.

Éprouvette	Déplacement à la rupture [mm]	Flèche relative	Force maximale [N]	Contrainte [MPa]	Module de Young [GPa]
	$v = 0,0495$ mm/s				
C1	13,75	$l/21,82$	1355,88	90,55	10,21
C2	15,13	$l/19,82$	1448,65	96,75	11
D3	16,07	$l/18,67$	1676,33	111,95	12,48
D4	15,14	$l/19,81$	1507,57	100,68	12
E1	10,78	$l/27,82$	1219,34	81,43	9,97
Moyenne	13,49	$l/20,37$	1384,98	92,49	10,77
Percentile 5%			1069,21	71,41	
	$v = 0,2475$ mm/s				
C1	13,87	$l/34,47$	1435,19	95,85	10,85
C2	11,76	$l/18,36$	1328,54	88,72	10,45
D3	11,66	$l/21,7$	1307,89	87,34	9,82
D4	16,4	$l/14,94$	1447,18	96,65	10,29
E1	10,22	$l/24,31$	1324,17	88,43	10,11
Moyenne	11,98	$l/20,29$	1345,89	89,88	10,13
Percentile 5%			1208,53	80,71	

Tableau F.4 – Valeurs à la rupture lors du chargement statique des éprouvettes de la quatrième batterie ayant préalablement subies un protocole en chargement cyclique

- **Confirmation** : Cette figure confirme les observations de la troisième batterie. Elles sont identiques (Point F.2, p. 139). En effet, les valeurs des troisième et quatrième batteries sont très proches.

Déplacement résiduel

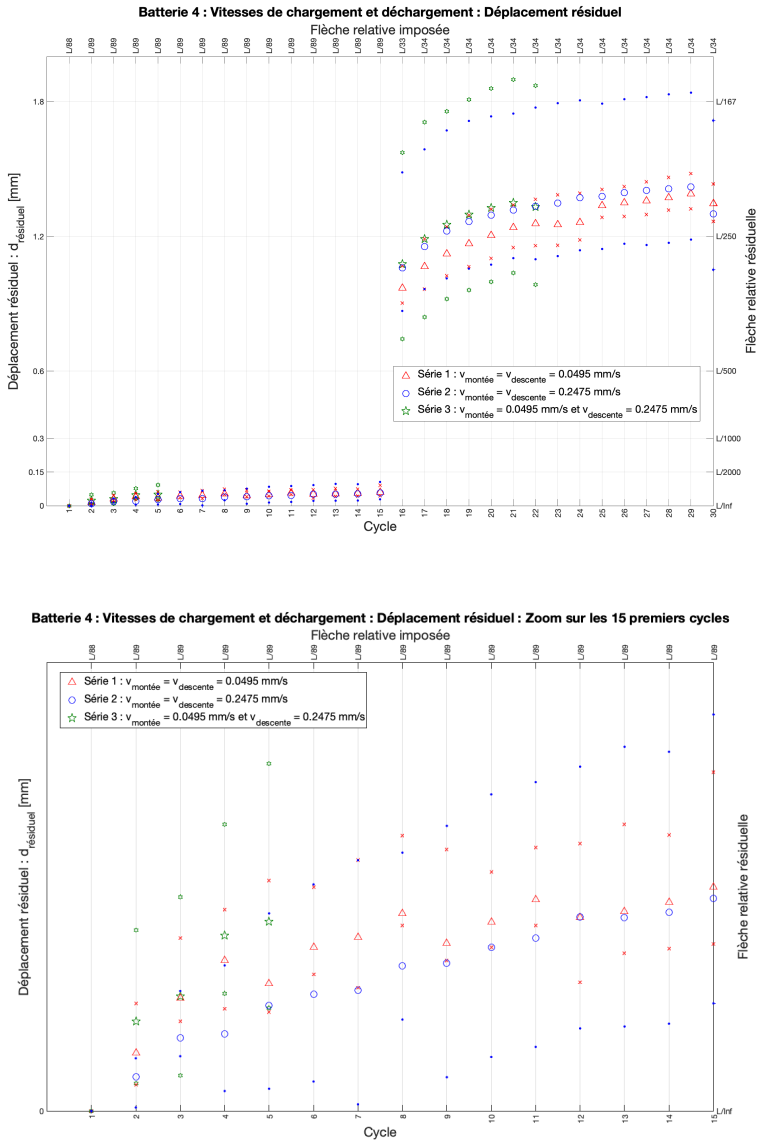


Figure F.18 – Déplacement résiduel par cycle de la troisième et quatrième batteries. Les triangles rougeâtres ont été obtenues avec $v = 0,0495$ mm/s pour le chargement et le déchargement. Les étoiles verdâtres ont été obtenues avec $v = 0,0495$ mm/s en chargement et $v = 0,2475$ mm/s en déchargement. Les autres formes (bleuâtres) ont été obtenues avec $v = 0,2475$ mm/s pour le chargement et le déchargement.

- **Identité des vitesses est favorable** : Lorsque les vitesses de chargement et déchargement sont identiques, le déplacement résiduel est moindre ;
- **Basse vitesse est favorable**.

Force maximale

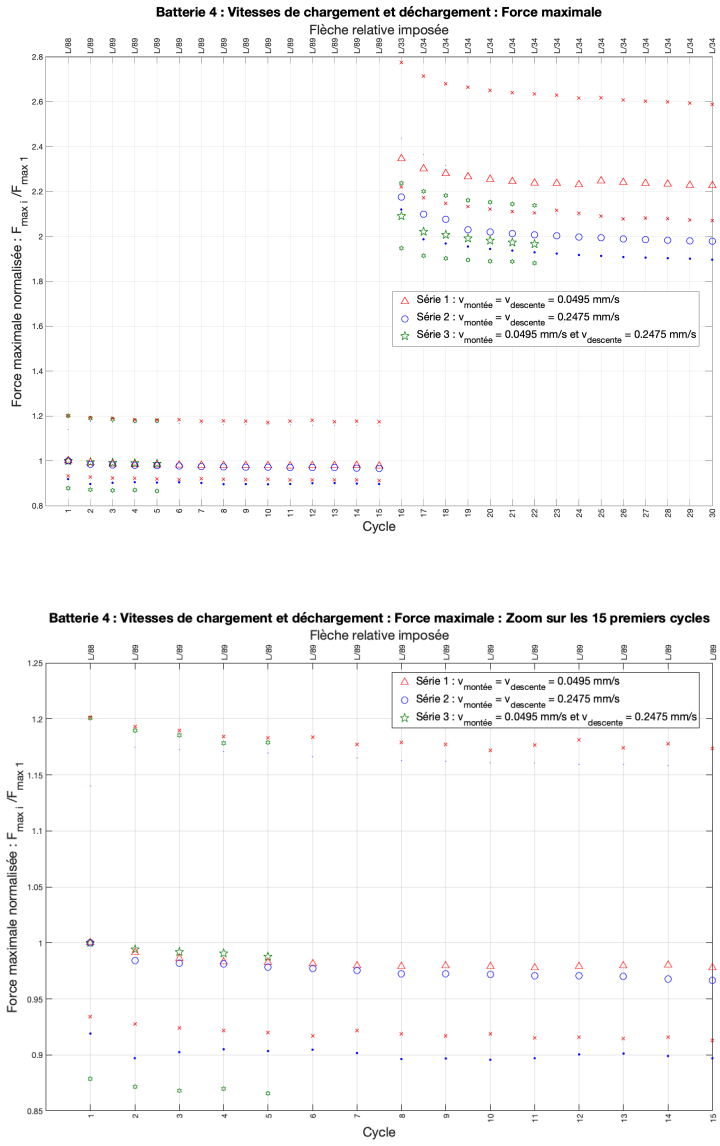


FIGURE F.19 – Force maximale par cycle de la troisième et quatrième batteries. Les triangles rougeâtres ont été obtenues avec $v = 0,0495$ mm/s pour le chargement et le déchargement. Les étoiles verdâtres ont été obtenues avec $v = 0,0495$ mm/s en chargement et $v = 0,2475$ mm/s en déchargement. Les autres formes (bleuâtres) ont été obtenues avec $v = 0,2475$ mm/s pour le chargement et le déchargement.

- **Miroir inversé du déplacement résiduel** : voir Point F.2, p. 141.

Rigidité

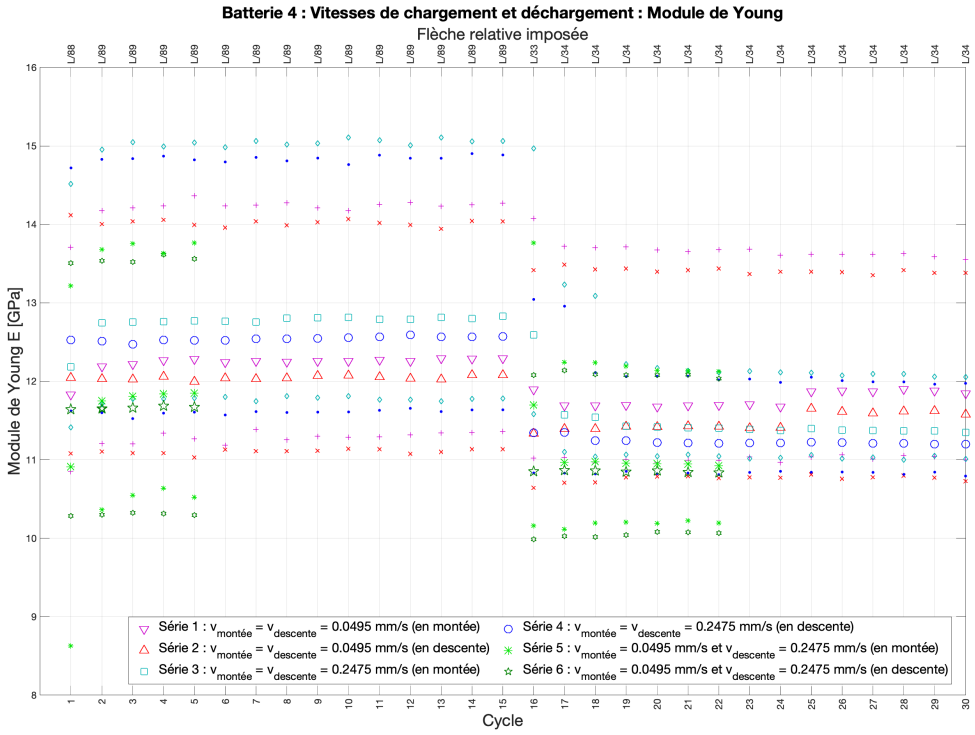
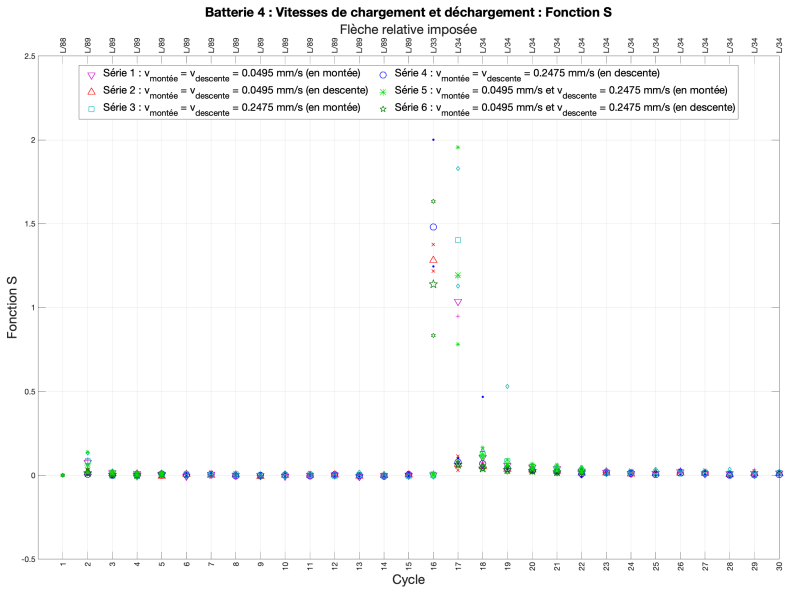
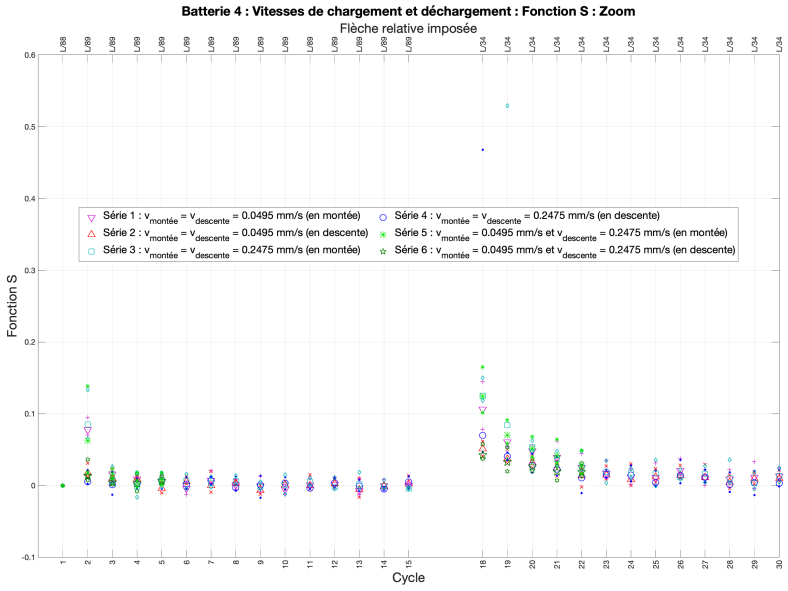


Figure F.20 – Module de Young par cycle de la troisième et quatrième batteries. Les triangles rougeâtres ont été obtenues avec $v = 0,0495$ mm/s pour le chargement et le déchargement. Les étoiles verdâtres ont été obtenues avec $v = 0,0495$ mm/s en chargement et $v = 0,2475$ mm/s en déchargement. Les autres formes (bleuâtres) ont été obtenues avec $v = 0,2475$ mm/s pour le chargement et le déchargement. Les couleurs primaires (le triangle vers le haut, le rond et l'étoile à 5 branches) ont été prises en descente.

- **Distinction** : Les six mesures de rigidité ne se confondent pas autant que lors de la troisième batterie. Ils ont une différence de l'ordre de 5% en fonction du protocole utilisé ;
- **Vitesse impacte peu** : Dans la première partie, le protocole à haute vitesse a un module de Young plus important. C'est l'inverse dans la seconde moitié des cycles. Les conclusions sont difficiles à tirer ;
- **Différence entre la montée et la descente** : Il existe une légère différence de l'ordre de 2% entre la prise d'information lors du chargement ou du déchargement ;
- **Identité des vitesses est favorable** : Lorsque les vitesses de chargement et déchargement sont identiques, le module de Young est supérieur.

Fonction S





(a) Agrandissement des cycles 1 à 15 et 18 à 30

FIGURE F.21 – Fonction S par cycle de la troisième et quatrième batteries. Les triangles rougeâtres ont été obtenues avec $v = 0,0495$ mm/s pour le chargement et le déchargement. Les étoiles verdâtres ont été obtenues avec $v = 0,0495$ mm/s en chargement et $v = 0,2475$ mm/s en déchargement. Les autres formes (bleuâtres) ont été obtenues avec $v = 0,2475$ mm/s pour le chargement et le déchargement.

- **Nouveau chargement influe** : voir F.2, p. 143 ;

- **Convergence vers 0** : voir F.2, p. 143 ;
- **Vitesse impacte peu** : Aucune distinction forte n'est notée entre les trois protocoles. Une fois n'est pas coutume, lorsque la vitesse de chargement est différente de celle de déchargement (Batterie 3 (C)), la fonction S est légèrement inférieure, ce qui est favorable.

Conclusion

- **Qualitatif** : Il convient de rappeler que les résultats n'ont que l'humble ambition d'être pris qu'à titre qualitatif ;
- **la vitesse influence peu** : Aucune différence fondamentale n'a pu être dégagée à travers l'utilisation de différentes vitesses. L'observation la plus récurrente est qu'il est négatif d'utiliser deux vitesses différentes pour le chargement et le déchargement. Cette conclusion est à prendre avec des pincettes. En effet, il n'y a aucun lien entre les éprouvettes de la troisième batterie et de la quatrième batterie. Elles n'ont pas été réalisées dans la même pente de fil. Dès lors, leurs différences pourraient être issues de caractéristiques autres que celle de la vitesse de chargement ou déchargement ;
- **Nouveau chargement impactant** : voir F.2, p. 144 ;
- **Convergence** : voir F.2, p. 144 ;
- **Linéarité accrue** : voir F.2, p. 144.

Cinquième batterie d'essais : Nombres de cycles

L'objectif de cette première série est d'identifier l'apparition des premières flèches résiduelles et de visualiser l'impact d'un grand nombre de cycles sur le comportement du bois. Vu la complexité du protocole, le Tableau F.5 est d'une aide précieuse.

Cycle	Flèche relative imposée	Déplacement imposé [mm]	Cycle	Flèche relative imposée	Déplacement imposé [mm]	Cycle	Flèche relative imposée	Déplacement imposé [mm]
1	$l/1000$	0,2	32	$l/142,86$	1,4	63	$l/62,5$	3,2
2	$l/1000$	0,2	33	$l/142,86$	1,4	64	$l/62,5$	3,2
3	$l/1000$	0,2	34	$l/142,86$	1,4	65	$l/62,5$	3,2
4	$l/1000$	0,2	35	$l/142,86$	1,4	66	$l/55,56$	3,6
5	$l/1000$	0,2	36	$l/125$	1,6	67	$l/55,56$	3,6
6	$l/500$	0,4	37	$l/125$	1,6	68	$l/55,56$	3,6
7	$l/500$	0,4	38	$l/125$	1,6	69	$l/55,56$	3,6
8	$l/500$	0,4	39	$l/125$	1,6	70	$l/55,56$	3,6
9	$l/500$	0,4	40	$l/125$	1,6	71	$l/50$	4
10	$l/500$	0,4	41	$l/111,11$	1,8	72	$l/50$	4
11	$l/333,33$	0,6	42	$l/111,11$	1,8	73	$l/50$	4
12	$l/333,33$	0,6	43	$l/111,11$	1,8	74	$l/50$	4
13	$l/333,33$	0,6	44	$l/111,11$	1,8	75	$l/50$	4
14	$l/333,33$	0,6	45	$l/111,11$	1,8	76	$l/45,45$	4,4
15	$l/333,33$	0,6	46	$l/100$	2	77	$l/45,45$	4,4
16	$l/250$	0,8	47	$l/100$	2	78	$l/45,45$	4,4
17	$l/250$	0,8	48	$l/100$	2	79	$l/45,45$	4,4
18	$l/250$	0,8	49	$l/100$	2	80	$l/45,45$	4,4
19	$l/250$	0,8	50	$l/100$	2	81	$l/41,67$	4,8
20	$l/250$	0,8	51	$l/83,33$	2,4	82	$l/41,67$	4,8
21	$l/200$	1	52	$l/83,33$	2,4	83	$l/41,67$	4,8
22	$l/200$	1	53	$l/83,33$	2,4	84	$l/41,67$	4,8
23	$l/200$	1	54	$l/83,33$	2,4	85	$l/41,67$	4,8
24	$l/200$	1	55	$l/83,33$	2,4	86	$l/35,71$	5,6
25	$l/200$	1	56	$l/71,43$	2,8	87	$l/30,30$	6,6
26	$l/166,67$	1,2	57	$l/71,43$	2,8	88	$l/25,21$	7,93
27	$l/166,67$	1,2	58	$l/71,43$	2,8	89	$l/20,13$	9,93
28	$l/166,67$	1,2	59	$l/71,43$	2,8	90	$l/15,87$	12,6
29	$l/166,67$	1,2	60	$l/71,43$	2,8	91	$l/12,05$	16,6
30	$l/166,67$	1,2	61	$l/62,5$	3,2	92	$l/8,13$	24,6
31	$l/142,86$	1,4	62	$l/62,5$	3,2			

Tableau F.5 – Déplacements imposés lors du protocole de la cinquième batterie

Protocole

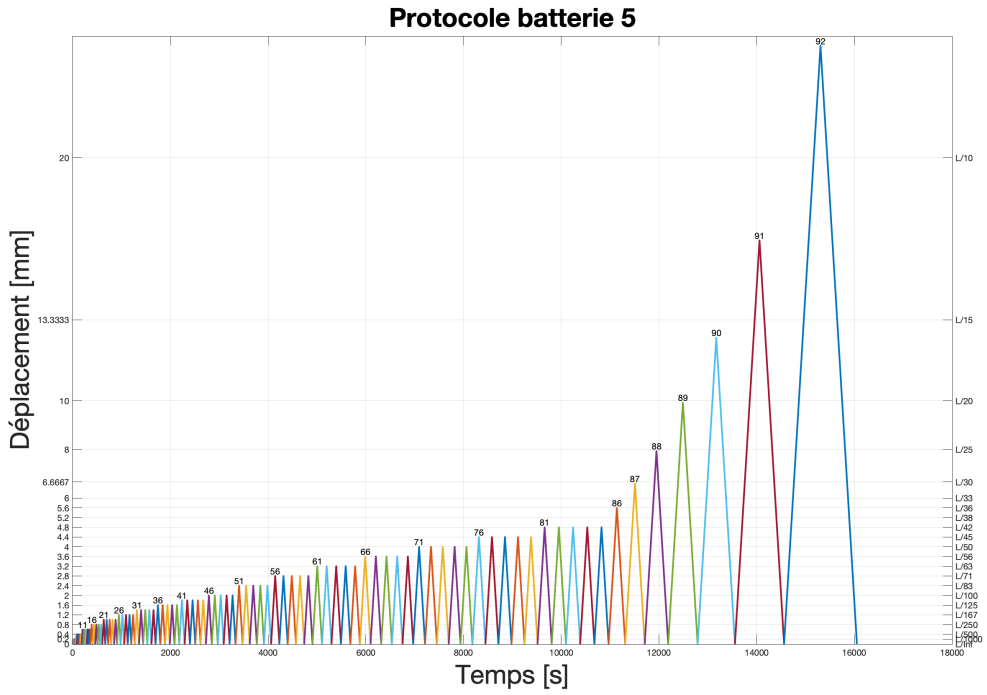


Figure F.22 – Représentation graphique du protocole de la cinquième batterie

Global

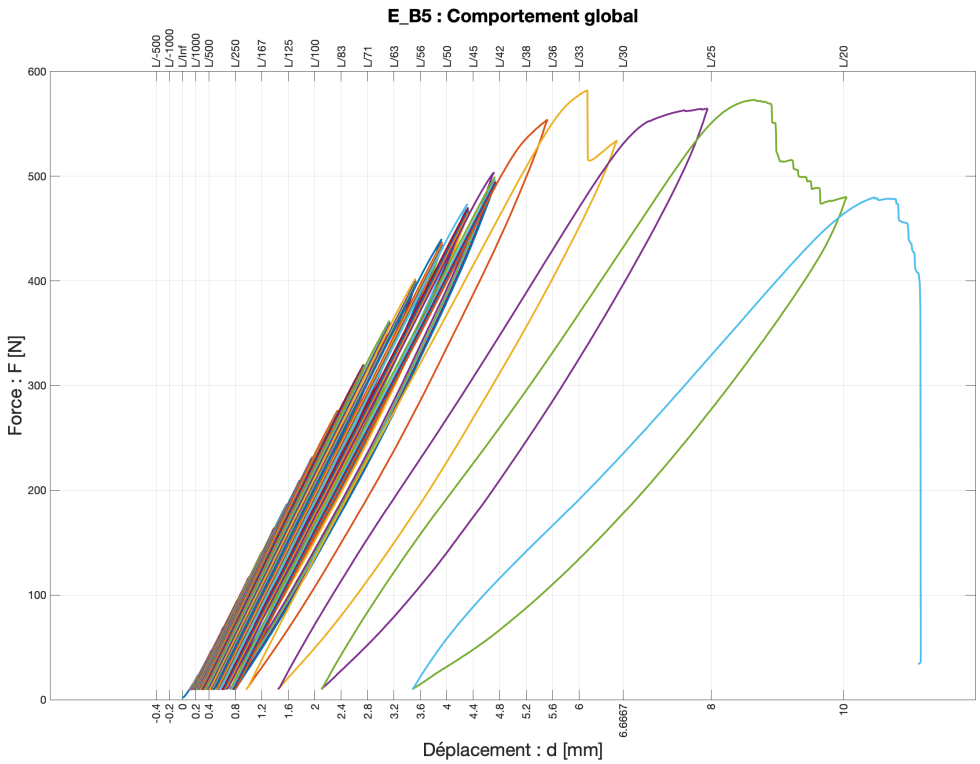


FIGURE F.23 – Comportement global de l'éprouvette B5 de la cinquième batterie

- **Confirmation** : Cette figure confirme les observations de la première batterie, notamment le point sur la rupture en cascade (Point F.1, p. 127), autrement dit le «nerf du bois» (Point F.2, p. 138) ;
- **«Nerf du bois»/résilience** : Il est tout à fait remarquable que malgré une première rupture à un déplacement de 6 mm, l'élément a su résister à trois cycles supplémentaires jusqu'à une déplacement de plus de 12 mm. Les autres éprouvettes sont à l'Annexe M.

Éprouvette	Déplacement à la force maximale [mm]	Flèche relative	Force maximale [N]	Contrainte [MPa]
A4	9,64	$l/20,74$	899,28	135,13
A5	6,42	$l/31,16$	862,01	129,53
A6	6,41	$l/31,2$	849,8	127,69
B1	9,87	$l/20,26$	561,71	84,4
B3	7,98	$l/25,05$	578,67	86,95
B4	4,92	$l/40,69$	554,14	83,27
B5	7,94	$l/25,18$	582,07	87,46
C3	7,91	$l/25,28$	466,01	70,02
C4	9,58	$l/20,88$	556,36	83,6
C5	9,74	$l/20,54$	540,5	81,22
Moyenne	7,66	$l/26,11$	609,62	91,6

Tableau F.6 – Valeurs à la force maximale obtenue durant la cinquième batterie

- **Confirmation** : Cette figure confirme les observations de la troisième batterie. Elles sont identiques (Point F.2, p. 139). En effet, les valeurs de la troisième, quatrième et cinquième batteries sont très proches pour autant qu'on regarde les propriétés indépendantes des dimensions. En effet, comme le Tableau 4.4 l'indique, le dispositif et les éprouvettes sont différents des anciennes batteries.

Déplacement résiduel

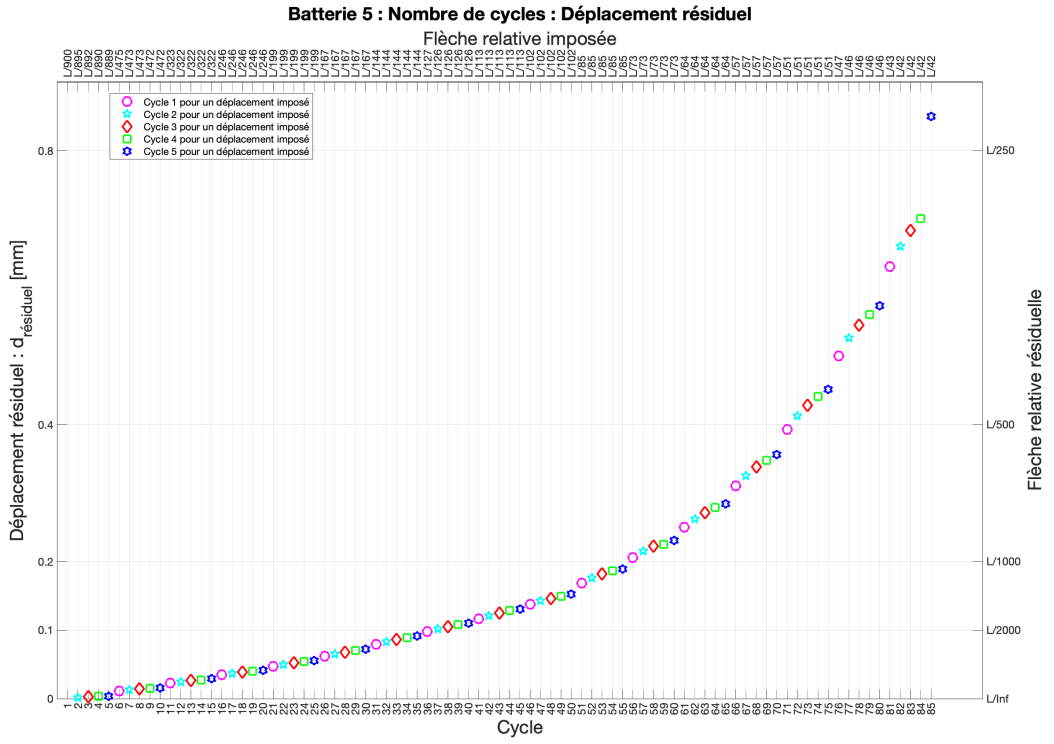


FIGURE F.24 – Déplacement résiduel par cycle de la cinquième batterie

- **Attention !** : Malgré la tentation de trouver une corrélation linéaire sur la première partie allant du cycle 1 jusqu'à 50 et une 2e droite pour les autres, permettant de trouver un point d'inflexion qui correspondrait à une éventuelle transition élastique – plastique, elle n'est pas recommandée. En effet, ici on a le déplacement résiduel pour chaque cycle. Les incréments entre palier comprenant chacun 5 cycles sont constants, par conséquent ceux entre les cycles ne le sont pas, comme le montre le Tableau F.5. Par exemple, il y a une différence entre le déplacement imposé aux cycles 5 et 6, mais pas entre le 6 et 7. De plus, à partir du cycle 51, soit une flèche imposée de $l/82$, l'incrément inter-palier passe de $l/1000$ à $l/500$, tronquant dès lors les linéarités. De surcroît, la courbe semble s'approcher davantage d'une exponentielle. Cet aspect mérite certainement une étude approfondie sortant du cadre de ce mémoire ;
- **Évolution exponentielle ou bilinéaire** : Au vu de ce qui a été dit au tiret précédent, les observations de la première batterie sont confirmées (Point F.1, p. 129).

Force maximale

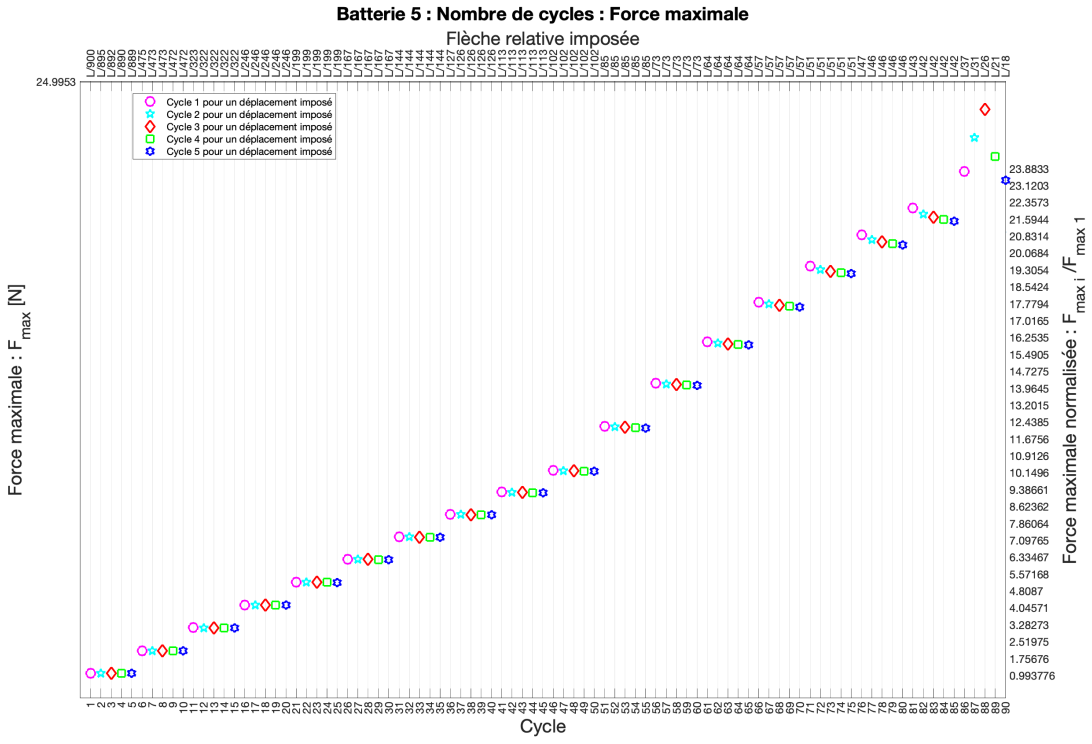


Figure F.25 – Force maximale par cycle de la cinquième batterie

- **Diminution** : Une fois le passage à l'incrément de $l/500$, soit à partir du 51e cycle, nous voyons la force diminuer avec les cycles d'un même palier. Cette observation est directement liée au déplacement résiduel comme expliqué au Point F.2 à la page 141.

Rigidité

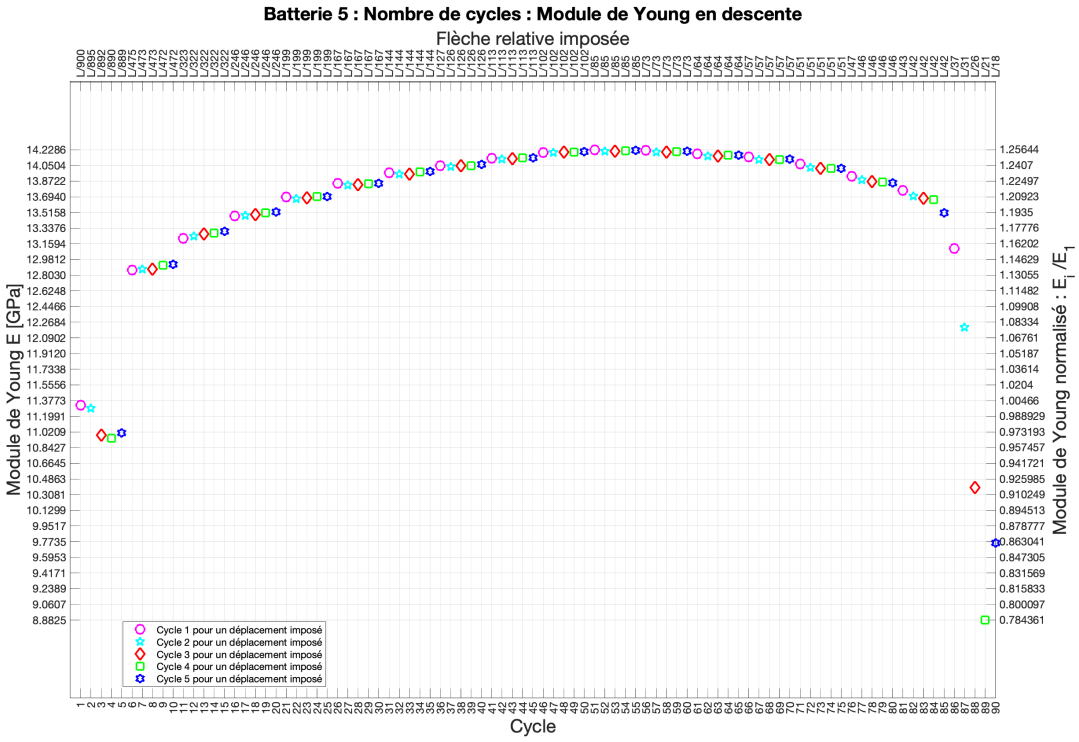


FIGURE F.26 – Module de Young, en descente, par cycle de la cinquième batterie

- **Augmentation** : La rigidité s'accroît dans les premiers cycles ;
- **Diminution** : La rigidité a tendance à diminuer avec les cycles à partir du 65e, soit un palier de déplacement imposé de $l/57$. Par conséquent, il n'y a pas d'endommagement avant ce palier ;
- **Constance** : L'essentiel des valeurs restent entre 115% et 125% de celle du premier cycle. C'est observable grâce à l'axe normalisé des ordonnées sur la droite de la figure ;
- **Confirmation** : Ces observations sont en concordance avec celle de la première batterie (Point F.1, p. 131).

Fonction S

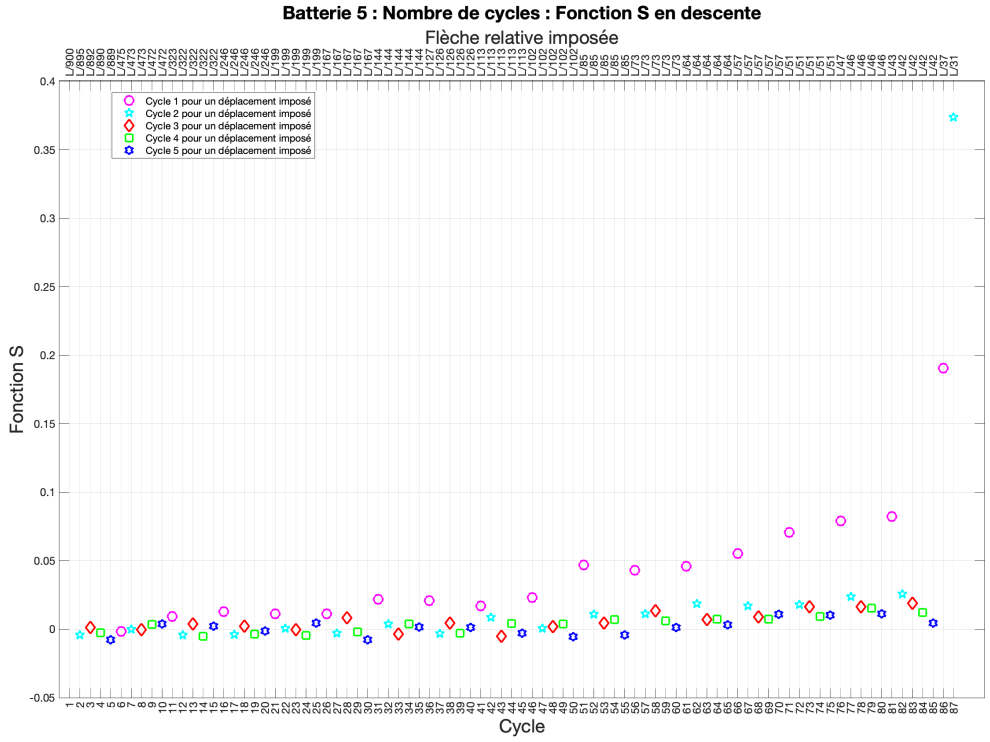


Figure F.27 – Fonction S, en descente, par cycle de la cinquième batterie

- **Faible évolution** : Les premiers cycles sont caractérisés par une augmentation presque nulle. Autrement dit, le chemin emprunté dans le plan force-déplacement est presque identique. C'est un indicateur d'un impact peu conséquent sur le déplacement résiduel et sur la rigidité. Ceci confirme la première batterie (Point F.1, p. 132) ;
- **Nouveau chargement impactant** : Le cycle perturbant le plus la fonction S est systématiquement le premier d'un palier ;
- **Convergence** : La fonction S converge rapidement avec les cycles allant à un même palier. Ainsi, le dernier cycle d'un palier aura toujours une valeur de S proche de 0.

Conclusion

- **Qualitatif** : Il convient de rappeler que les résultats n'ont que l'humble ambition d'être pris qu'à titre qualitatif ;
- **Confirmation de la première batterie** voir Point F.1, p. 132 ;
- **Transition autour de** $l/55$: Les modules de Young y commencent à diminuer, le déplacement résiduel et la fonction S à augmenter ;

- **«Nerf du bois»/résilience** ;
- **Influence raisonnable du nombre de cycle** : Difficile à repérer, il en est conclu que son influence n'est pas déterminante. En effet, le déplacement imposé impacte bien plus fort le comportement du bois. À vrai dire, les valeurs étaient toujours plus favorables lors du 5e cycle d'un palier que durant son premier ;
- **Nouveau chargement impactant** : Cette batterie démontre définitivement que ce qui impacte le plus le comportement du bois est la montée à une charge encore inédite.

Sixième batterie d'essais : Chargement Statique

Cette batterie s'inscrit dans le seul but d'avoir des données comparatives avec les autres batteries utilisant le même dispositif d'essai et se passant en chargement cyclique. Ces essais permettent d'avoir une référence établie selon les recommandations de la norme.

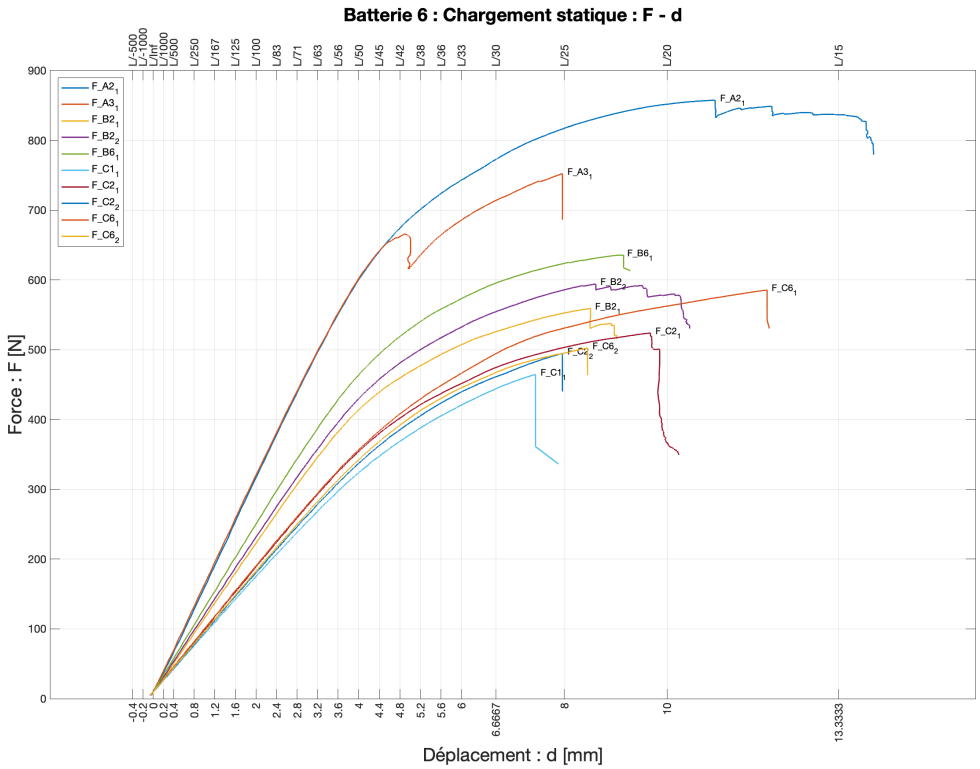


FIGURE F.28 – Comportement des 10 éprouvettes de la sixième batterie. Pour les comparer, le point à F = 10 N a été aligné pour chaque éprouvette.

- **Confirmation** : Les observations sont identiques à celles de la deuxième batterie (Point F.1, p. 133).

Éprouvette	Déplacement à la rupture [mm]	Flèche relative	Force maximale [N]	Contrainte [MPa]	Module de Young [GPa]
A4	10,98	$l/18,21$	857,58	128,86	12,18
A5	7,99	$l/25,02$	752,4	113,06	12,21
A6	8,55	$l/23,39$	559,11	84,01	8,32
B1	8,64	$l/23,14$	594,31	89,3	8,64
B3	9,16	$l/21,83$	635,65	95,51	9,32
B4	7,5	$l/26,68$	464,57	69,81	6,41
B5	9,73	$l/20,56$	524,06	78,75	6,94
C3	8,02	$l/24,95$	494,61	74,32	6,62
C4	11,99	$l/16,67$	585,64	88	6,98
C5	8,5	$l/23,53$	502,64	75,53	6,7
Moyenne	8,79	$l/21,7$	569,55	85,58	7,94
Percentile 5%		390,68	58,7		

Tableau F.7 – Valeurs à la rupture de la sixième batterie

- **Flèche** : Tout comme pour les essais cyclique de la cinquième batterie, les déplacements à la rupture sont importants et tournent autour de $l/20$;
- **Contrainte** : Les contraintes sont dans le même ordre de grandeur que pour le chargement cyclique (cinquième batterie) ;
- **Rigidité** : À nouveau, les résultats sont comparables à ceux de la cinquième batterie.

Conclusion

Voir Point 4.2.2, p. 54.

F.3 Phase d'élaboration

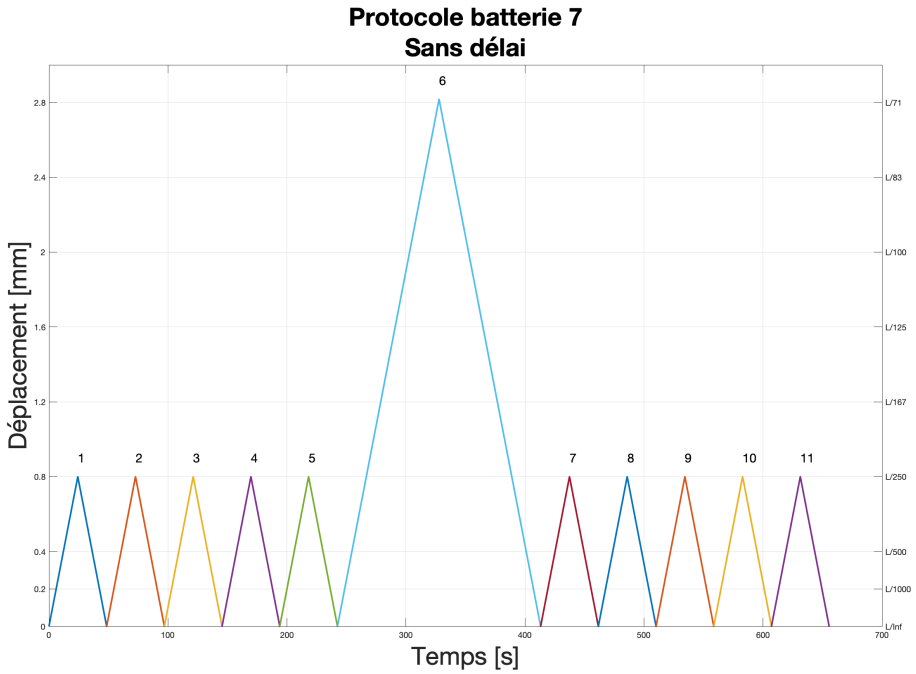
Septième batterie d'essais : Protocole potentiel et délai entre deux cycles

Cette troisième batterie étudie l'influence d'un temps d'attente entre deux cycles de chargement-déchargement. L'attente se passe naturellement après le déchargement. Durant ce temps, une force minimale $F_{\min}$ est maintenue pour assurer que l'éprouvette reste en place. Un essai de fluage a été réalisé pour déterminer l'influence de la force minimale sur la déformation du bois. Il consistait à simplement maintenir la charge $F_{\min}$ pendant une heure sur une éprouvette. Aucune augmentation de la déformation n'a été observée.

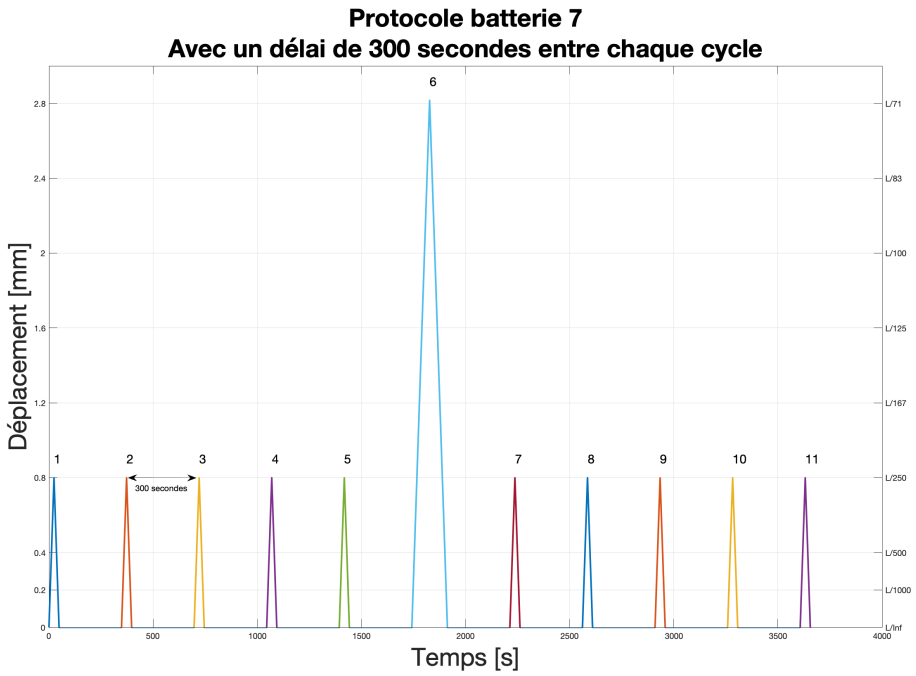
Pour rappel, cette batterie, étant donné qu'elle compare deux valeurs d'un même paramètre, suit une approche comparative. Dès lors, les échantillons ont été réalisés par duo comme expliqué au Point 4.1.2 et rappelé dans le Tableau 4.4. Comme ces duos sont dans la même pente de fil et a fortiori dans le même tronc, les différences de comportement observées résultent en principe des différentes valeurs du paramètre étudié. Cette réflexion se base sur l'hypothèse que les fibres gardent leurs propriétés mécaniques sur une longueur raisonnable (moins d'un mètre).

Protocole

Plus d'informations sur le protocole se trouve dans le corps du texte (Point 4.2.3, p. 56).



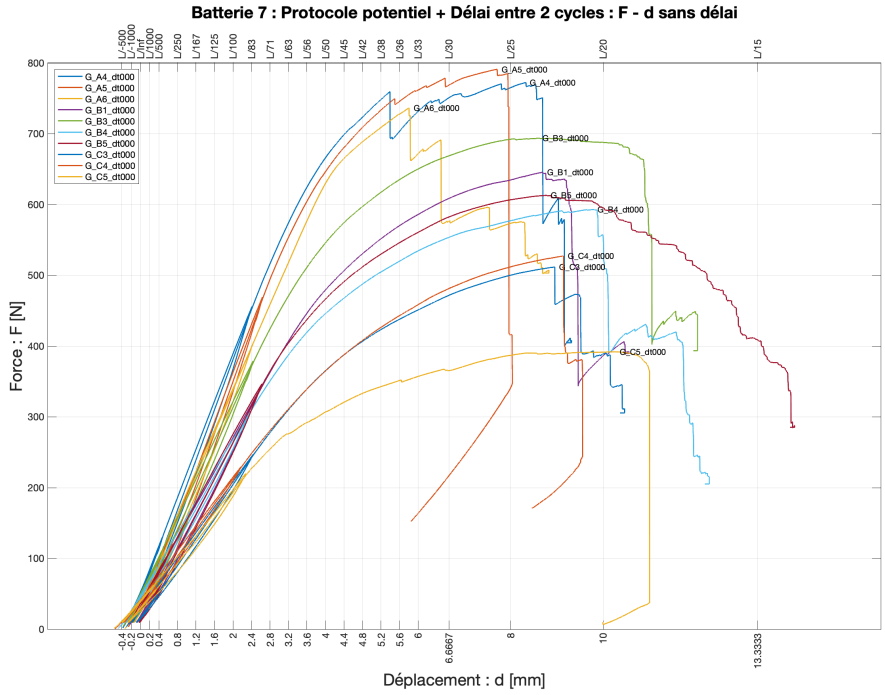
(a) Sans délai



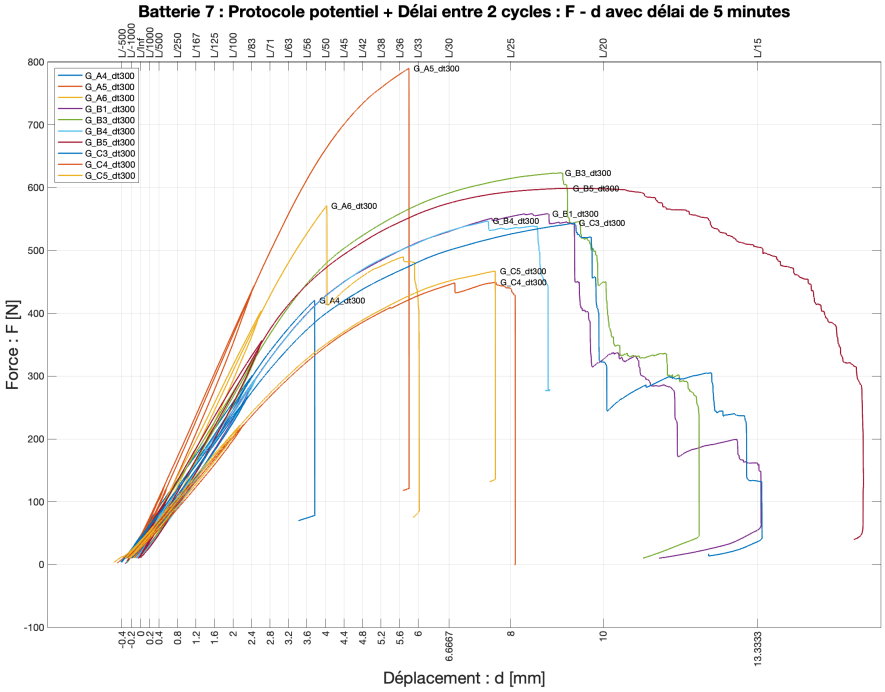
(b) Avec un délai de 5 minutes, soit 300 secondes

Figure F.29 – Représentation graphique des protocoles de la septième batterie

Global



(a) Sans délai



(b) Avec un délai de 5 minutes, soit 300 secondes

FIGURE F.30 – Comportement global des éprouvettes de la septième batterie

- **Semblable** : Les Figures F.30a et F.30b ne sont globalement pas différentes. Le comportement avec ou sans délai suit la même logique ;
- **Proximité des courbes** : Avec un temps d'attente, les courbes sont plus proches les unes des autres faisant penser que l'impact est réduit par rapport à celles sans délai ;
- **«Nervience»** : Néologisme formé par la combinaison de «nerf du bois» et de résilience. Il dénonce le comportement spécifique de bois que nous pouvons observer sur ces figures. Nous y voyons que le bois repasse par le même point F_{ELU} après un déchargement complet. Autrement dit, peu importe la plasticité ou l'endommagement, le bois repassera par son dernier extremum. Ce comportement est directement en lien avec le «nerf du bois»/rupture en cascade déjà discuté (Points F.1, p. 127 et F.1, p. 134). Les graphes du comportement global avec la mise en évidence de données importantes, pour chaque éprouvette, se trouvent à l'Annexe M.7 à partir de la page M.7.

Éprouvette	Déplacement à la rupture [mm]	Flèche relative	Force maximale [N]	Contrainte [MPa]	Module de Young [GPa]
	Sans délai				
A4	9,7	$l/20,63$	772,28	116,04	20,13
A5	8,3	$l/24,1$	791,11	118,87	19,87
A6	9,16	$l/21,83$	736,66	110,69	17,76
B1	10,78	$l/18,55$	645,67	97,02	13,77
B3	12,41	$l/16,11$	693,77	104,25	15,87
B4	12,77	$l/15,66$	593,06	89,11	13,6
B5	14,4	$l/13,89$	613,13	92,13	13,88
C3	10,77	$l/18,57$	511,78	76,9	10,21
C4	10,1	$l/19,79$	527,45	79,26	9,63
C5	11,56	$l/17,3$	392,14	58,92	9,08
Moyenne	10,59	$l/18,89$	599,49	90,08	13,48
Percentile 5%			399,54	60,04	
	Avec un délai de 5 minutes				
A4	4,18	$l/47,85$	420,44	63,18	12,93
A5	6,11	$l/32,73$	789,83	118,68	19,23
A6	6,16	$l/32,47$	571,06	85,81	17,35
B1	13,74	$l/14,55$	558,45	83,91	12,4
B3	12,37	$l/16,17$	623,64	93,71	13,99
B4	9,15	$l/21,86$	546,86	82,17	12,45
B5	15,91	$l/12,57$	598,94	90	14,41
C3	13,86	$l/14,43$	543,78	81,71	10,96
C4	8,61	$l/23,24$	449,22	67,5	9,55
C5	8,25	$l/24,24$	467,32	70,22	9,58
Moyenne	8,96	$l/22,32$	533,58	80,18	12,59
Percentile 5%			382,68	57,5	

Tableau F.8 – Valeurs à la rupture lors du dernier cycle, équivalent à un chargement statique, sur les éprouvettes de la septième batterie

- **Confirmation** : Les valeurs sont concordantes avec celles obtenues précédemment (Point F.2, p. 164).

Déplacement résiduel

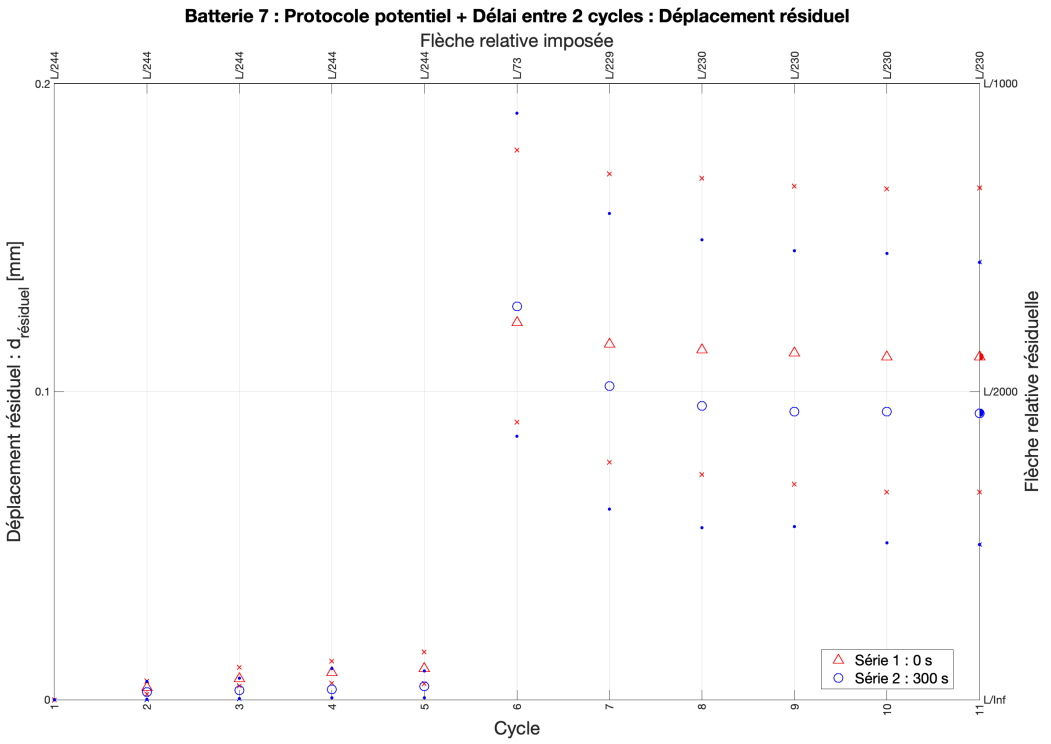


Figure F.31 – Déplacement résiduel par cycle de la septième batterie. Les triangles rougeâtres ont été obtenues lors du protocole sans délai. Les autres formes (bleuâtres) ont été prises durant celui avec un délai de 5 minutes.

- **Confirmation** : Les valeurs sont concordantes avec celles obtenues précédemment, notamment la troisième batterie (Point F.2, p. 140) ;
- **Convergence** : Elle est encore plus évidente dans ce cas.

Force maximale

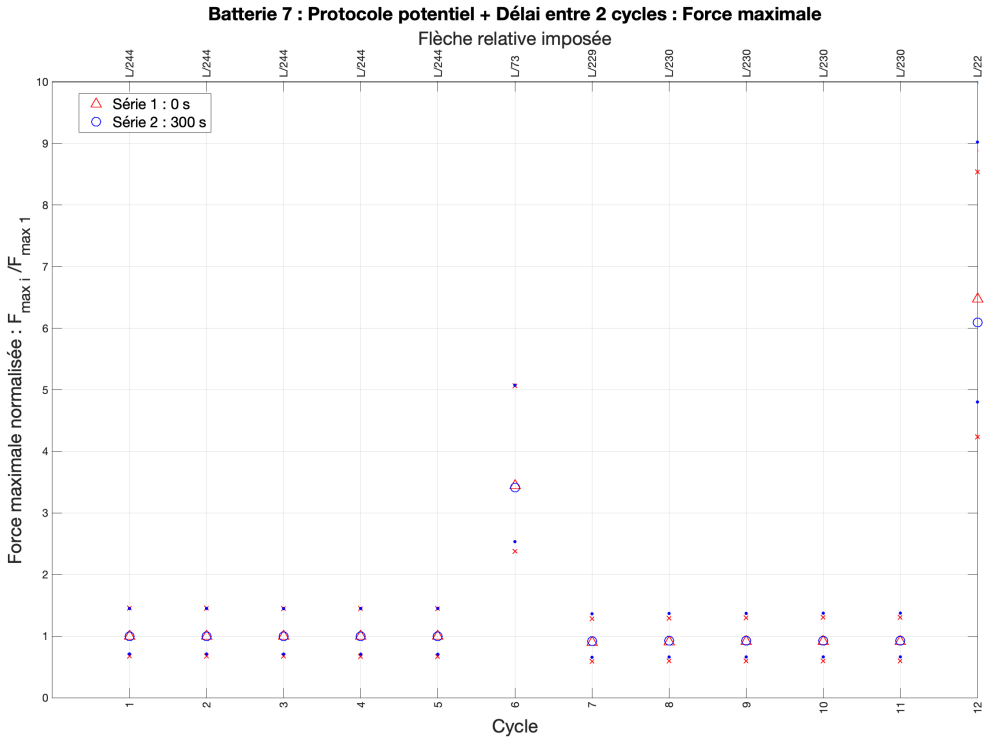


FIGURE F.32 – Force maximale par cycle de la septième batterie. Les triangles rougeâtres ont été obtenues lors du protocole sans délai. Les autres formes (bleuâtres) ont été prises durant celui avec un délai de 5 minutes.

- **Peu d'impact du délai** ;
- **Constance** : Malgré que l'élément est chargé jusque F_{ELU}, il revient à la même F_{ELS} par après ;
- **La moitié de** F_{rupt} : La F_{ELU} vaut environ de la moitié de la force de rupture.

Rigidité

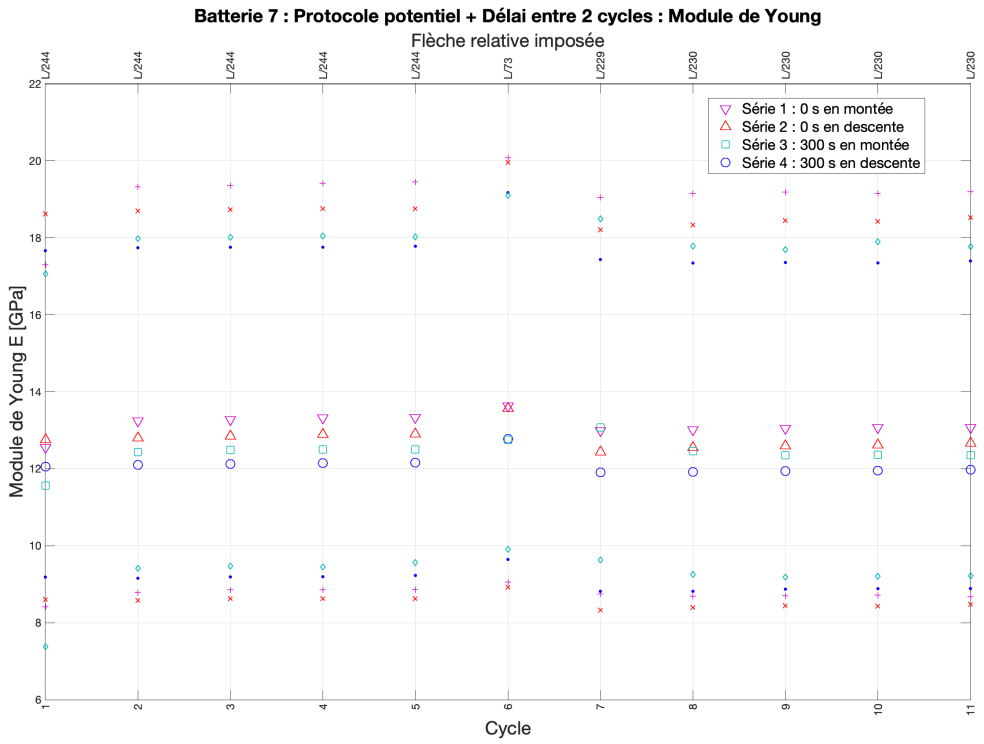


Figure F.33 – Module de Young par cycle de la septième batterie. Les triangles rougeâtres ont été obtenues lors du protocole sans délai. Les autres formes (bleuâtres) ont été prises durant celui avec un délai de 5 minutes. Les couleurs primaires (le triangle vers le haut et le rond) ont été prises en descente.

- **Peu/pas de différence** : Il est difficile de distinguer la moindre différence entre le modules pré- et post-chargement à F_{ELU}. La deuxième série à F_{ELS} est légèrement inférieure, de l'ordre du pourcent ;
- $E_{\text{ELS}} < E_{\text{ELU}}$: Le module de Young calculé sur les cycles en ELS sont inférieurs de quelques pourcent de celui mesuré sur le cycle ELU ;
- **Le délai impacte peu** : Bien que les modules sans délai soient meilleurs, la différence reste minime.

Fonction S

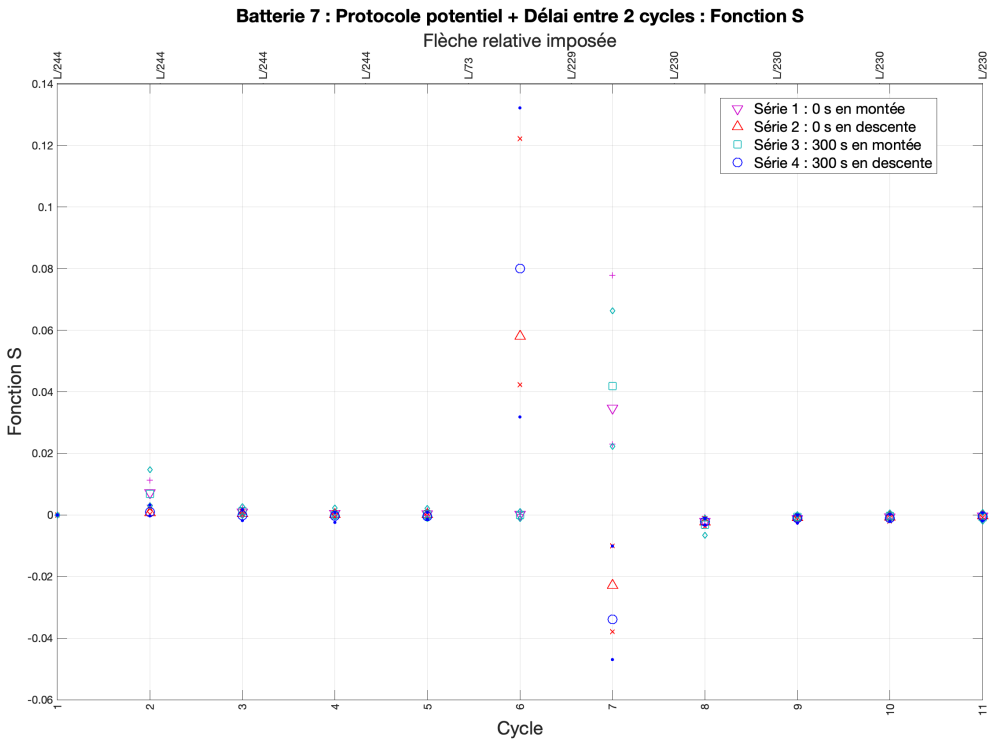


FIGURE F.34 – Fonction S par cycle de la septième batterie. Les triangles rougeâtres ont été obtenues lors du protocole sans délai. Les autres formes (bleuâtres) ont été prises durant celui avec un délai de 5 minutes. Les couleurs primaires (le triangle vers le haut et le rond) ont été prises en descente.

- **Nouveau chargement influe** Comme vu à chaque batterie ;
- **Convergence vers 0** : La convergence vers 0 est particulièrement perceptible dans cette batterie malgré un chargement important jusque F_{ELU} ;
- **Le délai impacte peu** : Aucune distinction forte n'est notée entre les deux protocoles.

ANNEXE G

ANALYSE DU PROTOCOLE SUR LES GRUMES

Cette annexe fait l'analyse du comportement des grumes lors de l'application du protocole. Elle compare les valeurs entre les grumes ayant réussi le protocole et les autres. Il faut garder à l'esprit que même les grumes « validées » étaient de mauvaise qualité. Les différentes valeurs mesurées ne sont pas pas pertinentes, seul le déroulement du protocole importe. Pour les mêmes raisons, aucune conclusion sur le comportement des grumes ne peut être tirée.

Protocole

Pour avoir des résultats comparables avec ceux obtenus sur les éprouvettes équarries, il a été décidé de provoquer le même taux de contrainte dans les fibres extérieures. Dès lors, la formule de vitesse de chargement suivant a été utilisée : $v = 0,88 \cdot 0,003 \cdot D$ Où D est le diamètre nominal de la grume. Nous voyons directement l'analogie avec la formule utilisée sur les grumes.

Cependant, il a été remarqué au cours des essais que la rupture arrivait trop rapidement. En effet, les normes recommandent qu'elles arrivent en cinq minutes avec une marge de deux minutes. Les grumes se cassaient bien trop rapidement, probablement à cause de leur qualité discutable. Quoi qu'il en soit, pour y pallier, la vitesse initialement prévue a été divisée par trois.

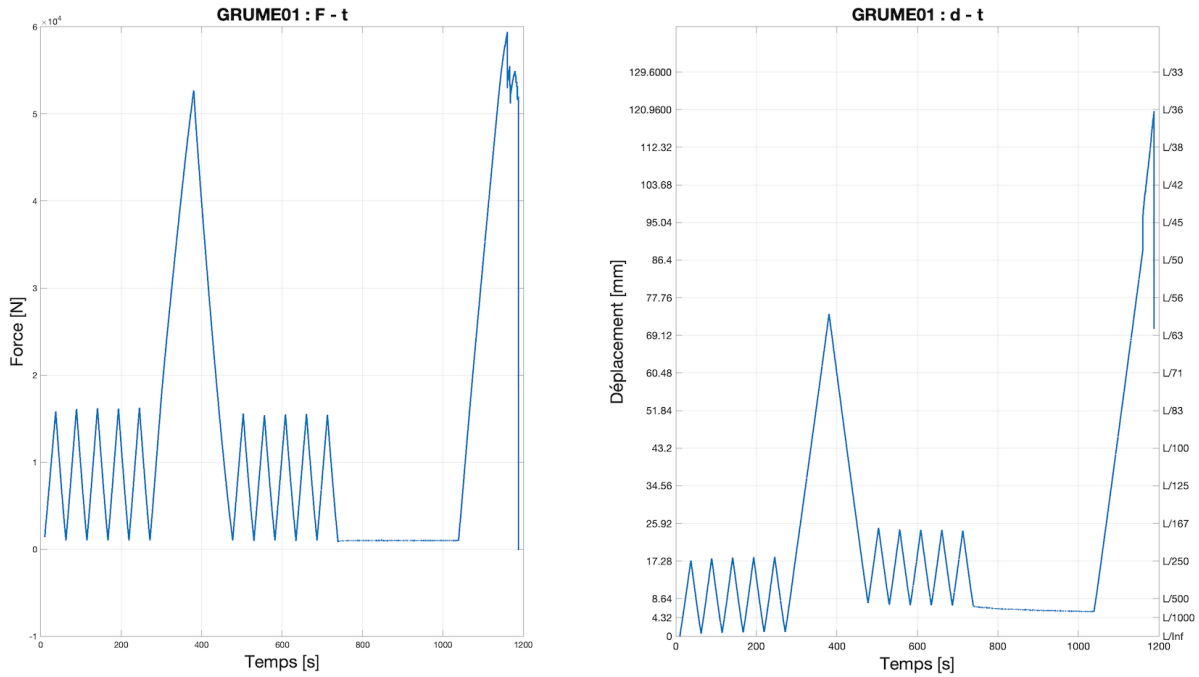


Figure G.1 – Protocole appliqué à la grume 1

Global

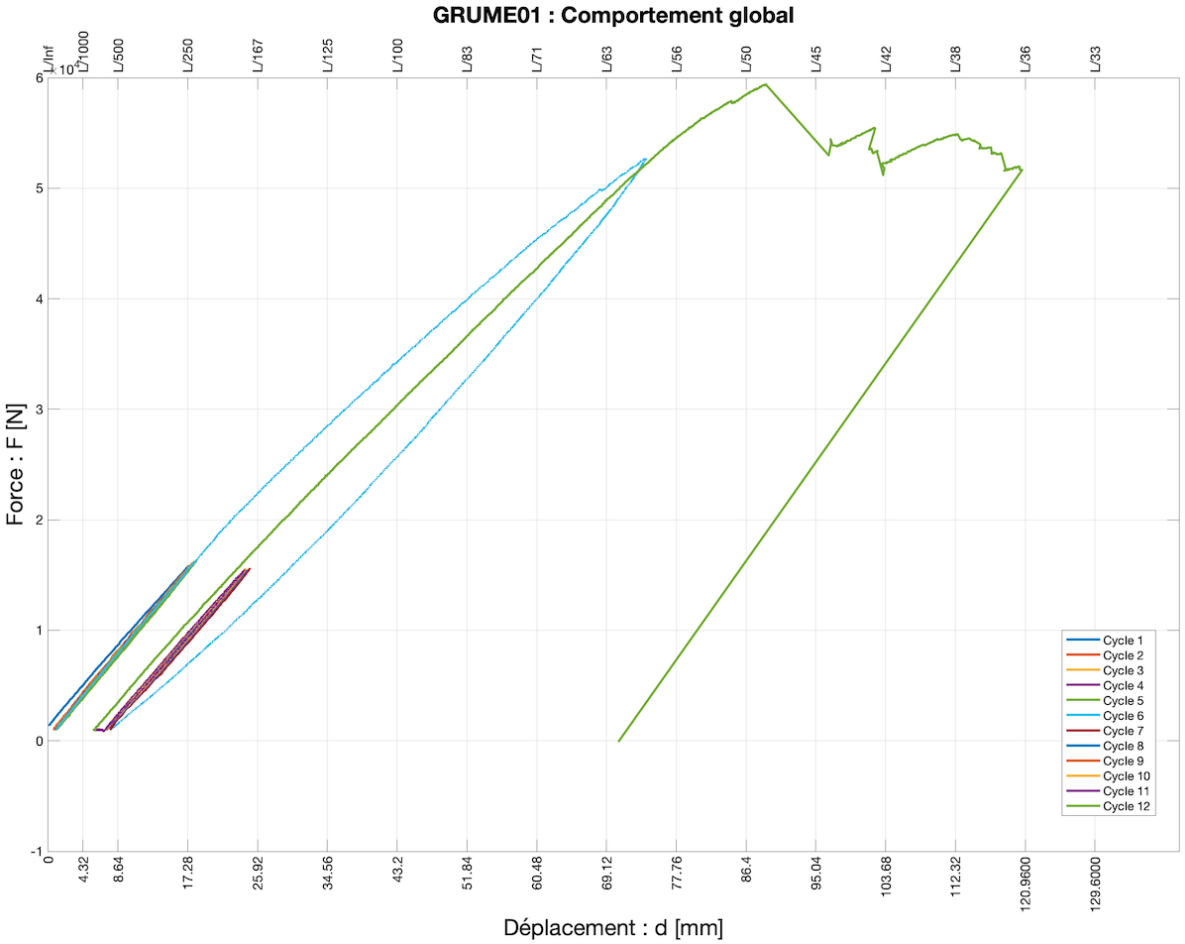


FIGURE G.2 – Comportement global de la grume 1 ayant passé le protocole

- **Moins linéaire** : Les courbes sont moins linéaires qu'avec les éprouvettes. À ce stade, avec la qualité des grumes, il est impossible d'en déterminer la raison avec certitude. Il se pourrait que ce soit à cause des pourritures, de l'humidité accrue des grumes (bien que la première était plus sèche que les autres), des verticilles, ... ou simplement parce que c'est une grume ;
- « **Nervience** » : Comme observé sur les éprouvettes, toutes les grumes ayant réussi le protocole repasse durant le chargement de vérification, à quelques pourcentages près, par l'extremum atteint lors du chargement ELU.

Grume	Déplacement à la rupture [mm]	Flèche relative	Force maximale [kN]	Rigidité Flexionnelle [$N \cdot m^2$]
01	88,79	$l/48,65$	59,410	1121385,82
09	101,5	$l/42,37$	36,782	656566
12	97,53	$l/45,73$	48,449	885783,08
19	96,95	$l/48,89$	96,183	2014213,19
20	90,26	$l/49,86$	55,942	1120299,83
Moyenne	93,24	$l/47,88$	51,940	988716,6
Percentile 5%			23,689	

Tableau G.1 – Valeurs à la rupture lors du chargement de vérification

- **Faible** : Toutes les valeurs du tableau sont bien moins importantes qu'attendues après lecture de la littérature [54]. Elles auraient dû être cinq fois plus grandes.

Déplacement résiduel

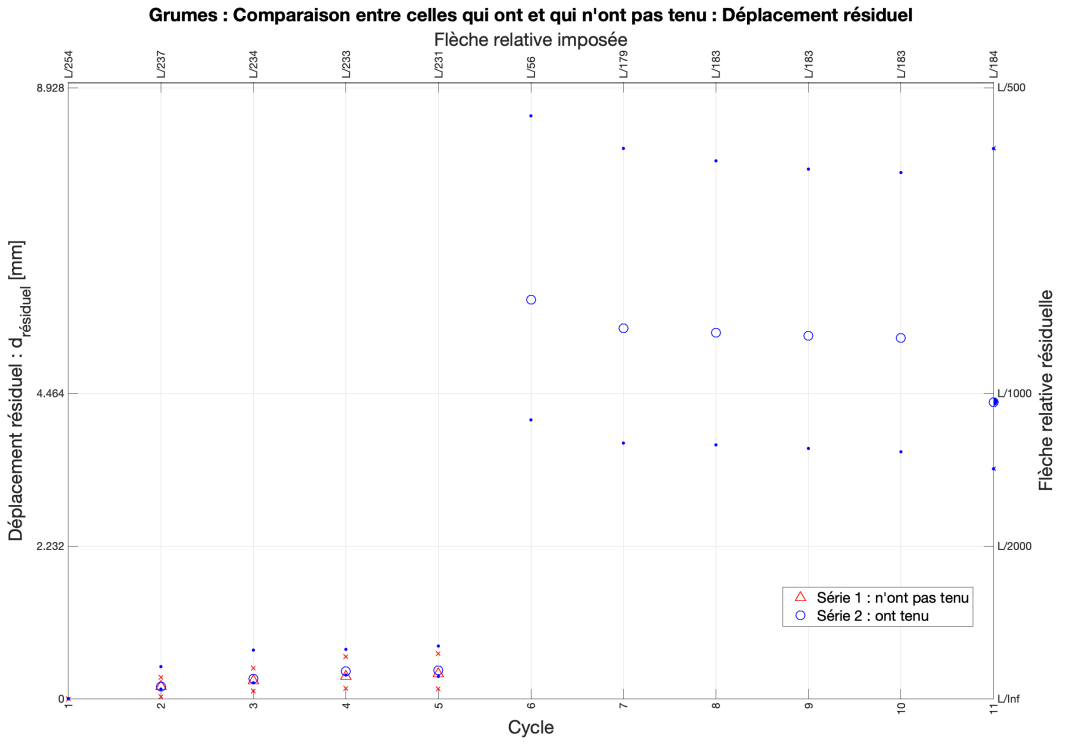


FIGURE G.3 – Déplacement résiduel par cycle. Les triangles rougeâtres ont été obtenues sur les grumes n'ayant pas survécu au protocole. Les autres formes (bleuâtres) ont été prises sur celles l'ayant passé.

- **Diminution** : Un chargement important jusque F_{ELU} crée de toute évidence un déplacement résiduel. Cependant, celui-ci diminue fortement après un temps de repos. Sur ce graphe, Entre le 6e et 11e cycle, il y a une différence d'environ 20%. Un temps d'attente plus grand pourrait être encore plus avantageux ;
- **Faible** : Bien que les valeurs ne soient pas à considérer étant donné la qualité des grumes, le déplacement résiduel reste relativement faible. En effet, $l/1000$ est certes plus important de ce qui a été obtenu sur les éprouvettes équarries mais c'est raisonnable. Éventuellement, avec des grumes de meilleure qualité, les résultats seront meilleurs.

Force maximale

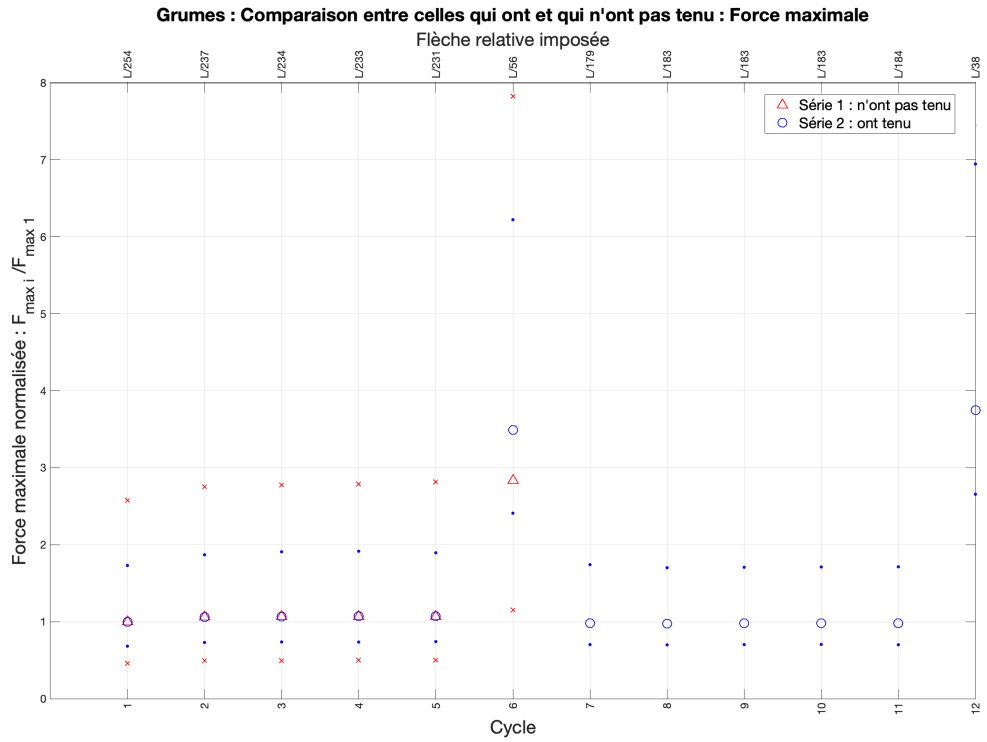


Figure G.4 – Force maximale par cycle. Les triangles rougeâtres ont été obtenues sur les grumes n'ayant pas survécu au protocole. Les autres formes (bleuâtres) ont été prises sur celles l'ayant passé.

- **Constance** : Malgré que l'élément est chargé jusque F_{ELU}, il revient à la même F_{ELS} par après ;
- **Faible** F_{rupt} : Dans le cas des grumes testées, la force de rupture est relativement faible. Sur éprouvettes équarries, elle valait environ 7 fois la force maximale du premier cycle.

Rigidité flexionnelle

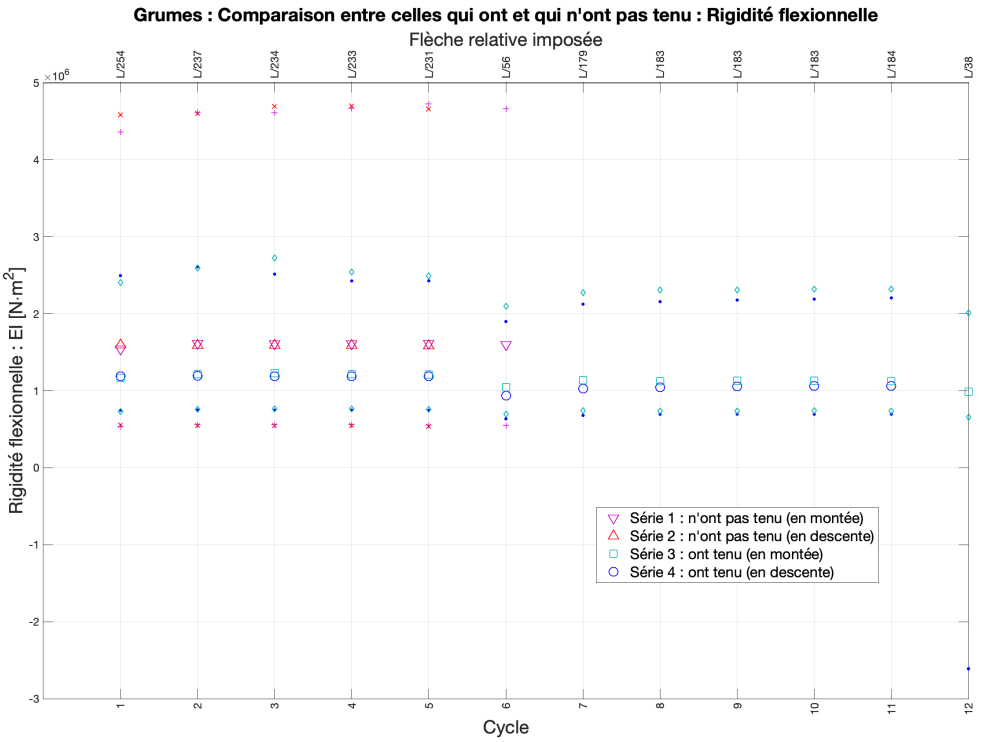


FIGURE G.5 – Rigidité flexionnelle par cycle. Les triangles rougeâtres ont été obtenues sur les grumes n'ayant pas survécu au protocole. Les autres formes (bleuâtres) ont été prises sur celles l'ayant passé. Les couleurs primaires (le triangle vers le haut et le rond) ont été prises en descente.

- **Peu/pas de différence** : Il est difficile de distinguer la moindre différence entre le modules pré- et post-chargement à F_{ELU} ;
- Les grumes n'ayant pas tenu sont plus rigides de quelques pourcentages.

ANNEXE H

CARACTÉRISTIQUES INFLUENÇANT LE CLASSEMENT VISUEL DES GRUMES

H.1 Les noeuds

Il existe 3 types de nœuds dont une représentation se trouve en Figure H.1 :

- **Nœud sain** : issu d'une branche encore vivante au moment de l'abattage. Le nœud est parfaitement englobé dans le reste de la surface auquel il a une bonne adhérence.
- **Nœud mort** : issu d'une branche morte. Il est en discontinuité avec les tissus du bois et risque de se détacher au cours du séchage ou usinage.
- **Nœud pourri** : lorsque ses tissus sont infectés par la pourriture. Cette dernière est souvent due à l'infiltration d'eau de pluie après le cassage accidentel d'une branche.



Figure H.1 – Représentation des 3 types de noeuds : Noeud sain à gauche - Noeud mort au milieu - Noeud pourri à droite

La mesure d'un nœud se réalise0 sur son plus petit diamètre, contre la surface du bois rond, en négligeant le cal [1] entourant le nœud. La mesure s'exprime en **centimètres** [2].

1. Le cal est simplement le bourrelet entourant le nœud, retiré au moment de l'écorçage.

H.2 Les poches de résine

Les poches de résine, voir Figure H.2, sont des défauts réputés plus esthétiques que mécaniques. Pour autant, il est indispensable de les prendre en compte lors du classement visuel.

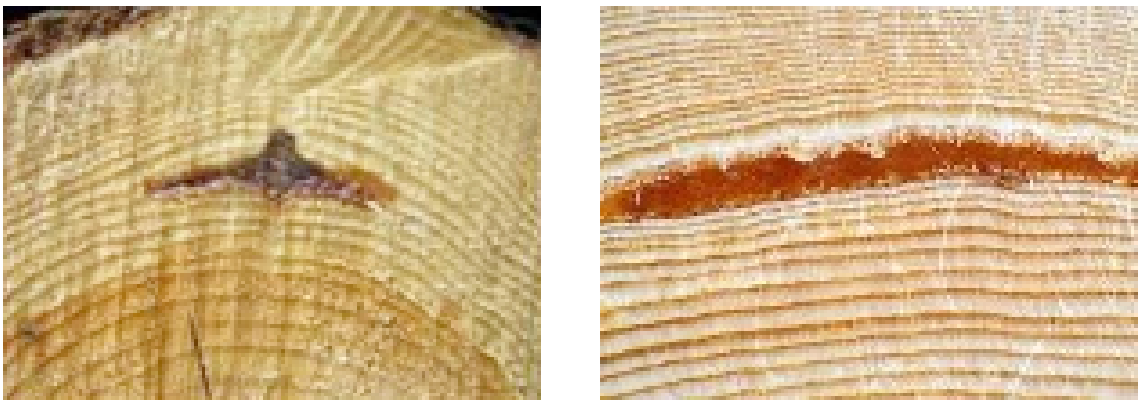


FIGURE H.2 – Représentation de poches de résine

La mesure d'une poche de résine se fait sur sa dimension maximale. S'il y a plus d'une poche de résine, il est nécessaire de noter leur nombre. La mesure s'exprime en **millimètres** [2].

H.3 Le taux de croissance

Le taux de croissance permet de mesurer la rapidité avec laquelle un arbre grandit.

La mesure du taux de croissance se réalise en trois étapes. D'abord, il faut mesurer, sur une extremité de la grume de notre choix, environ 75 % d'un rayon représentatif. Ensuite, il faut compter les cernes d'accroissement sur cette longueur. Finalement, on divise la longueur par le nombre de cernes d'accroissement. La mesure s'exprime en **millimètres** [2].

H.4 Les fils tors

Les fils tors représentent le gauchissement des fibres du bois comme l'illustre la Figure H.3.



Figure H.3 – Représentation de fils tors

La mesure des fils tors se fait en deux étapes. Il faut sélectionner sur la surface arrondie de la grume la longueur de un mètre qui présente la déviation de fil la plus importante. On mesure ensuite la déviation du fil par rapport à une ligne parallèle à l'axe de la pièce. La mesure s'exprime en **centimètres par mètre** [2].

H.5 Le coeur excentré

Le coeur excentré est le paramètre décrivant l'excentricité de la moelle par rapport au centre géométrique de la section. Une représentation claire est fournie en Figure H.4.



Figure H.4 – Représentation d'un coeur excentré

La mesure du coeur excentré se réalise en mesurant la distance entre la moelle et le centre géométrique, sur l'extrémité de la grume de notre choix. La mesure s'exprime en **pourcentage du diamètre de la section** [2].

H.6 Le bois de réaction

Le bois de réaction est produit en réponse à certaines sollicitations comme le vent ou le déséquilibre du houppier. En effet, lorsque le bois se courbe à causes de ces contraintes physiques, du bois de réaction se forme afin que l'arbre reprenne sa croissance initale. Le fait d'avoir un cœur excentré est souvent le signe qu'il y aura du bois de réaction. Cette zone de bois de réaction se manifeste par une partie brune plus foncée comme le montre la Figure H.5.



FIGURE H.5 – Représentation du bois de réaction

La mesure du bois de réaction se réalise en mesurant la surface d'un rectangle dans lequel le bois de réaction est inscrit. La mesure s'exprime en **pourcentage de la section du rectangle considéré** [2].

H.7 La courbure

La courbure permet de définir le caractère non rectiligne de l'élément.



FIGURE H.6 – Représentation de la courbure

La mesure de la courbure est faite en mesurant la distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités. La Figure H.6 présente cette mesure. La mesure s'exprime en **centimètres par mètre**.

H.8 La décroissance

La décroissance permet de quantifier la variation de section le long d'une grume.

La mesure de la décroissance se réalise en mesurant le diamètre à chaque extrémité, à 5 [cm] au moins des bords. La mesure est s'exprime comme la différence entre les deux diamètres en **centimètres par mètre** de distance entre les points de mesure [2].

H.9 Les fentes de coeur

Les fentes de coeur sont des fentes radiales provoquées par un changement de teneur en humidité de la grume, plus précisément par un séchage de la grume. Une représentation se trouve en Figure H.7.



Figure H.7 – Représentation de fentes de coeur [60]

La mesure d'une fente de coeur se fait simplement en mesurant la longueur de la fente visible à une extrémité du bois rond. La mesure s'exprime en **centimètres** [2].

H.10 Les roulures

Les roulures représentent la séparation de deux couches consécutives annuelles qui ne sont plus adhérentes comme le montre la Figure H.8. Elles peuvent être partielles ou totales c'est-à-dire sur une partie ou sur tout le périmètre de la séparation des deux couches.

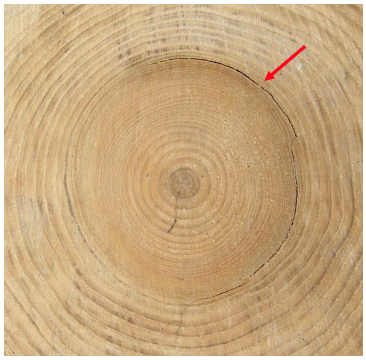


FIGURE H.8 – Représentation des roulures [15]

La mesure d'une roulure est réalisée en mesurant le périmètre dont la roulure représente un arc. La mesure est exprimé en **centimètres** [2].

H.11 Les attaques d'insectes

Les attaques d'insectes sont essentiellement visibles par les trous qu'elles laissent dans le bois ou par des marques en forme de sillon sur la surface de la grume. On voit ici des traces bien connues du scolyte, un insecte xylophage. Une représentation se trouve en Figure H.9.



FIGURE H.9 – Représentation d'attaques d'insectes

H.12 L'échauffure

L'échauffure est une attaque du bois provoquée par des champignons. L'échauffure est le résultat de l'échauffement du bois dû à la fermentation de la sève ou à une attaque par des champignons lignivores. Elle est facilement repérable grâce à une teinte brune assez foncée comme le présente la Figure H.10.



Figure H.10 – Représentation de l'échauffure

H.13 La pourriture

Deux types de pourriture sont fréquemment rencontrés dans le bois malade. D'une part la pourriture brune, que l'on nomme également pourriture cubique, est causée par des champignons attaquant la cellulose et l'hémicellulose. Cette pourriture laisse un résidu friable, de couleur brune. D'autre part la pourriture blanche, que l'on désigne aussi par pourriture fibreuse, est causée par des champignons qui attaquent la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Cette pourriture conduit à une dégradation totale du bois.



(a) Pourriture blanche [20]



(b) Pourriture brune [20]

Figure H.11 – Représentation de la pourriture dans le bois

H.14 La discoloration

La discoloration du bois est souvent associée à du bleuissement, un changement de couleur rendant une partie du bois bleue, voir Figure H.12.



FIGURE H.12 – Représentation du bleuissement

ANNEXE I

CLASSEMENT VISUEL DES GRUMES

Grume 1

Caractéristiques observées sur la grume n°1 - 5 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,35	S 2,5	0,35	M 2,7	1,4	P 3	**2,2**	**S 4**	**3**	**M 1,8**	3,7	S 2	4,05	M 3,2
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,35	S 2,5	1	S 0,7	1,4	P 2,5	**2,2**	**S 3,5**	**3,3**	**S 3,2**	3,7	P 1,7	4,5	M 1
x = Position en longueur	0,35	P 3,5	1,15	M 1,6	1,4	P 2,8	**2,2**	**S 3,5**	**3,3**	**S 3,5**	4,05	S 4	4,5	M 1,8
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,35	M 2,5	1,4	M 3,2	**2,2**	**S 2,8**	**3**	**S 4**	**3,3**	**S 4**	4,05	S 3,5	4,85	M 3
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,35	M 3	1,4	S 4	**2,2**	**M 0,5**	**3**	**M 3,5**	**3,3**	**P 0,8**	4,05	S 3,2	4,85	M 2,7
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	0,35	M 2,9	1,4	S 3,2	**2,2**	**S 3,5**	**3**	**M 4**	3,7	S 3,5	4,05	S 4	4,85	P 0,5
Poche de résine														
Dimension maximale :	25	[mm]												
Taux de croissance														
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	80	[mm]			Nombre de cerne d'acroissement :				33		Taux de croissance :		2,42	[mm]
Fils tors														
Position en longueur :	50	[cm]			Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :				3	[cm/m]				
Coeur excentré														
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	2	[cm]			Pourcentage du diamètre de la section :				8	%				
Bois de réaction														
Dimension maximale :	/	[cm]			Pourcentage de la dimension considérée :				/	%				
Courbure														
Position en longueur :	3,2	[m]			Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :				2,3	[cm]				
Décroissance														
Diamètres aux extrémités :	25	[cm]	19,9	[cm]	Distance entre mesures :				4,92	[m]	Décroissance :		1,04	[cm/m]
Fente de coeur														
Longueur de la plus grande fente visible :	9	[cm]												
Roulure														
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc :	/	[cm]												
Attaques d'insectes	Aucune													
Echauffure	Aucune													
Pourriture	Aucune													
Discoloration	Aucune													

Grume n° 1 - 5 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 22,8 [cm] Classe sous écorce : D 2a
Longueur : 5,02 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins					
Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	**D**

Grume n°1 - 5 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	2	3

Caractéristiques observées sur la grume n°2 - 12 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,23	S 4,5	0,5	S 2,3	**2**	**S 3**	**2,5**	**S 3**	**3,1**	**S 2,7**	4,36	S 3,3
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,23	M 2	0,6	S 3	**2**	**S 1**	**2,5**	**M 2**	3,43	S 3	4,36	S 2,6
x = Position en longueur	0,23	S 4	0,96	S 3,5	**2**	**S 3,2**	**2,5**	**M 3**	3,43	S 2,7	4,96	M 2,2
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,23	M 2,5	0,96	S 3	**2,4**	**S 3,5**	**3,1**	**S 3**	3,71	M 2,8	4,96	S 2,5
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,23	M 3,3	1,52	M 1,3	**2,5**	**S 3**	**3,1**	**M 2**	3,71	S 3	4,96	S 2,3
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	0,5	S 2,7	**1,75**	**S 3**	**2,5**	**S 3,2**	**3,1**	**S 3**	3,71	M 2		

Poche de résine						
Dimension maximale :	20	[mm]	40		30	
Taux de croissance						
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	70	[mm]	Nombre de cerne d'acroissement :	40	Taux de croissance	1,75 [mm]
Fils tors						
Position en longueur :	110	[cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :	1,2	[cm/m]	
Coeur excentré						
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	1,3	[cm]	Pourcentage du diamètre de la section :	5,7	%	
Bois de réaction						
Dimension maximale :	/	[cm]	Pourcentage de la dimension considérée :	/	%	
Courbure						
Position en longueur :	3,45	[m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :	7,8	[cm]	
Décroissance						
Diamètres aux extrémités :	22,8	[cm]	16,2 [cm]	Distance entre mesures :	5 [m]	Décroissance : 1,33 [cm/m]
Fente de coeur						
Longueur de la plus grande fente visible :	/	[cm]				
Roulure						
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc :	/	[cm]				
Attaques d'insectes	Aucune					
Echauffure	Aucune					
Pourriture	Aucune					
Discoloration	Aucune					

Grume n°2 - 12 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 21,5 [cm] Classe sous écorce : D 2a
Longueur : 5,06 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins

Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	**D**

Grume n°2 - 12 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	2	**3**

Grume 3

Caractéristiques observées sur la grume n°3 - 17 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,35 S 3	0,35 S 2	**2,25 S 2,5**	3,4 S 2,8	3,75 S 2	4,85 M 3		
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,35 S 3	1,35 S 2,5	**2,25 S 2**	3,4 S 2,4	3,75 M 2	4,85 S 2,5		
x = Position en longueur	0,35 S 3	1,35 S 2,5	**2,25 S 3**	3,4 S 2,5	4,4 S 2,5			
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,35 S 2,5	1,35 S 2	**2,25 M 3**	3,4 S 2,5	4,4 S 3			
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,35 S 2,5	1,35 M 2,5	**3,05 M 1**	3,75 S 2,4	4,4 S 3			
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	0,35 S 2,5	**2,25 S 2,8**	3,4 S 2	3,75 S 2	4,4 S 2,7			
Poche de résine								
Dimension maximale :	/ [mm]							
Taux de croissance								
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	70 [mm]	Nombre de cerne d'acroissement :	47	Taux de croissance	1,49 [mm]			
Fils tors								
Position en longueur :	1,45 [cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :	1 [cm/m]					
Coeur excentré								
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	1,5 [cm]	Pourcentage du diamètre de la section :	6,73 %					
Bois de réaction								
Dimension maximale :	/ [cm]	Pourcentage de la dimension considérée :	/ %					
Courbure								
Position en longueur :	2,75 [m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :	3,4 [cm]					
Décroissance								
Diamètres aux extrémités :	22,3 [cm]	18 [cm]	Distance entre mesures :	4,95 [m]	Décroissance :	0,87 [cm/m]		
Fente de coeur								
Longueur de la plus grande fente visible :	/ [cm]							
Roulure								
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/ [cm]							
Attaques d'insectes	Aucune							
Echauffure	Aucune							
Pourriture	Pourriture blanche							
Discoloration	Aucune							

Grume n°3 - 17 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 19,6 [cm] Classe sous écorce : D 1b
Longueur : 5,05 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins					
Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	**D**

Grume n°3 - 17 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	2	**3**

Grume 4

Caractéristiques observées sur la grume n°4 - 17 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,3 S 3	1,04 S 2,5	**1,65 S 3**	**2,4 S 3**	3,38 S 3	4,11 S 2,2	4,86 S 2,5
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,3 M 1	1,04 S 2,5	**1,65 S 3**	**2,4 S 3**	3,38 S 3	4,11 S 2,8	
x = Position en longueur	0,3 M 1	1,04 M 2	**1,65 M 2**	**2,4 S 2,5**	3,81 S 2,5	4,58 S 2,3	
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,3 S 3,5	1,04 S 2,5	**2,4 S 3**	**3,14 S 3,2**	3,81 S 2	4,58 S 2,4	
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	1,04 S 3,5	1,65 S 3	**2,4 S 3**	**3,14 S 3,5**	3,81 S 3	4,58 S 1	
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	1,04 S 3,5	**1,65 M 1**	**2,4 S 2**	**3,14 S 3**	4,11 S 3,5	4,58 S 1	

Poche de résine
Dimension maximale : / [mm]

Taux de croissance
Dimension de 75% d'un rayon représentatif : 70 [mm] Nombre de cerne d'acroissement : 35 Taux de croissance 2 [mm]

Fils tors
Position en longueur : 1,2 [cm] Déviation du fil sur une longueur d'un mètre : 0,5 [cm/m]

Coeur excentré
Distance entre la moelle et le centre géométrique : 1,7 [cm] Pourcentage du diamètre de la section : 7,36 %

Bois de réaction
Dimension maximale : / [cm] Pourcentage de la dimension considérée : / %

Courbure
Position en longueur : 3,01 [m] Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités : 3,3 [cm]

Décroissance
Diamètres aux extrémités : 23,1 [cm] 15,1 [cm] Distance entre mesures : 4,91 [m] Décroissance : 1,63 [cm/m]

Fente de coeur
Longueur de la plus grande fente visible : / [cm]

Roulure
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc / [cm]

Attaques d'insectes Aucune

Echauffure Aucune

Pourriture Pourriture blanche

Discoloration Aucune

Grume n°4 - 17 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 19,7 [cm] Classe sous écorce : D 2a
Longueur : 5,01 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins

Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	**D**

Grume n°4 - 17 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	2	**3**

Grume 5

Caractéristiques observées sur la grume n°5 - 17 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,55 S 4	1,4 M 2,5	**2,1 S 3,2**	**2,1 S 3**	**2,9 S 3**	4,05 S 2,5	4,8 M 3,5				
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,55 S 3	1,4 S 2	**2,1 S 3,7**	**2,9 S 1,5**	3,47 S 4	4,05 S 3	4,95 S 3,3				
x = Position en longueur	0,55 S 4	1,4 S 3	**2,1 S 3**	**2,9 S 2,6**	3,47 S 3,3	4,05 S 3	4,95 S 4				
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,55 S 3	1,4 S 3	**2,1 S 3**	**2,9 S 1**	3,47 S 3	4,05 S 4,5	4,95 M 1				
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,55 M 2,7	1,4 S 3	**2,1 M 3,2**	**2,9 P 3**	3,47 S 3	4,44 S 3,5					
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	0,55 S 2,7	1,4 S 3	**2,1 S 2,7**	**2,9 S 3**	3,47 S 3	4,8 S 3,2					
Poche de résine											
Dimension maximale :	35 [mm]		30		20		30		50		20
Taux de croissance											
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	70 [mm]		Nombre de cerne d'acroissement :		38		Taux de croissance		1,84 [mm]		
Fils tors											
Position en longueur :	210 [cm]		Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :		8 [cm/m]						
Coeur excentré											
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	3,5 [cm]		Pourcentage du diamètre de la section :		13,2 %						
Bois de réaction											
Dimension maximale :	/ [cm]		Pourcentage de la dimension considérée :		/ %						
Courbure											
Position en longueur :	1,7 [m]		Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :		2,7 [cm]						
Décroissance											
Diamètres aux extrémités :	26,5 [cm]	21 [cm]	Distance entre mesures :		4,87 [m]		Décroissance :		1,13 [cm/m]		
Fente de coeur											
Longueur de la plus grande fente visible :	/ [cm]										
Roulure											
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/ [cm]										
Attaques d'insectes	Aucune										
Echauffure	Aucune										
Pourriture	Aucune										
Discoloration	Aucune										

Grume n°5 - 17 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 23,9 [cm] Classe sous écorce : D 2a
Longueur : 4,97 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins					
Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	**C**	D

Grume n°5 - 17 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	**1**	2	3

Caractéristiques observées sur la grume n°6 - 17 mars 2021												
Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu												
Noeuds	0,65	S 3	1,1	S 3,5	**2,45**	**S 5**	**3,31**	**S 3**	4,51	M 4,5		
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,65	S 1	1,45	S 1,8	**2,86**	**S 4**	3,53	S 4	4,51	S 3		
x = Position en longueur	0,65	S 3,5	**1,7**	**S 3,5**	**2,86**	**S 1**	3,53	S 5	4,51	S 3,5		
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,65	M 4	**1,7**	**S 3,5**	**2,86**	**S 3,8**	3,96	M 4,5				
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	1,1	S 4	**1,7**	**S 3,5**	**2,86**	**S 2,7**	4,21	S 4,5				
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	1,1	S 2	**2,86**	**S 4**	**3,31**	**M 4**	4,21	S 4				
Poche de résine												
Dimension maximale :	30	[mm]	25	[mm]	30	[mm]	35	[mm]				
Taux de croissance												
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	80	[mm]	Nombre de cerne d'acroissement :		40		Taux de croissance		2	[mm]		
Fils tors												
Position en longueur :	175	[cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre				3	[cm/m]				
Coeur excentré												
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	2,5	[cm]	Pourcentage du diamètre de la section :				9,03	%				
Bois de réaction												
Dimension maximale :	/	[cm]	Pourcentage de la dimension considérée :				/	%				
Courbure												
Position en longueur :	3,11	[m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :				5	[cm]				
Décroissance												
Diamètres aux extrémités :	27,7	[cm]	20,2	[cm]	Distance entre mesures :		4,91	[m]	Décroissance :		1,53	[cm/m]
Fente de coeur												
Longueur de la plus grande fente visible :	/	[cm]										
Roulure												
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/	[cm]										
Attaques d'insectes	Aucune											
Echauffure	Aucune											
Pourriture	Pourriture blanche											
Discoloration	Aucune											

Grume n°6 - 17 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 24,2 [cm] Classe sous écorce : D 2a
Longueur : 5,01 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins

Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	**D**

Grume n°6 - 17 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	2	**3**

Grume 7

Caractéristiques observées sur la grume n°7 - 12 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,44	M 0,5	0,8	M 0,8	**2**	**M 1,6**	**2,8**	**M 2,5**	3,56	S 1,3	4,31	S 0,8
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,44	M 0,6	0,8	M 0,6	**2**	**S 1,1**	**2,8**	**S 1,8**	3,56	M 1,5	4,31	M 1,1
x = Position en longueur	0,44	P 0,5	1,3	M 1,7	**2**	**P 1**	**2,8**	**S 1,7**	3,56	M 2		
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,44	P 1	1,3	S 0,5	**2**	**M 1**	**2,8**	**S 1,6**	3,56	M 1,5		
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,8	M 1,5	1,3	M 1	**2**	**M 1,3**	**2,8**	**M 1**	4,11	M 1,5		
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	0,8	S 1,5	1,3	M 1,6	**2**	**M2**	3,56	S 1,7	4,31	M1,7		
Poche de résine												
Dimension maximale :	20	[mm]	20	[mm]								
Taux de croissance												
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	86	[mm]	Nombre de cerne d'acroissement :				52		Taux de croissance		1,65	[mm]
Fils tors												
Position en longueur :	240	[cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :				1	[cm/m]				
Coeur excentré												
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	4	[cm]	Pourcentage du diamètre de la section :				12,7	%				
Bois de réaction												
Dimension maximale :	/	[cm]	Pourcentage de la dimension considérée :				/	%				
Courbure												
Position en longueur :	3,76	[m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :				2	[cm]				
Décroissance												
Diamètres aux extrémités :	31,5	[cm]	27,5	[cm]	Distance entre mesures :		4,96	[m]	Décroissance :		0,81	[cm/m]
Fente de coeur												
Longueur de la plus grande fente visible :	/	[cm]										
Roulure												
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/	[cm]										
Attaques d'insectes	Aucune											
Echauffure	Aucune											
Pourriture	Aucune											
Discoloration	Aucune											

Grume n°7 - 12 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 29,9 [cm] Classe sous écorce : D 3a
Longueur : 5,06 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins					
Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	**C**	D

Grume n°7 - 12 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	**1**	2	3

Grume 8

Caractéristiques observées sur la grume n°8 - 15 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,22 S 4,5	1 M 2,5	1 S 2,8	**2,06 S 2**	**2,06 M 2,5**	**2,9 S 3**	3,89 M 3	4,52 M 3
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,22 M 3,5	1 S 2,5	1,6 S 2,7	**2,06 S 3,5**	**2,9 S 3**	3,34 S 2,6	3,89 S 2,5	4,52 M 3
x = Position en longueur	0,22 M 2,5	1 M 2,3	1,6 S 3	**2,06 S 3**	**2,9 M 3**	3,34 S 3,2	3,89 S 3	4,52 S 3,5
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,22 S 2	1 M 2,5	1,6 S 1	**2,06 M 2,5**	**2,9 M 3**	3,34 M 2	3,89 S 3	4,52 S 2,5
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	1 S 3,5	1 S 3	1,6 S 3	**2,06 S 2,5**	**2,9 S 2,5**	3,34 M 2	4,52 S 2,5	
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	1 S 4	1 S 2	1,6 S 2,3	**2,06 2,5**	**2,9 S 3,5**	3,89 S 2,5	4,52 S 3	

Poche de résine					
Dimension maximale :	30 [mm]	25	30		
Taux de croissance					
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	70 [mm]	Nombre de cerne d'acroissement :	29	Taux de croissance	2,41 [mm]
Fils tors					
Position en longueur :	210 [cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :	4 [cm/m]		
Coeur excentré					
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	4 [cm]	Pourcentage du diamètre de la section :	14,9 %		
Bois de réaction					
Dimension maximale :	/ [cm]	Pourcentage de la dimension considérée :	/ %		
Courbure					
Position en longueur :	2,45 [m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :	3,4 [cm]		
Décroissance					
Diamètres aux extrémités :	26,9 [cm] 18,9 [cm]	Distance entre mesures :	4,94 [m]	Décroissance :	1,62 [cm/m]
Fente de coeur					
Longueur de la plus grande fente visible :	/ [cm]				
Roulure					
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/ [cm]				
Attaques d'insectes	Aucune				
Echauffure	Aucune				
Pourriture	Dans les noeuds				
Discoloration	Aucune				

Grume n°8 - 15 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 23,3 [cm] Classe sous écorce : D 2a
Longueur : 5,04 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins

Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	**D**

Grume n°8 - 15 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	2	**3**

Grume 9

Caractéristiques observées sur la grume n°9 - 17 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,1 S 4	0,8 S 2,5	**1,95 M 2,5**	**2,75 S 3,5**	3,87 S 1,7	4,53 S 1,6	
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,1 S 2,5	1,25 S 2	**1,95 S 3,5**	3,43 S 4	3,87 S 3,5	4,53 M 1,8	
x = Position en longueur	0,1 S 3	1,25 S 4	**2,75 M 3**	3,43 S 4	4,23 S 4		
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,45 M 1,2	**1,95 S 4**	**2,75 S 2**	3,43 M 2	4,23 S 1,5		
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,8 S 5	**1,95 S 3**	**2,75 S 3**	3,87 S 3,5	4,23 M 2		
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	0,8 M 2,5	**1,95 S 2**	**2,75 S 3,5**	3,87 S 0,8	4,23 S 2,2		
Poche de résine							
Dimension maximale :	35 [mm]						
Taux de croissance							
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	70 [mm]	Nombre de cerne d'acroissement :	23	Taux de croissance	3,04 [mm]		
Fils tors							
Position en longueur :	150 [cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :	2 [cm/m]				
Coeur excentré							
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	2 [cm]	Pourcentage du diamètre de la section :	8,37 %				
Bois de réaction							
Dimension maximale :	/ [cm]	Pourcentage de la dimension considérée :	/ %				
Courbure							
Position en longueur :	3 [m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :	3,7 [cm]				
Décroissance							
Diamètres aux extrémités :	23,9 [cm]	19,1 [cm]	Distance entre mesures :	4,93 [m]	Décroissance :	0,97 [cm/m]	
Fente de coeur							
Longueur de la plus grande fente visible :	/ [cm]						
Roulure							
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/ [cm]						
Attaques d'insectes	Aucune						
Echauffure	Aucune						
Pourriture	Pourriture blanche						
Discoloration	Aucune						

Grume n°9 - 17 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : [cm] Classe sous écorce :
Longueur : 5,03 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins					
Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	**D**

Grume n°9 - 17 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	2	**3**

Grume 10

Caractéristiques observées sur la grume n°10 - 12 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,07 M 1,5	0,8 M 2	**1,9 M 1,2**	**2,7 S 1,5**	**3,1 S 1,2**	4,2 S 2,6	4,2 S 2,7
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,07 M 2	1,33 P 1,6	**1,9 P 3,2**	**2,7 S 0,7**	**3,1 S 3,2**	4,2 S 3,2	4,43 S 3
x = Position en longueur	0,07 S 1,5	1,33 S 0,5	**1,9 S 3**	**2,7 S 0,4**	3,65 M 3	4,2 M 2	4,43 S 4,5
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,07 M 1,2	1,33 S 0,8	**1,9 S 2,8**	**2,7 M 0,8**	3,65 S 3,5	4,2 M 1,5	4,43 S 5
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,8 M 1,7	1,33 S 4	**1,9 S 2,5**	**3,1 S 1,3**	3,65 S 2,3	4,2 M 2,3	4,8 S 2,5
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	0,8 M 1,7	**1,9 S 3,5**	**1,9 S 1,3**	**3,1 M 1,8**	3,65 M3,8	4,2 P 2	4,8 M2,5

Poche de résine					
Dimension maximale :	/ [mm]				
Taux de croissance					
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	95 [mm]	Nombre de cerne d'acroissement :	43	Taux de croissance	2,21 [mm]
Fils tors					
Position en longueur :	263 [cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :	2 [cm/m]		
Coeur excentré					
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	2,5 [cm]	Pourcentage du diamètre de la section :	9,03 %		
Bois de réaction					
Dimension maximale :	/ [cm]	Pourcentage de la dimension considérée :	/ %		
Courbure					
Position en longueur :	2,16 [m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :	3,6 [cm]		
Décroissance					
Diamètres aux extrémités :	27,7 [cm] 23,9 [cm]	Distance entre mesures :	4,93 [m]	Décroissance :	0,77 [cm/m]
Fente de coeur					
Longueur de la plus grande fente visible :	/ [cm]				
Roulure					
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/ [cm]				
Attaques d'insectes	Aucune				
Echauffure	Aucune				
Pourriture	Aucune				
Discoloration	Aucune				

Grume n°10 - 12 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 25,6 [cm] Classe sous écorce : D 2b
Longueur : 5,03[m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins					
Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	**D**

Grume n°10 - 12 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	2	**3**

Grume 11

Caractéristiques observées sur la grume n°11 - 17 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,25 M 2	1,45 S 2,3	**2,1 S 2,7**	**2,9 S 1,8**	3,85 S 2	4,93 S 2,2		
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,6 S 4	1,45 S 2	**2,1 S 3,5**	**2,9 M 2,5**	3,85 S 2,5	4,93 S 3		
x = Position en longueur	0,6 M 2,6	1,45 M 2,5	**2,1 S 3,2**	**2,9 S 2,5**	4,75 M 2,5	4,93 S 3		
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,7 M 2,3	**2,1 S 3**	**2,9 S 3,5**	3,85 S 2,5	4,83 S 1,7			
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,85 S 3,5	**2,1 M 1,5**	**2,9 S 3**	3,85 M 2	4,83 S 2			
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	1,45 S 3,5	**2,1 S 2,5**	**2,9 S 2**	3,85 S 2	4,83 S 1			
Poche de résine								
Dimension maximale :	30 [mm]	12 [mm]						
Taux de croissance								
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	120 [mm]	Nombre de cerne d'acroissement :		41	Taux de croissance	2,93 [mm]		
Fils tors								
Position en longueur :	1,75 [cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :		2,5 [cm/m]				
Coeur excentré								
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	4 [cm]	Pourcentage du diamètre de la section :		15,7 %				
Bois de réaction								
Dimension maximale :	/ [cm]	Pourcentage de la dimension considérée :		/ %				
Courbure								
Position en longueur :	3,17 [m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :		2 [cm]				
Décroissance								
Diamètres aux extrémités :	25,5 [cm]	20,5 [cm]	Distance entre mesures :	4,91 [m]	Décroissance :	1,02 [cm/m]		
Fente de coeur								
Longueur de la plus grande fente visible :	/ [cm]							
Roulure								
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/ [cm]							
Attaques d'insectes	Aucune							
Echauffure	Aucune							
Pourriture	Aucune							
Discoloration	Aucune							

Grume n°11 - 17 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 22,8 [cm] Classe sous écorce : D 2a
Longueur : 5,01[m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins

Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	**B**	C	D

Grume n°11 - 17 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	**1**	2	3

Caractéristiques observées sur la grume n°12 - 17 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,4	S 1,5	1,1	S 2,2	**1,9**	**S 2,4**	**2,67**	**S 1**	3,45	S 2	4,88	S 1,8
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,4	S 3	1,1	S 2,1	**1,9**	**S 2,2**	**2,67**	**S 3,5**	3,45	S 2,3	4,88	S 2,5
x = Position en longueur	0,4	S 2,5	1,1	S 2,4	**1,9**	**M3,6**	**2,67**	**S 1,8**	3,85	M 1,2	4,96	S 3
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,4	S 2	1,1	S 2	**1,9**	**S 2,7**	**2,67**	**S 3**	4,1	M 1,4		
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,4	S 2	1,1	S 2,5	**2,67**	**S 1**	3,45	S 3	4,4	M 1,5		
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	1,1	S 2,5	1,1	M 1	**2,67**	**S 2,6**	3,45	S 3	4,4	S 3,2		

Poche de résine						
Dimension maximale :	/	[mm]				
Taux de croissance						
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	80	[mm]	Nombre de cerne d'acroissement :	49	Taux de croissance	1,63 [mm]
Fils tors						
Position en longueur :	167	[cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :	1,5	[cm/m]	
Coeur excentré						
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	3	[cm]	Pourcentage du diamètre de la section :	12,1	%	
Bois de réaction						
Dimension maximale :	/	[cm]	Pourcentage de la dimension considérée :	/	%	
Courbure						
Position en longueur :	/	[m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :	0	[cm]	
Décroissance						
Diamètres aux extrémités :	24,8	[cm]	19,8 [cm]	Distance entre mesures :	4,95 [m]	Décroissance : 1,01 [cm/m]
Fente de coeur						
Longueur de la plus grande fente visible :	/	[cm]				
Roulure						
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/	[cm]				
Attaques d'insectes	Aucune					
Echauffure	Aucune					
Pourriture	Aucune					
Discoloration	Aucune					

Grume n°12 - 17 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 22,5 [cm] Classe sous écorce : D 2a
Longueur : 5,05 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins

Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	D

Grume n°12 - 17 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	**1**	2	3

Grume 13

Caractéristiques observées sur la grume n°13 - 15 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,04	M 1,8	0,4	S 1	1,63	S 2	**2,25**	**S 1,8**	3,39	S 2	4,04	M 1,6	4,99	S 4
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,04	S 1,8	0,9	S 3	1,63	S 1,5	**2,25**	**S 1,7**	3,39	M 2	4,04	S 3	4,99	M 2
x = Position en longueur	0,04	S 1	0,9	S 1	1,63	M1,5	**2,95**	**S 2**	3,39	M 2	4,34	M 2,7	4,99	M 1,8
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,04	S 1	0,9	S 3	1,63	S 1,7	**2,95**	**S 3,5**	3,39	S 2	4,34	S 3,6	4,99	S 1,8
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,4	M 1,8	0,9	S 2	**2,25**	**M 0,6**	**2,95**	**M 1,5**	4,04	S 2	4,34	S 3,5	4,99	S 2,6
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	0,4	M 1,1	1,63	M 2	**2,25**	**S 1**	**2,95**	**M 1,5**	4,04	S 3,5	4,34	M2,5		
Poche de résine														
Dimension maximale :	30	[mm]	35		40		40		15					
Taux de croissance														
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	90	[mm]	Nombre de cerne d'acroissement :				35		Taux de croissance				2,57	[mm]
Fils tors														
Position en longueur :	1,8	[cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :				2	[cm/m]						
Coeur excentré														
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	3,5	[cm]	Pourcentage du diamètre de la section :				12,6	%						
Bois de réaction														
Dimension maximale :	/	[cm]	Pourcentage de la dimension considérée :				/	%						
Courbure														
Position en longueur :	3,1	[m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :				3	[cm]						
Décroissance														
Diamètres aux extrémités :	27,8	[cm]	23,3	[cm]	Distance entre mesures :		4,94	[m]	Décroissance :		0,91	[cm/m]		
Fente de coeur														
Longueur de la plus grande fente visible :	/	[cm]												
Roulure														
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/	[cm]												
Attaques d'insectes	Aucune													
Echauffure	Aucune													
Pourriture	Aucune													
Discoloration	Aucune													

Grume n°13 - 15 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 24,8 [cm] Classe sous écorce : D 2b
Longueur : 5,04 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins					
Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	**C**	D

Grume n°13 - 15 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	**2**	3

Caractéristiques observées sur la grume n°14 - 15 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,1	S 5	1	S 3,5	1,35	M 4,5	**2,4**	**S 4,5**	**3**	**M 3,5**	3,4	S 3	3,9	M 1,6	4,75	S 3	5,03	S 4
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,1	M 1,8	1	S 3,5	1,35	S 4	**2,4**	**S 4**	**3**	**S 4**	3,65	S 4,5	3,9	M 4	4,75	S 4,5		
x = Position en longueur	0,1	S 4	1	S 4	1,35	S 3,5	**2,4**	**S 4**	**3**	**S 4**	3,65	S 4	4,25	M 4,5	4,75	S 5		
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,45	S4,5	1	S 4,5	**2,3**	**S 4**	**2,4**	**S 4**	3,4	S 6	3,65	S 4	4,25	S 4	4,75	S 4,5		
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,45	M 5	1	S 4	**2,3**	**S 3,5**	**2,4**	**S 4**	3,4	M 4	3,65	S 3,5	4,25	S 2,5	5,03	S 2		
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	0,45	S 3,5	1,35	S 4	**2,3**	**M 2**	**3**	**M 1**	3,4	S 3	3,9	S 4,5	4,25	S 3	5,03	S 3,5		

Poche de résine						
Dimension maximale :	45	[mm]				
Taux de croissance						
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	120	[mm]	Nombre de cerne d'acroissement :	32	Taux de croissance	3,75 [mm]
Fils tors						
Position en longueur :	2,5	[cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :	0,5	[cm/m]	
Coeur excentré						
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	2,8	[cm]	Pourcentage du diamètre de la section :	9,24	%	
Bois de réaction						
Dimension maximale :	/	[cm]	Pourcentage de la dimension considérée :	/	%	
Courbure						
Position en longueur :	1,85	[m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :	4,5	[cm]	
Décroissance						
Diamètres aux extrémités :	30,3	[cm]	25,3 [cm]	Distance entre mesures :	5 [m]	Décroissance : 1 [cm/m]
Fente de coeur						
Longueur de la plus grande fente visible :	/	[cm]				
Roulure						
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/	[cm]				
Attaques d'insectes	Aucune					
Echauffure	Aucune					
Pourriture	Pourriture blanche					
Discoloration	Aucune					

Grume n° 14 - 15 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 24,7 [cm] Classe sous écorce : D 2b
Longueur : 5,1 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins

Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	**D**

Grume n°14 - 15 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	**1**	2	3

Grume 15

Caractéristiques observées sur la grume n°15 - 12 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,05	M 2	0,47	S 3	**2,2**	**S 3**	**2,9**	**S 3**	3,49	M 3	5,05 S 3,5
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,05	S 0,4	0,9	M 1,4	**2,2**	**M 2,5**	**2,9**	**S 3**	3,49	M 2,6	5,05 S 3
x = Position en longueur	0,17	S 3	0,9	S 2,5	**2,2**	**M 3**	**2,9**	**S 2,5**	4,59	S 3	5,05 S 2,8
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,47	S 3	0,9	M 2,5	**2,2**	**M 2,5**	3,49	S 3,5	4,59	S 3,5	5,05 S 3
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,47	S 2	1,55	M 2,3	**2,9**	**S 1,8**	3,49	S 4	4,59	S 4	5,05 S 3
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	0,47	S 3	1,55	M 0,5	**2,9**	**S 2**	3,49	S 3,5	4,89	S 2,8	

Poche de résine				
Dimension maximale :	/	[mm]		
Taux de croissance				
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	138	[mm]	Nombre de cerne d'acroissement :	40
Fils tors				
Position en longueur :	230	[cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :	2,3 [cm/m]
Coeur excentré				
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	4	[cm]	Pourcentage du diamètre de la section :	13,2 %
Bois de réaction				
Dimension maximale :	/	[cm]	Pourcentage de la dimension considérée :	/ %
Courbure				
Position en longueur :	3,4	[m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :	5,6 [cm]

Décroissance								
Diamètres aux extrémités :	30,4	[cm]	25,5	[cm]	Distance entre mesures :	4,99	[m]	Décroissance : 0,98 [cm/m]
Fente de coeur								
Longueur de la plus grande fente visible :	12	[cm]						
Roulure								
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/	[cm]						
Attaques d'insectes	Aucune							
Echauffure	Aucune							
Pourriture	Aucune							
Discoloration	Aucune							

Grume n°15 - 12 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 26,7 [cm] Classe sous écorce : D 2b
Longueur : 5,09 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins					
Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	**C**	D

Grume n°15 - 12 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	**1**	2	3

Caractéristiques observées sur la grume n°16 - 15 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,01	M 4	0,85	S 3,5	1,3	S 4	**1,7**	**M 3,5**	**2,3**	**S 4**	**2,55**	**M 2,5**	**3,05**	**M 3**	3,47	M 5,5	4,16	S 5		
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,01	S 6	0,85	M 3	1,3	M 2,5	**1,7**	**M 2**	**2,3**	**S 5**	**2,55**	**M 2,5**	**3,05**	**M 3,5**	3,87	M 3	4,16	S 5		
x = Position en longueur	0,36	S 5	0,85	M 2,5	1,3	S 2,5	**1,7**	**S 3**	**2,3**	**S 4**	**2,55**	**S 5,5**	3,47	S 4	3,87	M4,5	4,16	S 4,5		
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,36	S 5	0,85	S 5,5	1,3	S 2,5	**1,7**	**S 3,5**	**2,3**	**S 3**	**3,05**	**S 5**	3,47	S 2,5	3,87	M 2,5	4,37	S 3		
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,36	M 3	1,3	S 5	1,3	M 4	**1,7**	**S 5,5**	**2,55**	**S 4**	**3,05**	**M 3**	3,47	M 2,5	3,87	M 2,5	4,37	S4		
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	0,36	M 3,5	1,3	S 5	1,3	M3,5	**1,7**	**S 3,5**	**2,55**	**M2,5**	**3,05**	**M2,3**	3,47	S 4,5	4,16	M 3,5	4,37	S 2,5		
Poche de résine											4,37	S4	4,78	S3	4,9	S 3,5	4,9	M2,7		
Dimension maximale :	35	[mm]									4,78	S 2	4,78	S2	4,9	S3,5	4,9	S 4		

Taux de croissance
Dimension de 75% d'un rayon représentatif : 85 [mm] — Nombre de cerne d'acroissement : 31 — Taux de croissance 2,74 [mm]

Fils tors
Position en longueur : 235 [cm] — Déviation du fil sur une longueur d'un mètre : 3 [cm/m]

Coeur excentré
Distance entre la moelle et le centre géométrique : 4 [cm] — Pourcentage du diamètre de la section : 13,3 %

Bois de réaction
Dimension maximale : / [cm] — Pourcentage de la dimension considérée : / %

Courbure
Position en longueur : 2,5 [m] — Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités : 4,5 [cm]

Décroissance
Diamètres aux extrémités : 30 [cm] 22 [cm] — Distance entre mesures : 4,92 [m] — Décroissance : 1,71 [cm/m]

Fente de coeur
Longueur de la plus grande fente visible : / [cm]

Roulure
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc / [cm]

Attaques d'insectes Aucune

Echauffure Aucune

Pourriture Aucune

Discoloration Aucune

Grume n°16 - 15 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 26,3 [cm] Classe sous écorce : D 2b
Longueur : 5,02 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins					
Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	**D**

Grume n°16 - 15 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	2	**3**

Grume 17

Caractéristiques observées sur la grume n°17 - 12 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,54	S 0,5	0,78	M 0,4	**2,1**	**S 0,7**	**3,2**	**S 1,1**	4	S 1,9	
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,54	S 0,5	0,78	M 0,3	**2,1**	**M 0,4**	**3,2**	**S 1,1**	4	S 1,5	
x = Position en longueur	0,54	S 0,5	1,5	S 1	**2,1**	**S 1**	**3,2**	**M 1,5**	4	M 1,2	
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,78	S 0,6	1,5	S 1	**2,5**	**S 2**	**3,2**	**S 1**	4,64	M 2	
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	0,78	S 0,7	1,5	S 0,8	**2,5**	**M 1,8**	4	S 1,3	4,64	S 1,8	
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	0,78	M 0,7	1,5	S 1	**2,5**	**S 0,5**	4	S 1,8			
Poche de résine											
Dimension maximale :	/	[mm]									
Taux de croissance											
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	100	[mm]	Nombre de cerne d'acroissement :			60	Taux de croissance			1,67	[mm]
Fils tors											
Position en longueur :	87	[cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :			2,5	[cm/m]				
Coeur excentré											
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	3	[cm]	Pourcentage du diamètre de la section :			9,46	%				
Bois de réaction											
Dimension maximale :	/	[cm]	Pourcentage de la dimension considérée :			/	%				
Courbure											
Position en longueur :	2,5	[m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :			1,7	[cm]				
Décroissance											
Diamètres aux extrémités :	31,7	[cm]	27,8	[cm]	Distance entre mesures :		5	[m]	Décroissance :		0,78 [cm/m]
Fente de coeur											
Longueur de la plus grande fente visible :	4	[cm]									
Roulure											
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/	[cm]									
Attaques d'insectes	Aucune										
Echauffure	Aucune										
Pourriture	Aucune										
Discoloration	Aucune										

Grume n°17 - 12 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 30,2 [cm] Classe sous écorce : D 3a
Longueur : 5,1 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins

Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	**C**	D

Grume n°17 - 12 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	**1**	2	3

Caractéristiques observées sur la grume n°18 - 17 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,7	S 2,2	1,25	S 2,5	**2,7**	**S 1,6**	3,93	S 1,5	4,53	S 2		
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,7	S 3	1,25	S 2,8	**2,7**	**S 3,6**	3,93	S 3,5	4,88	S 3,5		
x = Position en longueur	0,7	S 2,7	**2,2**	**S 3**	3,5	M1,8	3,93	M 1,5	4,88	M 1,5		
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,7	M 2,3	**2,2**	**S 3**	3,5	S 3,5	4,23	S 2,6				
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	1,25	S 2	**2,7**	**S 2,2**	3,5	S 2,8	4,53	S 2				
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	1,25	S 3,5	**2,7**	**S 3**	3,5	S 1	4,53	S 2				
Poche de résine												
Dimension maximale :	20	[mm]	30	[mm]								
Taux de croissance												
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	80	[mm]	Nombre de cerne d'acroissement :		45		Taux de croissance		1,78	[mm]		
Fils tors												
Position en longueur :	273	[cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :		1	[cm/m]						
Coeur excentré												
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	2,2	[cm]	Pourcentage du diamètre de la section :		9,4	%						
Bois de réaction												
Dimension maximale :	/	[cm]	Pourcentage de la dimension considérée :		/	%						
Courbure												
Position en longueur :	2,35	[m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :		2	[cm]						
Décroissance												
Diamètres aux extrémités :	23,4	[cm]	18,1	[cm]	Distance entre mesures :		4,93	[m]	Décroissance :		1,08	[cm/m]
Fente de coeur												
Longueur de la plus grande fente visible :	/	[cm]										
Roulure												
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/	[cm]										
Attaques d'insectes	Aucune											
Echauffure	Aucune											
Pourriture	Pourriture blanche											
Discoloration	Aucune											

Grume n°18 - 17 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 20,9 [cm] Classe sous écorce : D 2a
Longueur : 5,03 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins

Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	**D**

Grume n°18 - 17 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	2	**3**

Grume 19

Caractéristiques observées sur la grume n°19 - 12 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,02 P 2	1,1 S 1,2	**1,8 S 2,5**	**2,7 M 2,5**	3,69 S 2,5	4,47 S 3,5		
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,04 S 2,5	1,1 M 2	**1,8 S 2**	**2,7 P 2**	3,69 M 2,5	4,47 S 2,5		
x = Position en longueur	0,04 M 1,8	1,1 M 2	**1,8 M 3**	**2,7 M 2,6**	3,69 M 0,7			
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,04 M 2,4	1,1 M 2	**1,8 S 3**	**2,7 S 2,3**	3,69 S 2,6			
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	1,1 S 3	**1,8 S 2**	**1,8 P 1,7**	**2,7 M 1,6**	4,47 S 3			
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	1,1 S 2	**1,8 S 2,5**	**2,7 S 3**	**2,7 S 2,7**	4,47 M 2			
Poche de résine								
Dimension maximale :	/ [mm]							
Taux de croissance								
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	100 [mm]	Nombre de cerne d'acroissement :	46	Taux de croissance	2,17 [mm]			
Fils tors								
Position en longueur :	125 [cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :	1,5 [cm/m]					
Coeur excentré								
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	3 [cm]	Pourcentage du diamètre de la section :	9,71 %					
Bois de réaction								
Dimension maximale :	/ [cm]	Pourcentage de la dimension considérée :	/ %					
Courbure								
Position en longueur :	2,65 [m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :	0,8 [cm]					
Décroissance								
Diamètres aux extrémités :	30,9 [cm]	25,1 [cm]	Distance entre mesures :	4,93 [m]	Décroissance :	1,18 [cm/m]		
Fente de coeur								
Longueur de la plus grande fente visible :	/ [cm]							
Roulure								
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/ [cm]							
Attaques d'insectes	Aucune							
Echauffure	Aucune							
Pourriture	Aucune							
Discoloration	Aucune							

Grume n° 19 - 12 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 27,4 [cm] Classe sous écorce : D 2b
Longueur : 5,03 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins					
Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	**C**	D

Grume n°19 - 12 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	**1**	2	3

Caractéristiques observées sur la grume n°20 - 12 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,4	S 2,8	1,1	M 2,5	**2**	**M 2,5**	**2,86**	**M2,7**	3,96	M 1,8	4,66	M 3,5		
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,4	S 2,3	1,1	S 2,4	**2**	**M 1,2**	3,46	S 3,5	3,96	M 1,7				
x = Position en longueur	0,4	2,5	1,1	M 3	**2**	**M2,5**	3,46	M 2,5	4,56	S 3,4				
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	0,4	M 1,7	1,4	M 1	**2**	**S 2,5**	3,96	M 2,5	4,56	M 2,5				
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	1,1	S 3,5	1,4	M 1	**2**	**M 2,1**	3,96	M 3,5	4,66	S 3,5				
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	1,1	S 2,1	1,4	S 3	**2,86**	**M1,5**	3,96	M 2	4,66	S 3,5				
Poche de résine														
Dimension maximale :	10	[mm]												
Taux de croissance														
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	70	[mm]			Nombre de cerne d'acroissement :		34		Taux de croissanc		2,06	[mm]		
Fils tors														
Position en longueur :	155	[cm]			Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :		5	[cm/m]						
Coeur excentré														
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	1,5	[cm]			Pourcentage du diamètre de la section :		5,53	%						
Bois de réaction														
Dimension maximale :	/	[cm]			Pourcentage de la dimension considérée :		/	%						
Courbure														
Position en longueur :	3,76	[m]			Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :		2,9	[cm]						
Décroissance														
Diamètres aux extrémités :	27,1	[cm]	24,4	[cm]	Distance entre mesures :		4,96	[m]	Décroissance :		0,55	[cm/m]		
Fente de coeur														
Longueur de la plus grande fente visible :	/	[cm]												
Roulure														
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/	[cm]												
Attaques d'insectes	Aucune													
Echauffure	Aucune													
Pourriture	Pourriture blanche													
Discoloration	Aucune													

Grume n°20 - 12 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 24,3 [cm] Classe sous écorce : D 2a
Longueur : 5,06[m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins

Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	C	**D**

Grume n°20 - 12 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	**2**	3

Grume 21

Caractéristiques observées sur la grume n°21 - 12 mars 2021

Notes : (1) Les positions en longueur sont mesurées à partir de l'extrémité de la grume dont le diamètre est le plus grand (2) Le taux de croissance et le coeur excentré sont mesurés sur le diamètre le plus grand (3) Les noeuds les plus grands de chaque type sont surlignés en bleu

Noeuds	0,24 P 3	1,24 M 1,8	**2,1 M 2**	**3 S 2**	3,77 S 2,2	4,57 S 3,5		
Nomenclature : **x** [m] **Types de noeud y** [cm]	0,24 S 1,6	1,24 M 2	**2,1 M 2,3**	**3 S 1,8**	3,77 S 2	4,57 S 2,5		
x = Position en longueur	0,24 M 2	1,24 S 2,3	**2,6 S 2**	**3 S 1**	3,77 S 2,1	4,57 S 3,5		
Type de noeud : S = Sain, M = Mort, P = Pourri	1 S 1,2	1,24 S 2,5	**2,6 P 0,5**	**3 S 1,7**	3,77 M 2	4,57 S 3,5		
y : Dimension du plus petit diamètre du noeud	1,24 M 2,2	**2,1 S 2,3**	**2,6 M 0,5**	**3 M 2**	4,57 S 4			
(les noeuds dans le tiers central sont en gras)	1,24 S 2,2	**2,1 M 2**	**3 S 1,8**	3,77 S 2	4,57 S 3			
Poche de résine								
Dimension maximale :	/ [mm]							
Taux de croissance								
Dimension de 75% d'un rayon représentatif :	70 [mm]	Nombre de cerne d'acroissement :	40	Taux de croissance	1,75 [mm]			
Fils tors								
Position en longueur :	230 [cm]	Déviation du fil sur une longueur d'un mètre :	1,8 [cm/m]					
Coeur excentré								
Distance entre la moelle et le centre géométrique :	2,1 [cm]	Pourcentage du diamètre de la section :	7,5 %					
Bois de réaction								
Dimension maximale :	/ [cm]	Pourcentage de la dimension considérée :	/ %					
Courbure								
Position en longueur :	2 [m]	Distance maximale entre la surface périphérique concave du bois et une ligne droite joignant les points correspondants sur les extrémités :	3,2 [cm]					
Décroissance								
Diamètres aux extrémités :	28 [cm]	23,1 [cm]	Distance entre mesures :	4,97 [m]	Décroissance :	0,99 [cm/m]		
Fente de coeur								
Longueur de la plus grande fente visible :	/ [cm]							
Roulure								
Diamètre du cercle dont la roulure fait un arc	/ [cm]							
Attaques d'insectes	Aucune							
Echauffure	Aucune							
Pourriture	Aucune							
Discoloration	Aucune							

Grume n°21 - 12 mars 2021

Classement dimensionnel selon la norme NBN EN 1315 (2010) : Classement dimensionnel des bois ronds

Diamètre médian sous écorce : 25,8 [cm] Classe sous écorce : D 2b
Longueur : 5,07 [m]

Classement visuel selon la norme NBN EN 1927-1 (2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins

Caractéristiques		Classes			
		A	B	C	D
Noeuds					
adhérents, sains		exclus	≤4 [cm]	≤8 [cm]	permis
morts		exclus	≤3 [cm]	≤6 [cm]	permis
pourris		exclus	exclus	≤3 [cm]	permis
Poche de résine		exclue	1 par section	permise	permise
Taux de croissance		≤4 [mm]	≤7 [mm]	sans limite	sans limite
Croissance					
Fils tors		≤3 [cm/m]	≤7 [cm/m]	≤10 [cm/m]	sans limite
Coeur excentré		≤10 %	≤15 %	sans limite	sans limite
Bois de réaction		exclu	≤10 %	≤33 %	sans limite
Courbure	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3 [cm/m]
	≥20 jusque 35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤3,5 [cm/m]
	≥35 [cm]	≤1 [cm/m]	≤1,5 [cm/m]	≤2 [cm/m]	≤4,5 [cm/m]
Décroissance	<20 [cm]	pas d'exigence	≤1,25 [cm/m]	≤2 [cm/m]	sans limite
	≥20 jusque 35 [cm]	sans limite	≤1,5 [cm/m]	≤2,5 [cm/m]	sans limite
	≥35 [cm]	sans limite	≤2 [cm/m]	≤4 [cm/m]	sans limite
Fentes					
Fentes de coeur	<35 [cm]	exclues	exclues	≤1/2 ϕ	permises
	≥35 [cm]	≤1/4 ϕ	≤1/4 ϕ	≤1/2 ϕ	permises
Roulures	<35 [cm]	exclues	exclues	exclues	≤1/2 ϕ
	≥35 [cm]	exclues	≤1/4 ϕ	≤1/3 ϕ	≤1/2 ϕ
Attaques d'insectes					
<2 [mm] (Trypodendron lineatum)		exclues	exclues	exclues	permises
>2 [mm] (Sirex, Cerambycidae)		exclues	exclues	exclues	permises
Echauffure		exclue	exclue	permise	permise
Pourriture		exclue	exclue	exclue	permise
Discoloration		exclue	exclue	permise	permise
CLASSEMENT FINAL		A	B	**C**	D

Grume n°21 - 12 mars 2021

Classement visuel selon la norme DIN 4074-2 (1958) : Building timber for wood building components			
Caractéristiques	Classes		
	1	2	3
Conditions générales			
Bois avec traitement de préservation	admissible : bleuissement queue de vache non admissible : coup de foudre gélivure attaque d'insecte trace de gui roulure pourriture brune pourriture blanche	admissible : bleuissement attaque d'insecte queue de vache non admissible : coupe de foudre gélivure trace de gui roulure pourriture brune pourrtiure blanche	admissible : bleuissement coupe de foudre attaque d'insecte trace de gui roulure queue de vache non admissible : larve vivante et oeufs d'insecte dans le bois pourriture brune pourriture blanche
Teneur en eau	le bois doit être semi sec au moment de sa mise en oeuvre		
Densité minimale (Pour une teneur en eau de 20 %)	0,42 [kg/dcm^3] (sans noeud) 0,45 [kg/dcm^3] (avec noeuds)	/	/
Epaisseur des cernes annuelles	Des largeurs de cerne supérieures à 4mm sont autorisées au maximum sur une moitié de section	/	/
Noeuds Noeud seul Diamètre du noeud divisé par le diamètre de la grume	jusque 1/4	jusque 1/4	jusque 3/5
Ensemble de noeuds Somme du diamètre des noeuds sur une surface de 150 mm en longueur et une largeur égale à un quart de la circonférence de la grume	jusque 1/2	jusque 1/2	jusque 3/5
Courbure Hauteur acceptable de courbure : a) Sur une longueur de 2m au point de courbure le plus haut	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
b) Sur la longueur totale de la grume pour des éléments en flexion	1/200	1/100	/
CLASSEMENT FINAL	1	2	**3**

ANNEXE J

TABLEAU FAISANT LE LIEN ENTRE L'ASPECT ET LA RÉSISTANCE DU BOIS SELON LA NORME ALLEMANDE DIN 1052

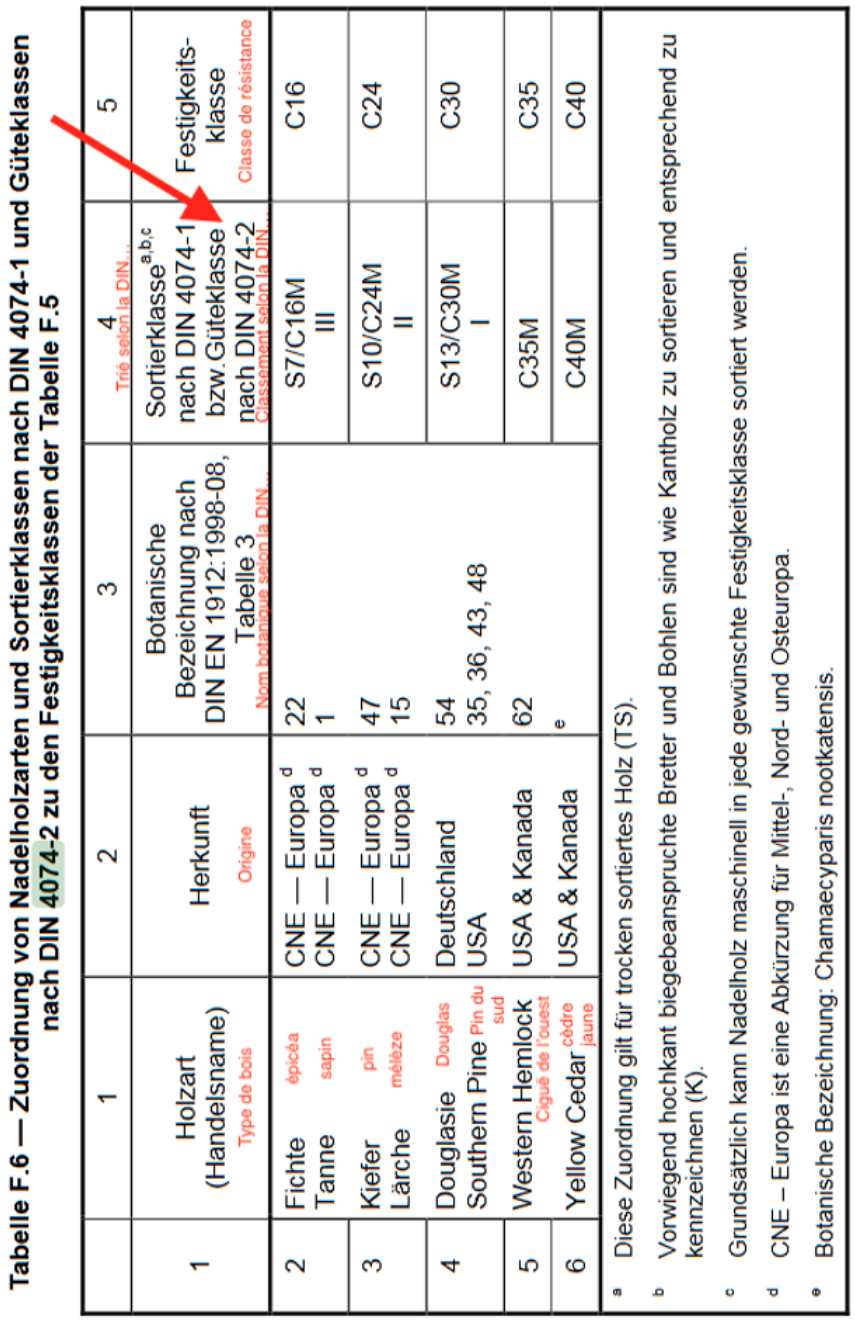


Tabelle F.6 — Zuordnung von Nadelholzarten und Sortierklassen nach DIN 4074-1 und Güteklassen nach DIN 4074-2 zu den Festigkeitsklassen der Tabelle F.5

	1	2	3	4	5
1	Holzart (Handelsname) Type de bois	Herkunft Origine	Botanische Bezeichnung nach DIN EN 1912:1998-08, Tabelle 3 Nom botanique selon la DIN...	Sortierklasse[a,b,c] nach DIN 4074-1 bzw.Güteklasse nach DIN 4074-2 Classement selon la DIN...	Festigkeits-klasse Classe de résistance
2	Fichte épicéa Tanne sapin	CNE — Europa[d] CNE — Europa[d]	22 1	S7/C16M III	C16
3	Kiefer pin Lärche mélèze	CNE — Europa[d] CNE — Europa[d]	47 15	S10/C24M II	C24
4	Douglasie Douglas Southern Pine Pin du sud	Deutschland USA	54 35, 36, 43, 48	S13/C30M I	C30
5	Western Hemlock Ciguë de l'ouest	USA & Kanada	62	C35M	C35
6	Yellow Cedar cèdre jaune	USA & Kanada	[e]	C40M	C40

[a] Diese Zuordnung gilt für trocken sortiertes Holz (TS).

[b] Vorwiegend hochkant biegebeanspruchte Bretter und Bohlen sind wie Kantholz zu sortieren und entsprechend zu kennzeichnen (K).

[c] Grundsätzlich kann Nadelholz maschinell in jede gewünschte Festigkeitsklasse sortiert werden.

[d] CNE – Europa ist eine Abkürzung für Mittel-, Nord- und Osteuropa.

[e] Botanische Bezeichnung: Chamaecyparis nootkatensis.

Figure J.1 – Tableau faisant le lien entre l'aspect et la résistance du bois selon la norme allemande DIN 1052

ANNEXE K

PHOTOGRAMMÉTRIE

K.1 Paramètres choisis dans *Metashape* pour la précision du modèle

Ci-dessous est présenté les paramètres choisis dans l'interface du logiciel *Metashape*.

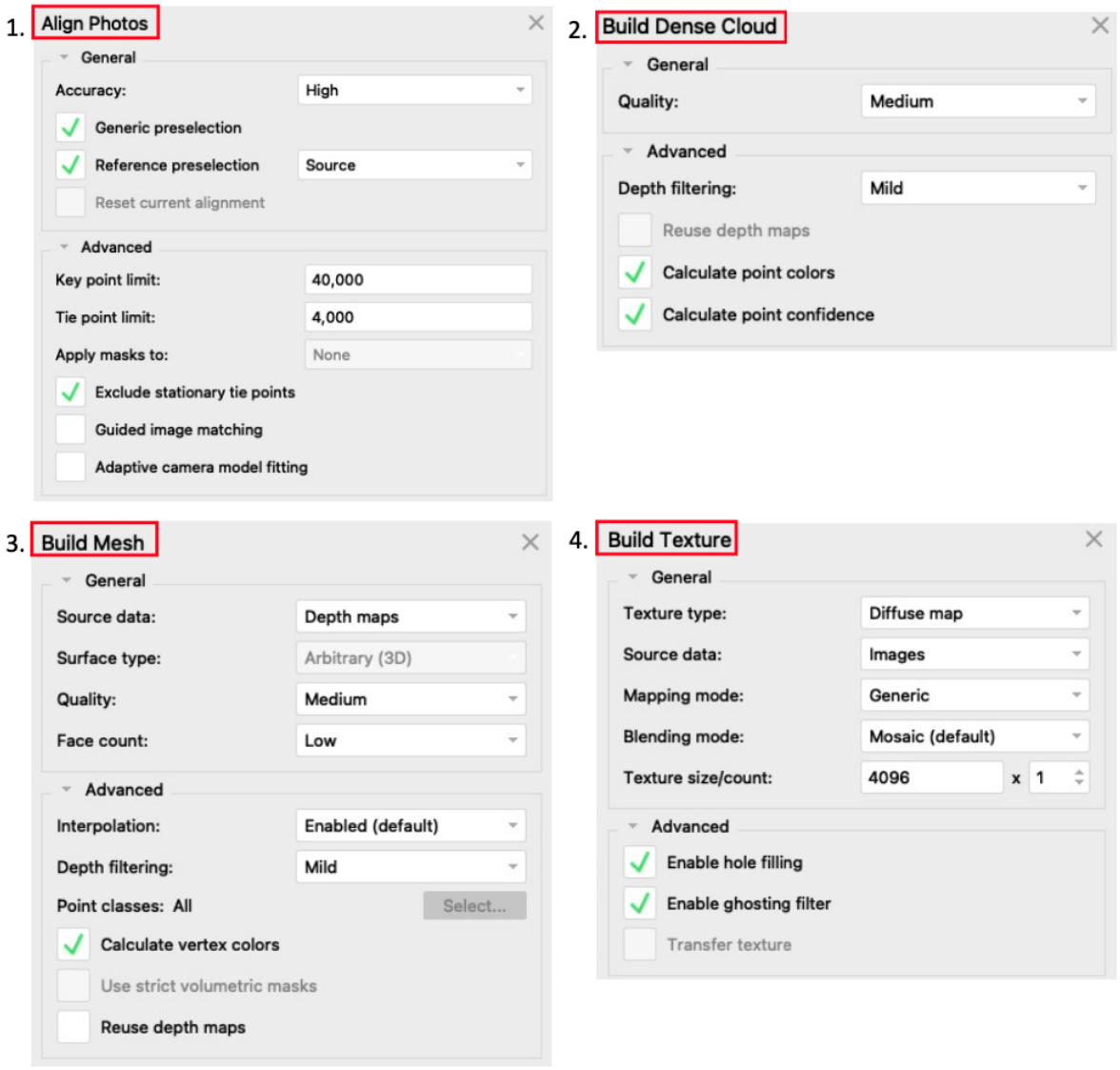


Figure K.1 – Paramètres choisis dans *Metashape* pour la précision du modèle

K.2 Erreurs sur le périmètre des grumes entre le modèle 3D et la réalité

N° de la grume	Mesure du périmètre en fonction de la longueur de la grume	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	Erreur moyenne	Erreur maximale
1	Mesure in situ [cm]	79,5	77,0	75,0	75,4	71,3	74,6	68,5	69,5	64,0		
	Mesure modèle [cm]	79,1	77,7	75,9	75,6	71,4	73,8	68,1	70,4	64,4		
	Erreur [%]	0,5	0,9	1,2	0,3	0,1	1,1	0,6	1,3	0,6	0,73	1,29
2	Mesure in situ [cm]	70,5	71,0	66,0	66,4	67,5	61,8	55,7	54,2	51,8		
	Mesure modèle [cm]	70,6	73,4	66,8	65,8	66,7	61,0	55,3	53,7	50,7		
	Erreur [%]	0,1	3,4	1,2	0,9	1,2	1,3	0,7	0,9	2,1	1,32	3,38
3	Mesure in situ [cm]	68,4	66,3	64,8	63,5	61,5	60,2	59,2	57,1	55,2		
	Mesure modèle [cm]	72,1	69,3	67,2	65,6	63,4	61,0	59,4	56,7	54,6		
	Erreur [%]	5,4	4,5	3,7	3,3	3,1	1,3	0,3	0,7	1,1	2,61	5,41
4	Mesure in situ [cm]	70,5	75,0	66,5	64,3	62,5	61,0	56,5	56,3	54,2		
	Mesure modèle [cm]	70,7	75,6	67,5	64,8	63,5	61,2	56,6	55,8	53,7		
	Erreur [%]	0,3	0,8	1,5	0,8	1,6	0,3	0,2	0,9	0,9	0,81	1,60
5	Mesure in situ [cm]	89,4	79,0	80,6	80,0	75,0	72,5	78,5	70,0	66,0		
	Mesure modèle [cm]	87,9	78,1	80,4	79,7	75,5	75,3	80,5	71,3	68,5		
	Erreur [%]	1,7	1,1	0,2	0,4	0,7	3,9	2,5	1,9	3,8	1,80	3,86
6	Mesure in situ [cm]	85,5	81,8	79,3	75,0	76,0	74,0	72,5	67,7	67,0		
	Mesure modèle [cm]	86,5	82,1	79,6	75,0	75,7	81,0	72,9	68,3	67,3		
	Erreur [%]	1,2	0,4	0,4	0,0	0,4	9,5	0,6	0,9	0,4	1,52	9,46
7	Mesure in situ [cm]	99,5	97,5	95,0	96,7	94,0	91,8	92,5	89,0	86,5		
	Mesure modèle [cm]	98,8	95,9	95,0	96,9	94,7	91,9	91,5	88,8	86,6		
	Erreur [%]	0,7	1,6	0,0	0,2	0,7	0,1	1,1	0,2	0,1	0,54	1,64
8	Mesure in situ [cm]	82,5	87,3	79,2	80,2	73,2	71,5	67,5	64,5	70,0		
	Mesure modèle [cm]	79,9	86,3	76,5	78,0	71,6	69,8	66,8	64,1	69,4		
	Erreur [%]	3,2	1,1	3,4	2,7	2,2	2,4	1,0	0,6	0,9	1,95	3,41
9	Mesure in situ [cm]	72,0	69,0	69,6	69,0	65,2	62,5	62,0	60,0	59,5		
	Mesure modèle [cm]	71,4	68,6	69,3	70,0	65,0	61,7	61,5	59,5	60,5		
	Erreur [%]	0,8	0,6	0,4	1,4	0,3	1,3	0,8	0,8	1,7	0,91	1,68
10	Mesure in situ [cm]	84,5	84,2	84,5	85,8	80,5	80,0	79,0	77,2	77,0		
	Mesure modèle [cm]	84,8	83,2	86,0	86,6	80,9	79,4	79,0	76,9	77,4		
	Erreur [%]	0,4	1,2	1,8	0,9	0,5	0,7	0,0	0,4	0,5	0,71	1,78
11	Mesure in situ [cm]	79,0	76,7	76,4	76,9	71,5	75,0	68,2	66,6	65,4		
	Mesure modèle [cm]	78,2	76,6	76,4	77,0	72,2	75,2	68,7	66,5	65,7		
	Erreur [%]	1,0	0,1	0,0	0,1	1,0	0,3	0,7	0,2	0,5	0,43	1,01
12	Mesure in situ [cm]	80,0	77,9	73,2	72,8	70,8	69,0	68,7	66,0	64,0		
	Mesure modèle [cm]	79,7	78,5	72,8	72,7	71,6	69,9	69,5	66,3	64,7		
	Erreur [%]	0,4	0,8	0,5	0,1	1,1	1,3	1,2	0,5	1,1	0,78	1,30
13	Mesure in situ [cm]	87,0	84,0	81,5	79,0	78,0	79,0	75,3	80,0	71,5		
	Mesure modèle [cm]	88,0	84,3	82,3	80,5	80,2	81,5	74,7	86,2	76,9		
	Erreur [%]	1,1	0,4	1,0	1,9	2,8	3,2	0,8	7,8	7,6	2,94	7,75
14 (NA)	Mesure in situ [cm]	89,0	98,5	84,5	80,5	77,5	78,5	78,0	71,5	70,5		
	Mesure modèle [cm]	90,0	98,9	85,0	80,4	77,6	79,0	77,3	71,2	70,3		
	Erreur [%]	1,1	0,4	0,6	0,1	0,1	0,6	0,9	0,4	0,3	0,51	1,12
15	Mesure in situ [cm]	95,0	92,2	88,8	86,0	84,0	83,5	83,0	77,5	85,5		
	Mesure modèle [cm]	95,5	93,0	88,4	86,4	84,5	83,2	84,3	78,2	86,5		
	Erreur [%]	0,5	0,9	0,5	0,5	0,6	0,4	1,6	0,9	1,2	0,77	1,57
16	Mesure in situ [cm]	88,0	87,0	84,5	80,5	82,5	81,5	75,5	75,2	68,0		
	Mesure modèle [cm]	88,4	86,5	84,7	80,5	81,9	80,0	78,5	74,2	67,6		
	Erreur [%]	0,5	0,6	0,2	0,0	0,7	1,8	4,0	1,3	0,6	1,08	3,97
17	Mesure in situ [cm]	98,5	96,5	99,0	97,0	95,0	93,5	90,5	91,0	91,0		
	Mesure modèle [cm]	98,8	97,1	99,7	98,2	95,2	94,1	91,3	90,7	91,7		
	Erreur [%]	0,3	0,6	0,7	1,2	0,2	0,6	0,9	0,3	0,8	0,63	1,24
18	Mesure in situ [cm]	73,3	71,0	73,0	69,0	67,1	64,0	66,9	62,3	62,5		
	Mesure modèle [cm]	73,9	70,6	73,1	69,1	66,8	64,7	67,3	61,9	63,3		
	Erreur [%]	0,8	0,6	0,1	0,1	0,4	1,1	0,6	0,6	1,3	0,64	1,28
19	Mesure in situ [cm]	91,0	83,0	85,0	84,5	86,7	84,0	84,0	83,0	85,0		
	Mesure modèle [cm]	90,5	85,7	85,6	85,2	85,5	88,6	89,3	92,6	92,2		
	Erreur [%]	0,5	3,3	0,7	0,8	1,4	5,5	6,3	11,6	8,5	4,28	11,57
20	Mesure in situ [cm]	83,1	82,7	79,3	80,2	76,4	78,5	74,8	73,5	74,0		
	Mesure modèle [cm]	76,5	76,3	76,6	77,8	74,9	76,4	75,6	73,7	76,4		
	Erreur [%]	7,9	7,7	3,4	3,0	2,0	2,7	1,1	0,3	3,2	3,48	7,94
21	Mesure in situ [cm]	85,5	88,0	84,0	82,5	81,0	80,7	78,0	76,5	83,0		
	Mesure modèle [cm]	88,0	90,1	84,4	83,8	81,8	82,2	78,4	75,5	84,6		
	Erreur [%]	2,9	2,4	0,5	1,6	1,0	1,9	0,5	1,3	1,9	1,55	2,92

FIGURE K.2 – Erreurs sur le périmètre des grumes entre le modèle 3D et la réalité

ANNEXE L

RÉFÉRENCES DU MATÉRIEL EMPLOYÉ

Essais sur éprouvettes équarries : Batteries d'essais 1 à 4

Machine d'essai Lebow

- Fabricant, modèle et numéro de série : Lebow, 3116 20K, 1234
- Capacité maximale : 100 [kN]
- Précision : 0,61 %
- Résolution : 0,001 [kN]

Capteur de déplacement relatif à la machine d'essai Lebow

- Fabricant, modèle et numéro de série : MTS, 204.63, 175
- Course maximale : ± 125 [mm]
- Précision : 0,64 %
- Résolution : 0,001 [mm]

Essais sur éprouvettes équarries : Batteries d'essais 5 à 7

Machine d'essai ZwickRoell

- Fabricant, modèle et numéro de série : ZwickRoell GmbH & Co, BZ2-MM14740.ZW03, 67921
- Capacité maximale : 50 [kN]
- Précision : 0,23 %
- Résolution : -

Extensomètre relatif à la machine d'essai ZwickRoell

- Fabricant, modèle et numéro de série : Zwick, BZ2-EXC51000D.2AMX, 103421
- Course maximale : 50 [mm]
- Précision : 0,17 %
- Résolution : -

Essais sur grumes

Cellule de force relative au vérin

- Fabricant, modèle et numéro de série : Lebow, 3156-100k, 114
- Capacité maximale : 340 [kN]
- Précision : 0,02 %
- Classe 0,5 suivant la norme EN ISO 7500-1 : 2018

Capteur de déplacement relatif au vérin

- Fabricant, modèle et numéro de série : MTS, 244.72, 109
- Course maximale : ± 125 [mm]
- Précision : 0,89 %
- Résolution : 0,001 [mm]

LVDT (1) pour la mesure de la flèche locale

- Fabricant, modèle et numéro de série : RDP, ACT2000A, 217878
- Course maximale : ± 50 [mm]
- Précision : 1,14 %
- Résolution : 0,01 [mm]

LVDT (2) pour la mesure de la flèche locale

- Fabricant, modèle et numéro de série : RDP, ACT2000A, 161546
- Course maximale : ± 50 [mm]
- Précision : 1,69 %
- Résolution : 0,01 [mm]

LVDT (3) pour la mesure du tassement aux appuis

- Fabricant, modèle et numéro de série : Solartron Metrology, AX/10/S, M922509AD18-01
- Course maximale : ± 10 [mm]
- Précision : 0,34 %
- Résolution : 0,001 [mm]

LVDT (4) pour la mesure du tassement aux appuis

- Fabricant, modèle et numéro de série : Solartron Metrology, AX/10/S, M922509AL10-01
- Course maximale : ± 10 [mm]
- Précision : 0,22%
- Résolution : 0,001 [mm]

LVDT (5) pour la mesure du tassement aux appuis

- Fabricant, modèle et numéro de série : Solartron Metrology, AX/10/S, M922509AD18-02
- Course maximale : ± 10 [mm]
- Précision : 0,23 %
- Résolution : 0,001 [mm]

Laser pour la mesure de la flèche globale

- Fabricant, modèle et numéro de série : - , Laser Keyence LK-G502, -
- Étendue de mesure : 250 [mm]
- Précision : 0,52 %
- Résolution : -

Potentiomètre (1) pour la mesure de la flèche sous points d'attache du dispositif de flèche locale

- Fabricant, modèle et numéro de série : - , PT1A-20-UP-5K-MC4, –
- Étendue de mesure : 500 [mm]
- Précision : 0,1 %
- Résolution : 0,01 [mm]

Potentiomètre (2) pour la mesure de la flèche sous points d'attache du dispositif de flèche locale

- Fabricant, modèle et numéro de série : TE , PT1A-20-UP-5K-MC4, J2860558
- Étendue de mesure : 500 [mm]
- Précision : 0,1 %
- Résolution : 0,01 [mm]

ANNEXE M

DÉTAILS DES RÉSULTATS SUR ÉPROUVETTES ÉQUARRIES

Dans la présente annexe, la dénomination suivante a été adoptée pour aisément identifier les éprouvettes : $\delta\_\phi\sigma\_\pi$:

- δ : Numéro de la batterie (A à G) ;
- ϕ : Identification de la planche dont elle est issue, par une lettre capitale (A, B, C, D, E) [1]. Il y a deux jeux de planches. Le premier allant de A à E est pour les batteries 3 et 4. Le deuxième allant aussi de A à D est pour les batteries 5 à 7 ;
- σ : Numéro du duo ou de l'éprouvette s'il n'y pas de duo, issu de la planche ϕ (1 à 6) ;
- π : Valeur du paramètre étudié lors de la batterie δ. Absent si l'approche de la batterie δ n'est pas comparative.

Naturellement, les éprouvettes d'un même duo auront $\delta\_\phi\sigma$ en commun. En effet, elles ne se distinguent que par la valeur du paramètre étudié. Par exemple, C_A1_300, signifie qu'on regarde une éprouvette testée avec un délai de 300 secondes ($\pi = 300$). Cette éprouvette est issu du duo numéro 1 ($\sigma = 1$), de la planche A ($\phi = \text{A}$). Et, il s'agit d'un essai réalisé dans le cadre de la troisième batterie ($\delta = \text{C}$). L'autre membre du duo 1 de la batterie C pris sur la planche A est C_A1_000.

1. N ou NS si la planche n'a pas été répertoriée.

M.1 Batterie 1 : Chargement cyclique

Éprouvette N02

Global

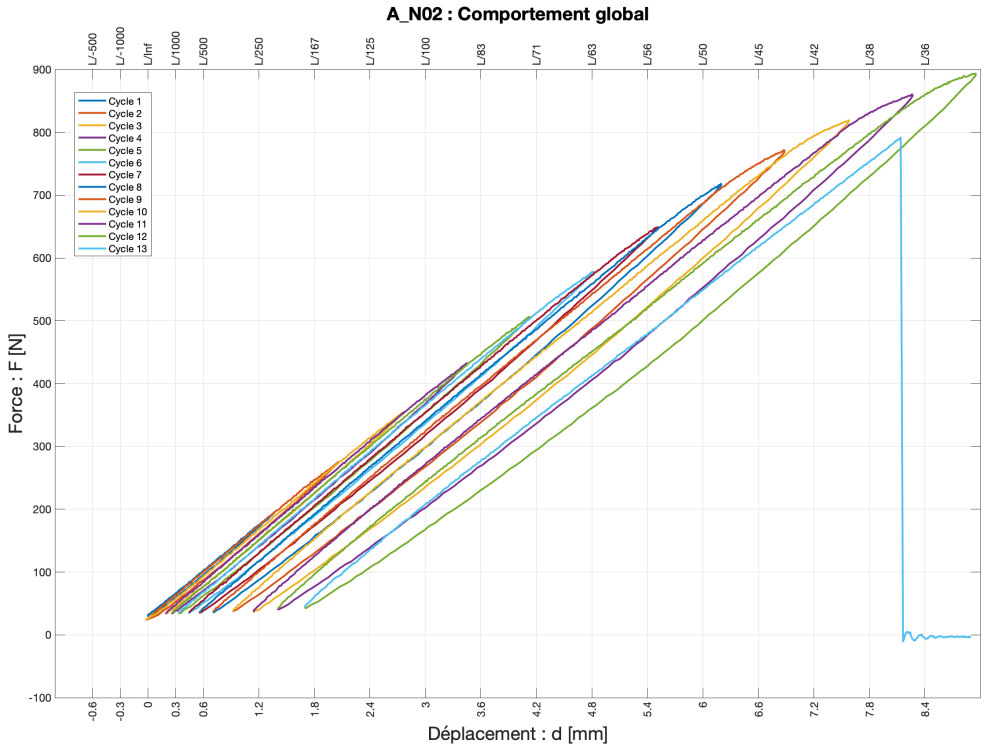


FIGURE M.1 – Comportement global de l'éprouvette N02 de la batterie 1

Déplacement résiduel

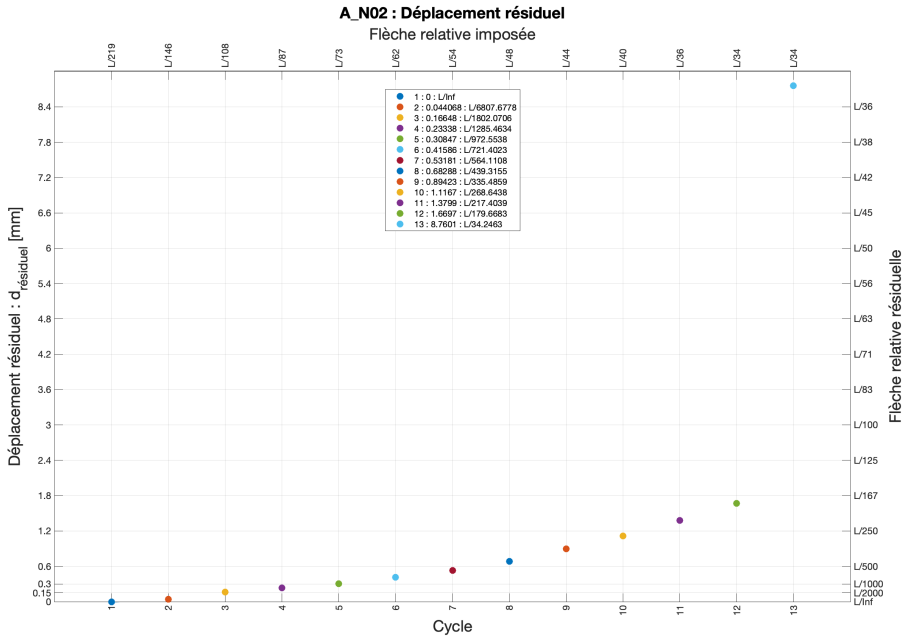


Figure M.2 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N02 de la batterie 1

Force maximale

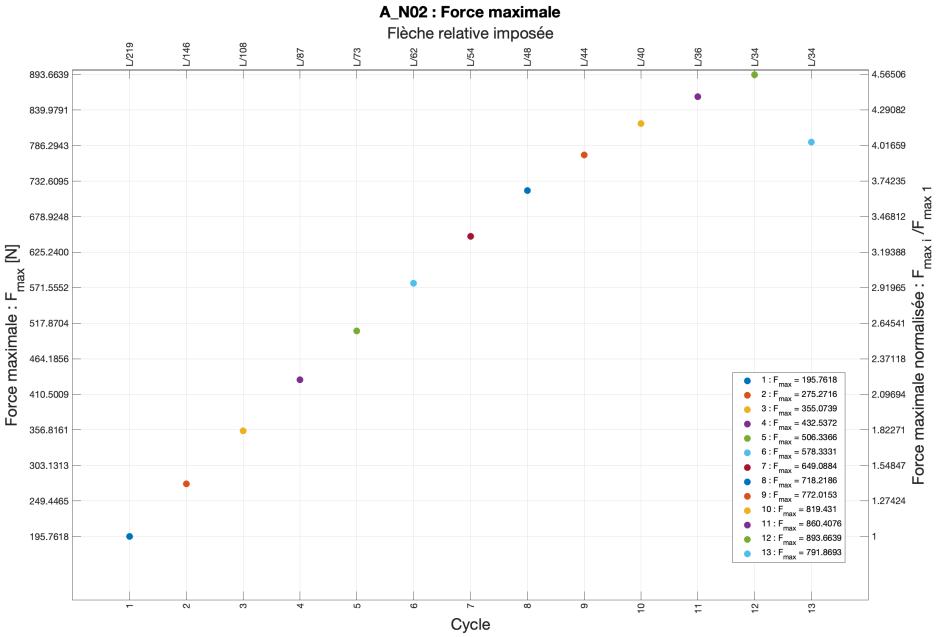


Figure M.3 – Force maximale de l'éprouvette N02 de la batterie 1

Module de Young

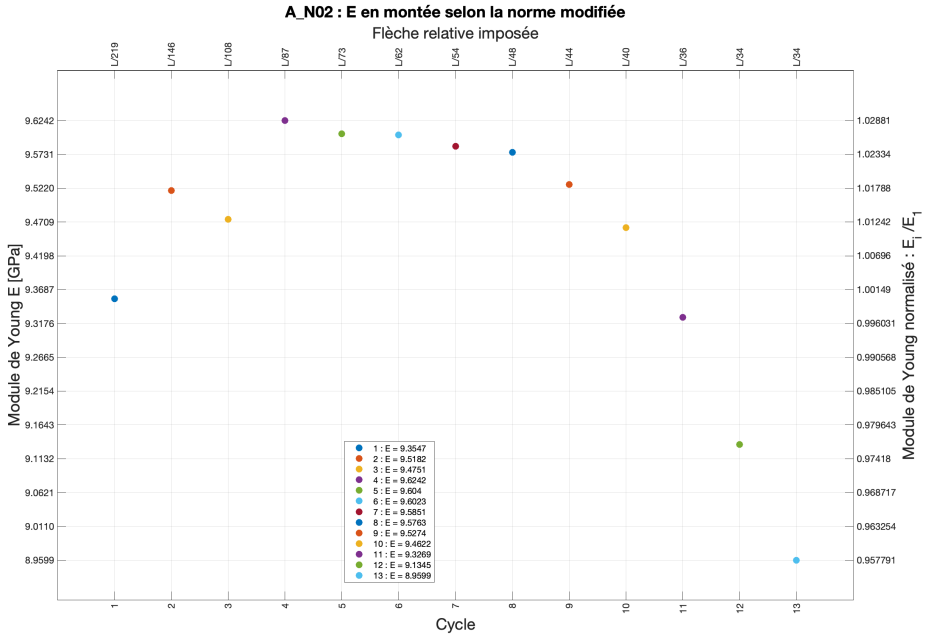


FIGURE M.4 – Module de Young en montée de l'éprouvette N02 de la batterie 1

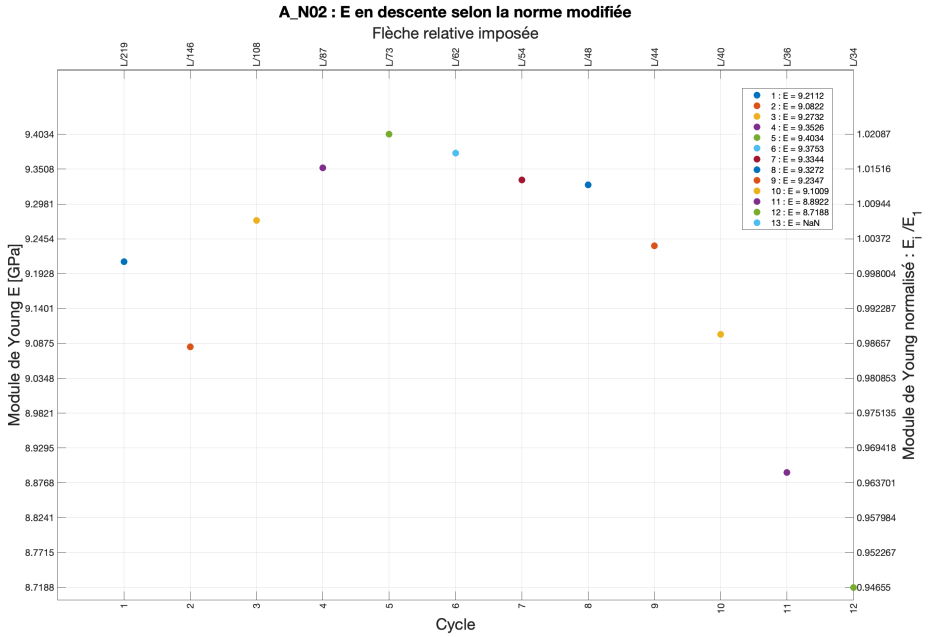


FIGURE M.5 – Module de Young en descente de l'éprouvette N02 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

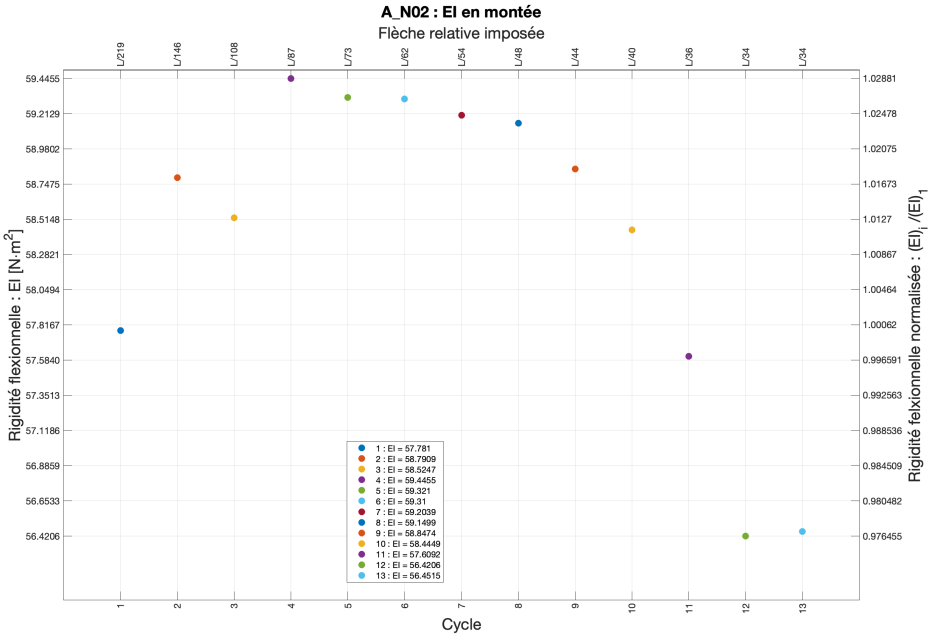


Figure M.6 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N02 de la batterie 1

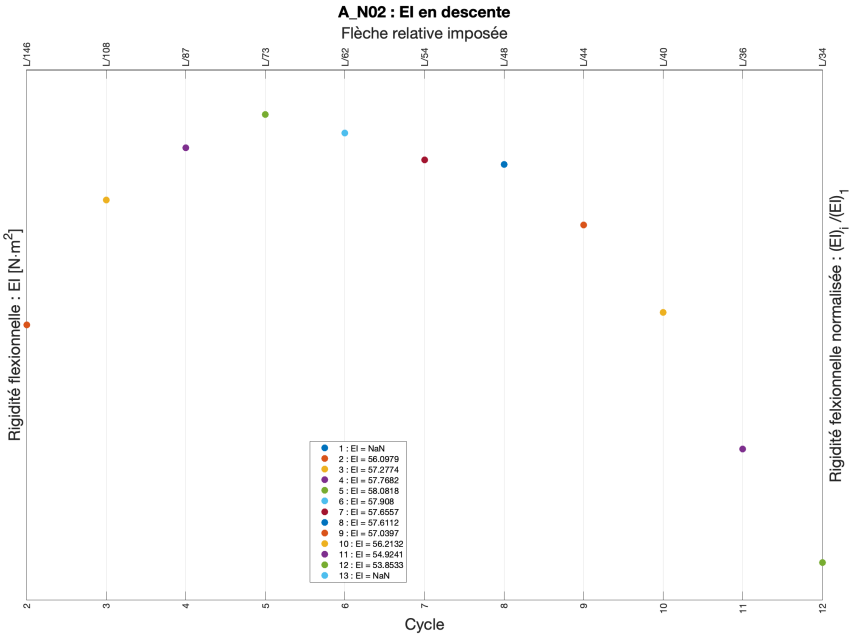


Figure M.7 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N02 de la batterie 1

Fonction S

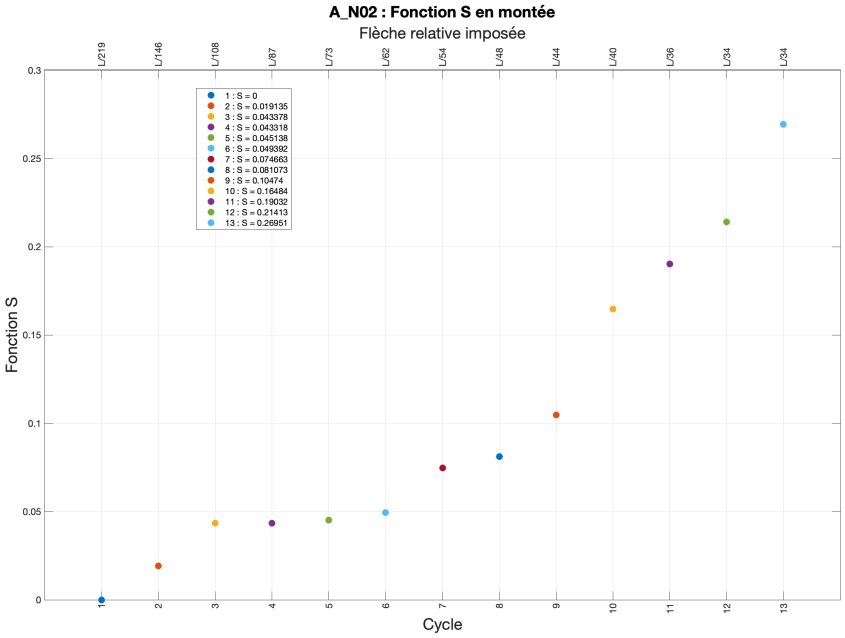


FIGURE M.8 – Fonction S en montée de l'éprouvette N02 de la batterie 1

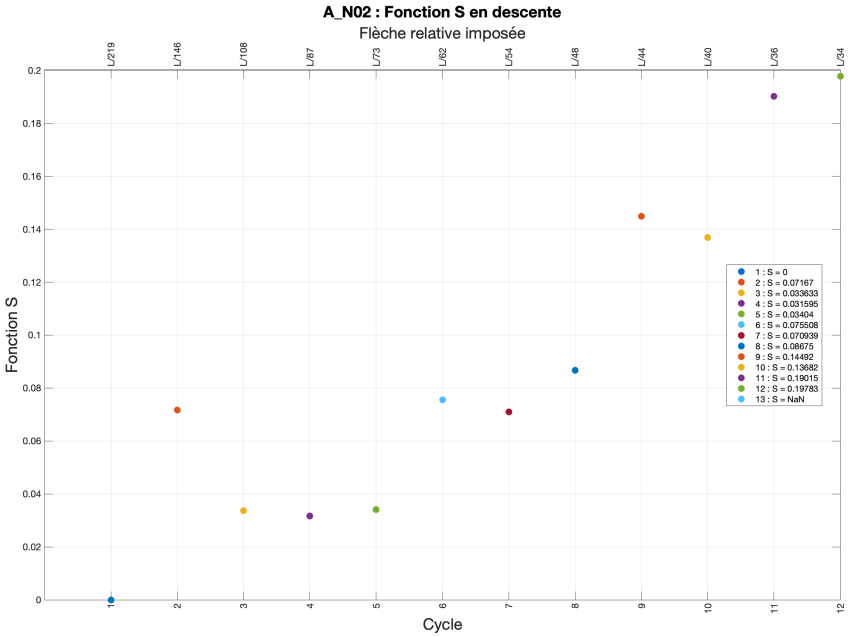


FIGURE M.9 – Fonction S en descente de l'éprouvette N02 de la batterie 1

Éprouvette N03

Global

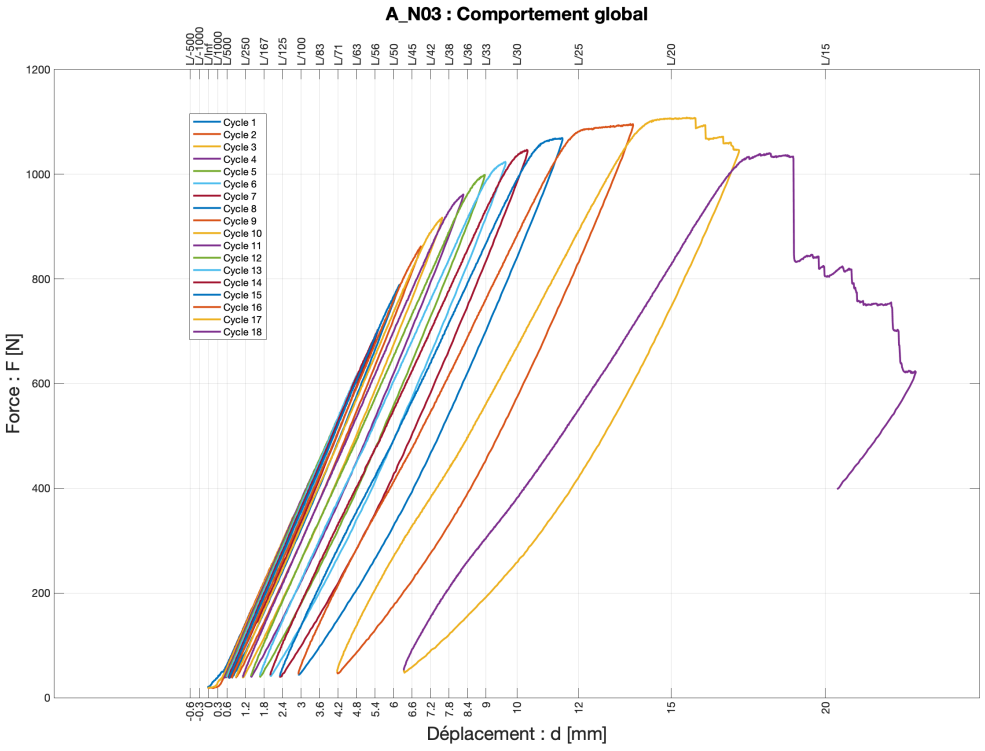


Figure M.10 – Comportement global de l'éprouvette N03 de la batterie 1

Déplacement résiduel

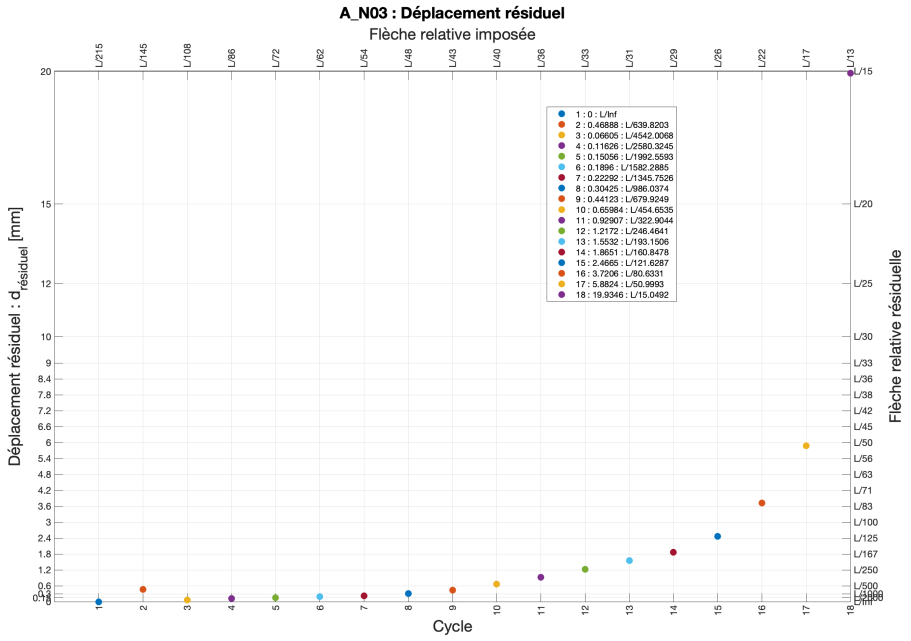


FIGURE M.11 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N03 de la batterie 1

Force maximale

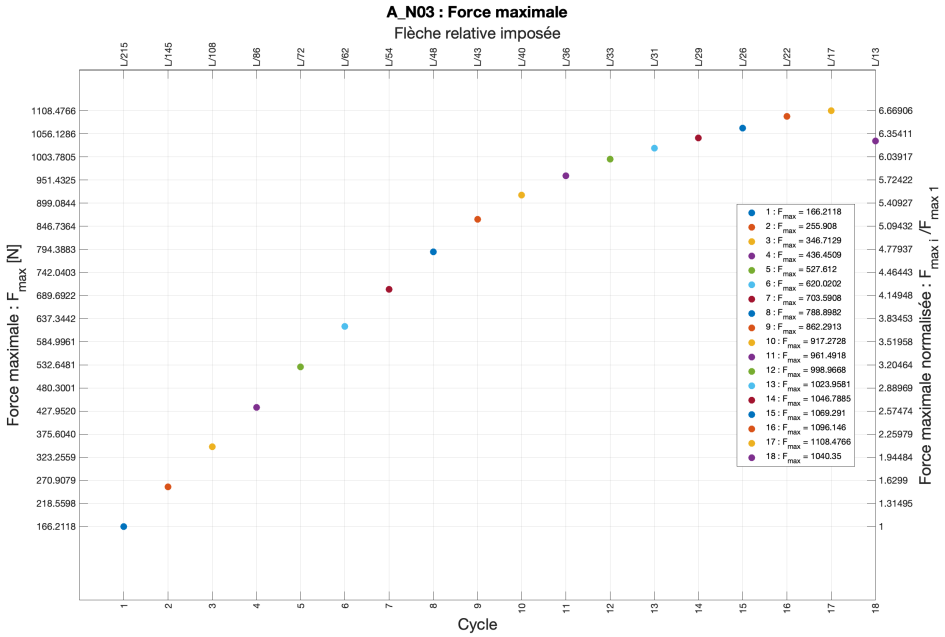


FIGURE M.12 – Force maximale de l'éprouvette N03 de la batterie 1

Module de Young

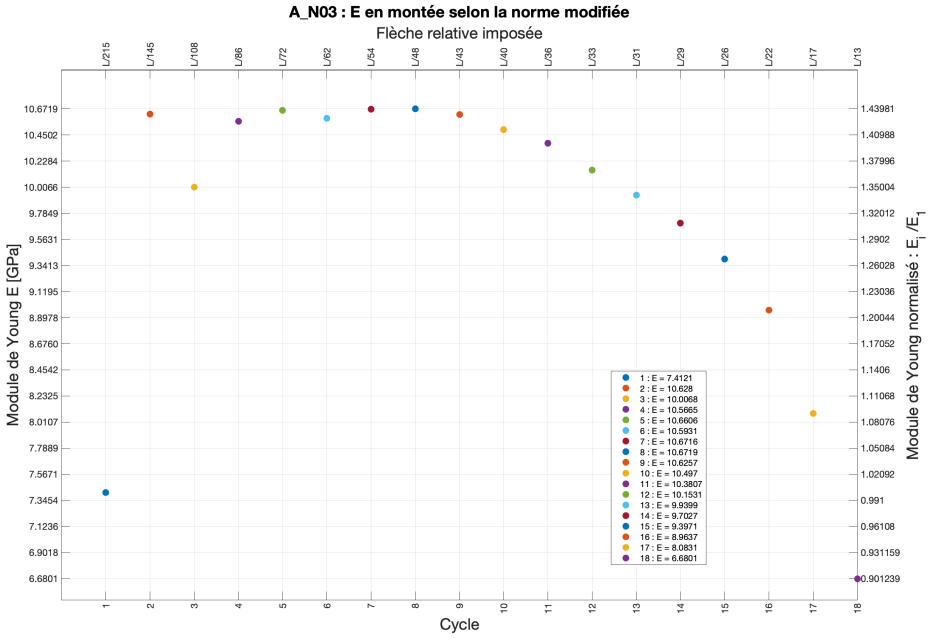


Figure M.13 – Module de Young en montée de l'éprouvette N03 de la batterie 1

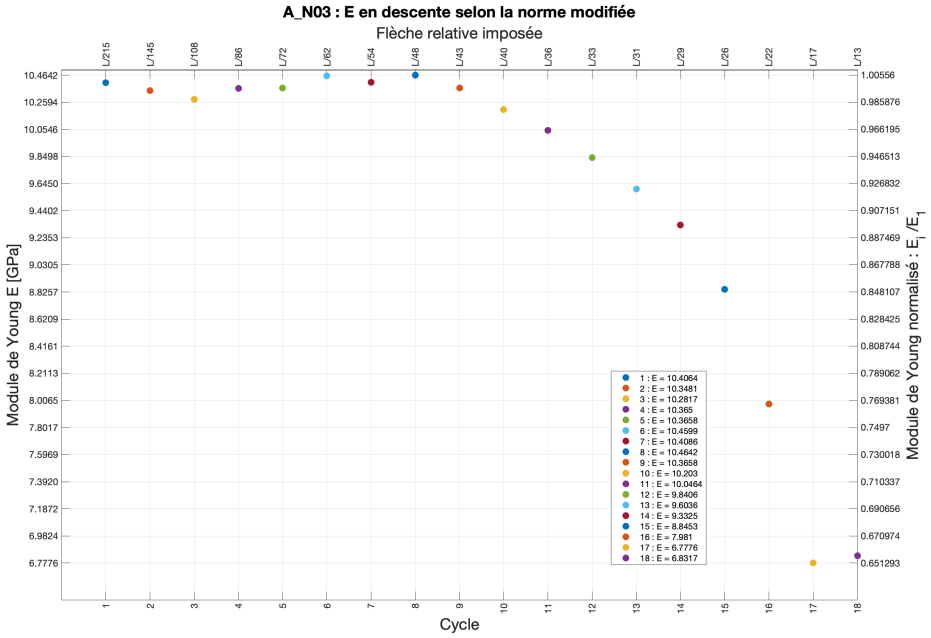


Figure M.14 – Module de Young en descente de l'éprouvette N03 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

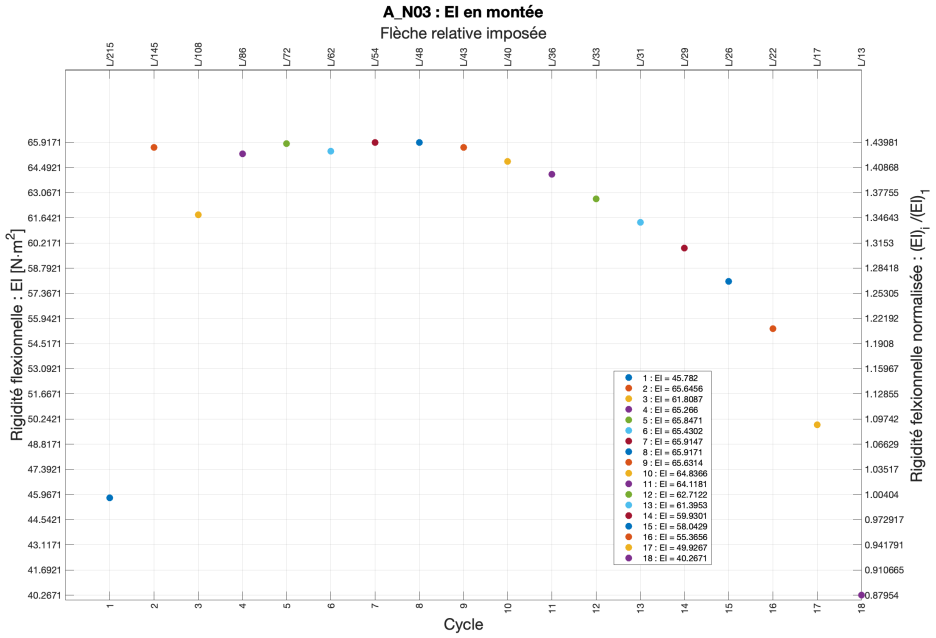


FIGURE M.15 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N03 de la batterie 1

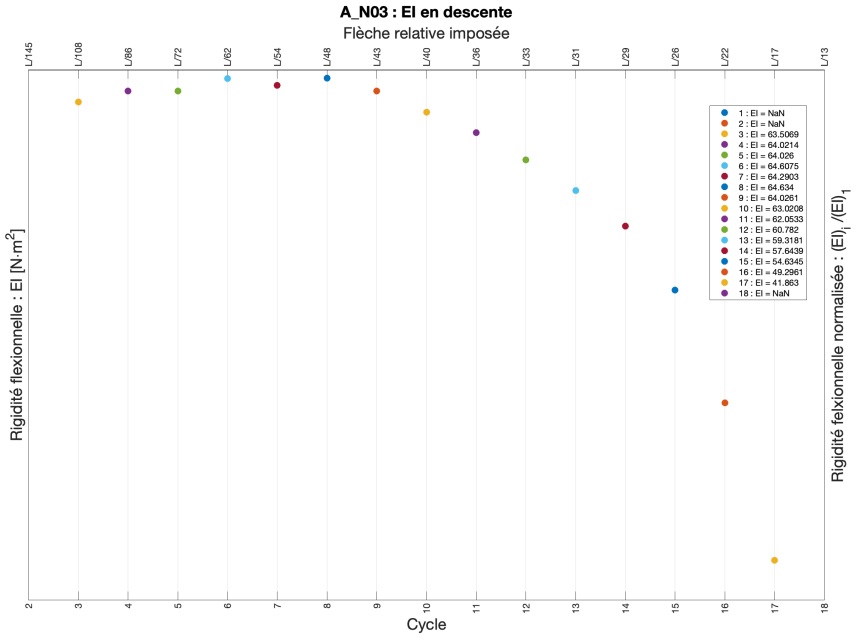


FIGURE M.16 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N03 de la batterie 1

Fonction S

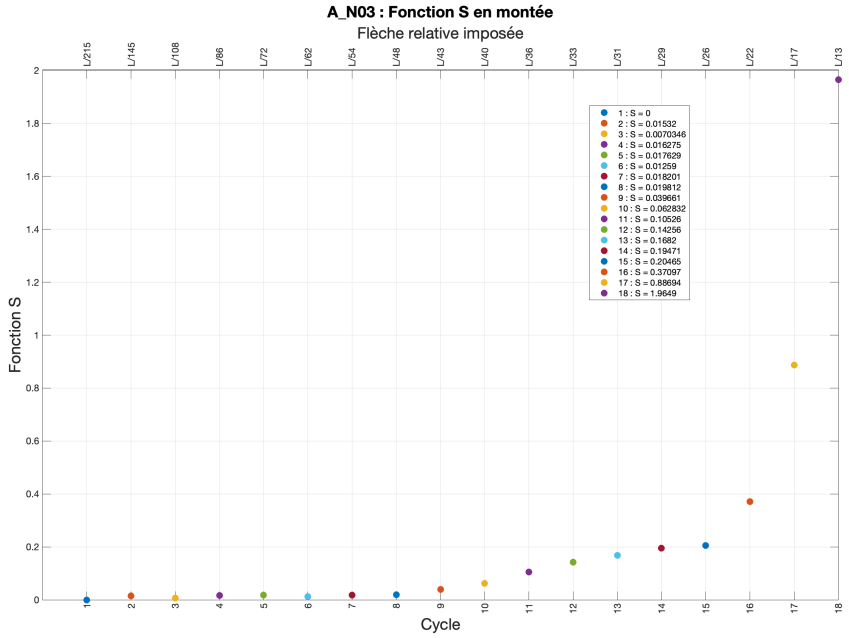


Figure M.17 – Fonction S en montée de l'éprouvette N03 de la batterie 1

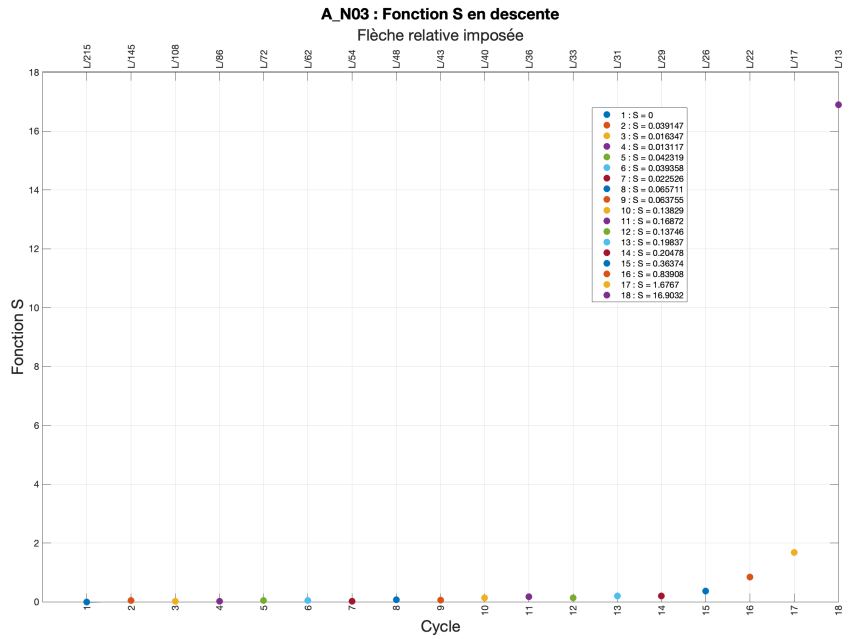


Figure M.18 – Fonction S en descente de l'éprouvette N03 de la batterie 1

Éprouvette N04

Global

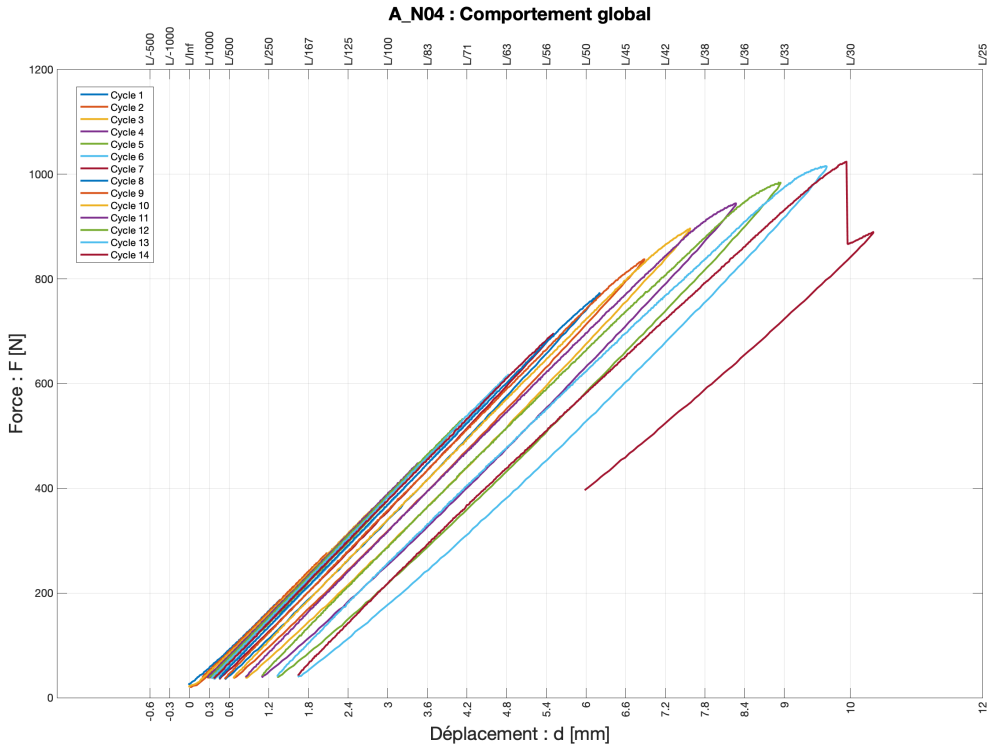


FIGURE M.19 – Comportement global de l'éprouvette N04 de la batterie 1

Déplacement résiduel

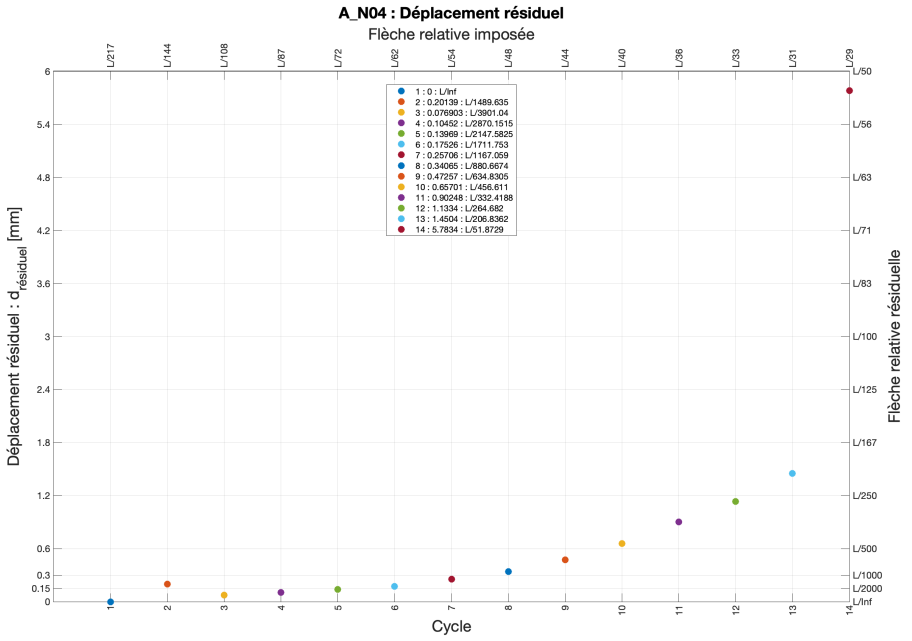


FIGURE M.20 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N04 de la batterie 1

Force maximale

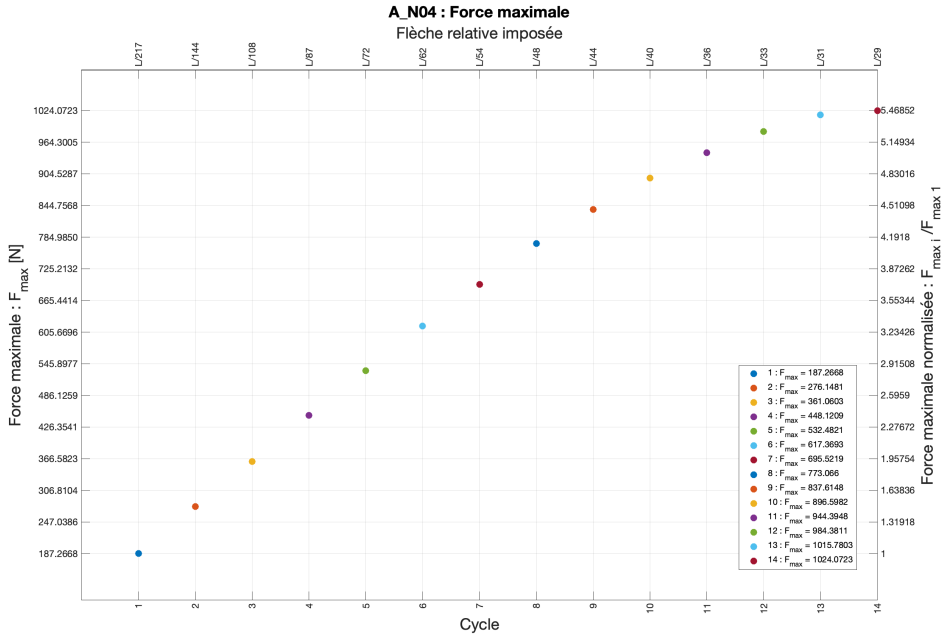


FIGURE M.21 – Force maximale de l'éprouvette N04 de la batterie 1

Module de Young

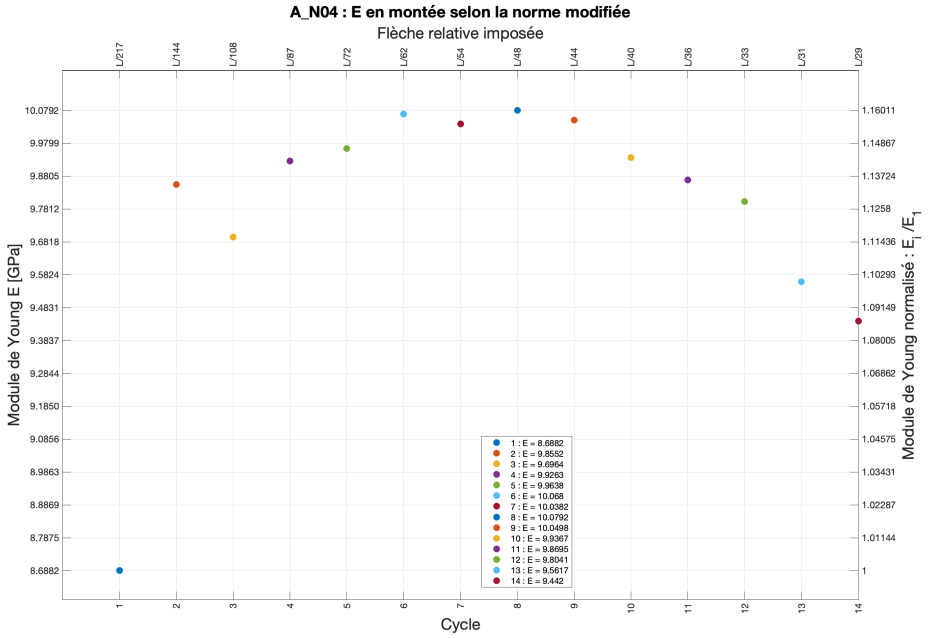


FIGURE M.22 – Module de Young en montée de l'éprouvette N04 de la batterie 1

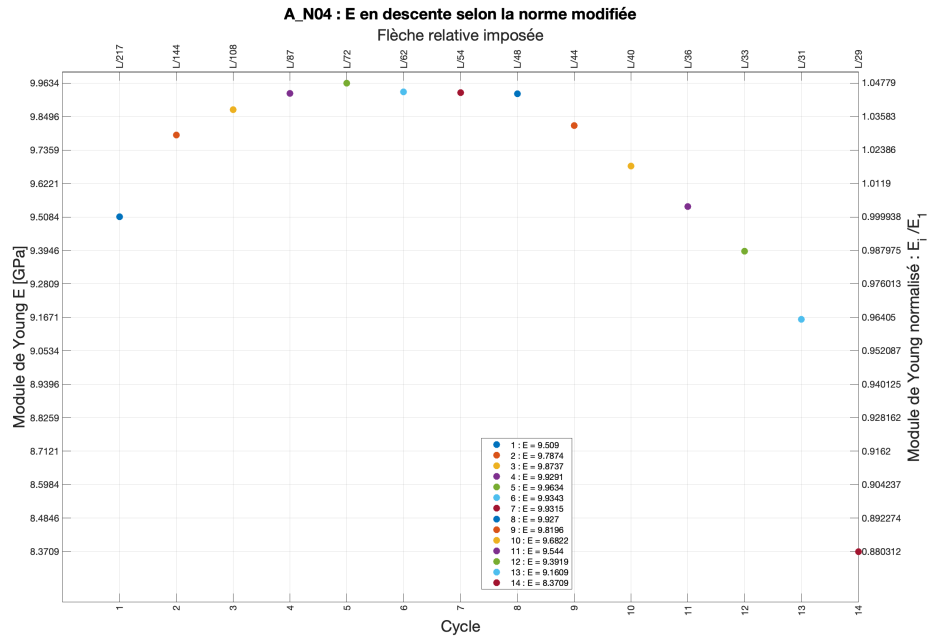


FIGURE M.23 – Module de Young en descente de l'éprouvette N04 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

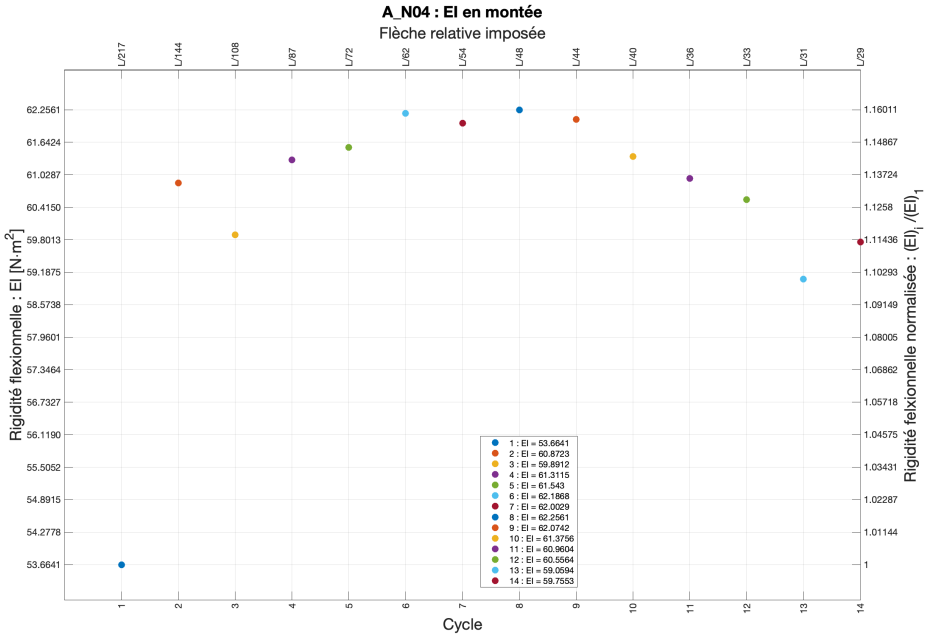


Figure M.24 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N04 de la batterie 1

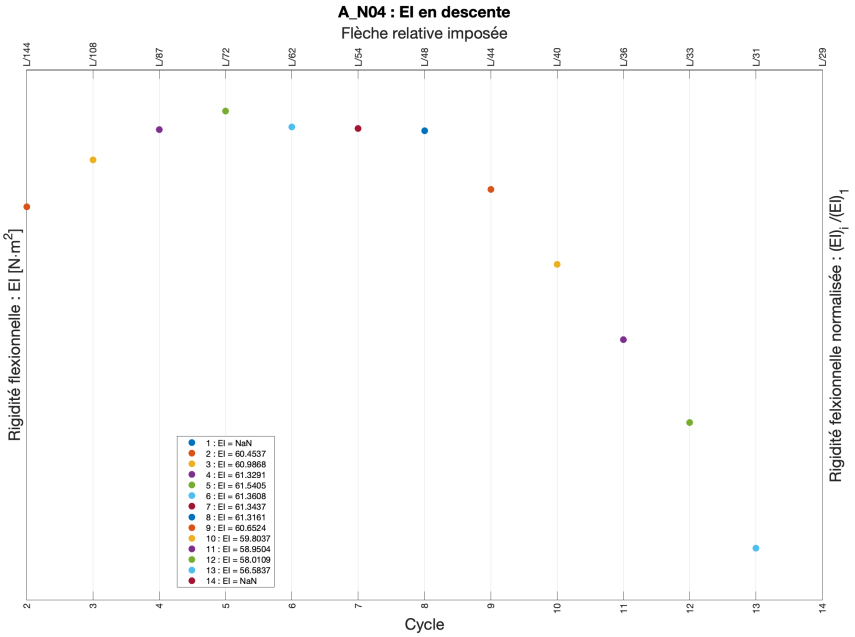


Figure M.25 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N04 de la batterie 1

Fonction S

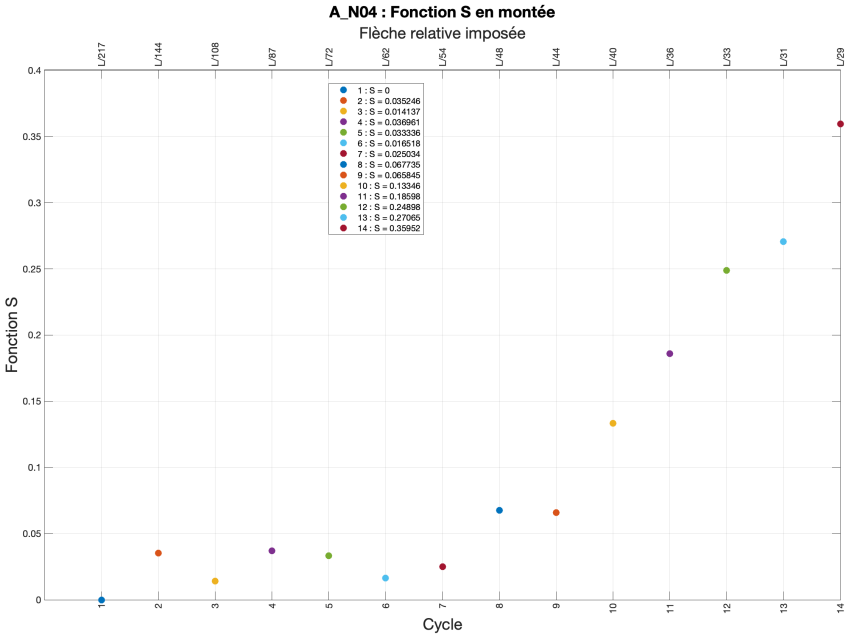


FIGURE M.26 – Fonction S en montée de l'éprouvette N04 de la batterie 1

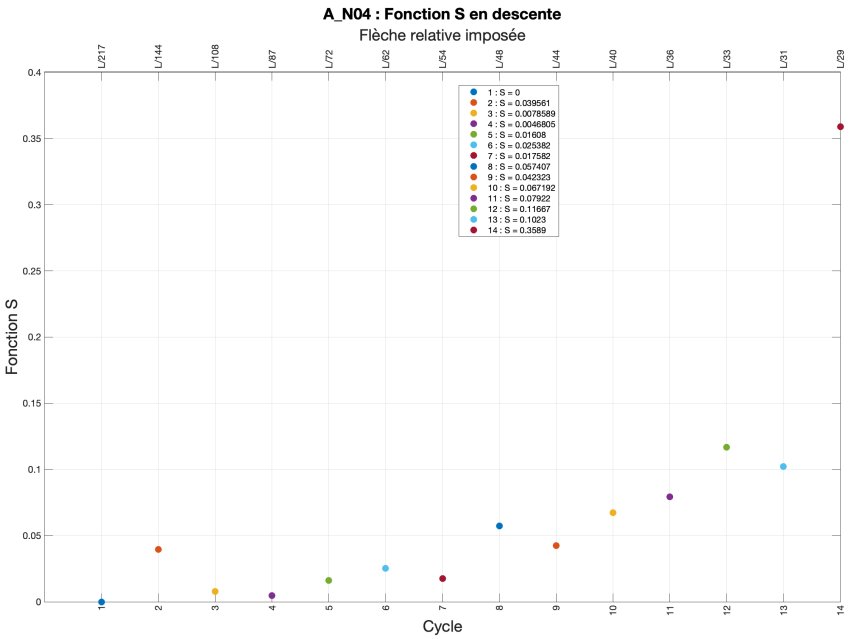


FIGURE M.27 – Fonction S en descente de l'éprouvette N04 de la batterie 1

Éprouvette N05

Global

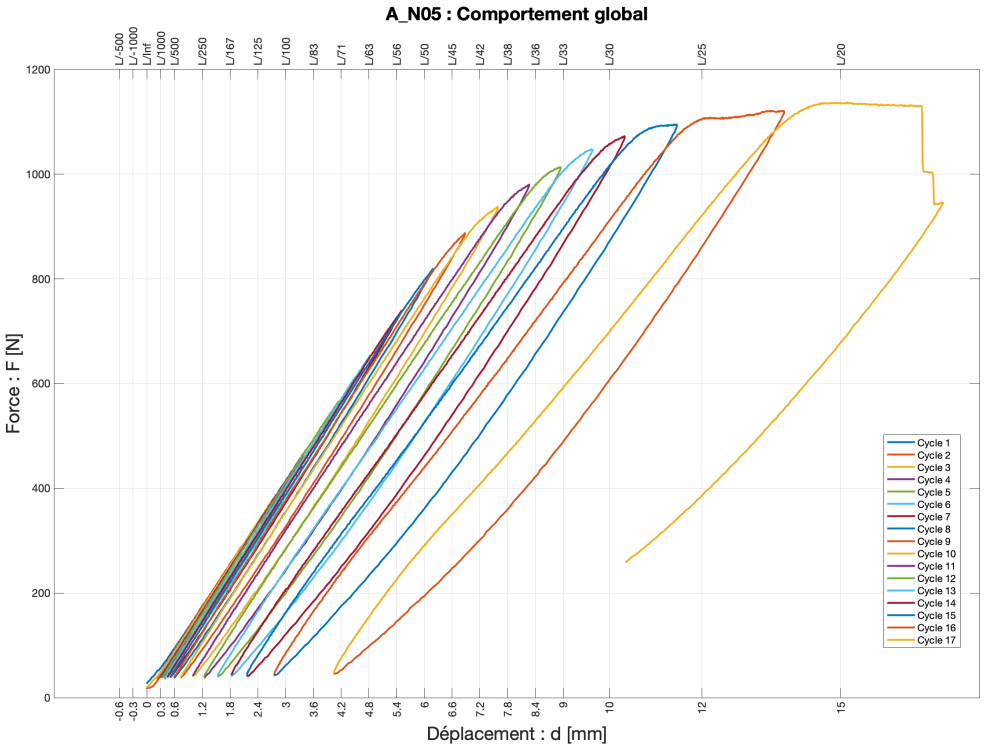


Figure M.28 – Comportement global de l'éprouvette N05 de la batterie 1

Déplacement résiduel

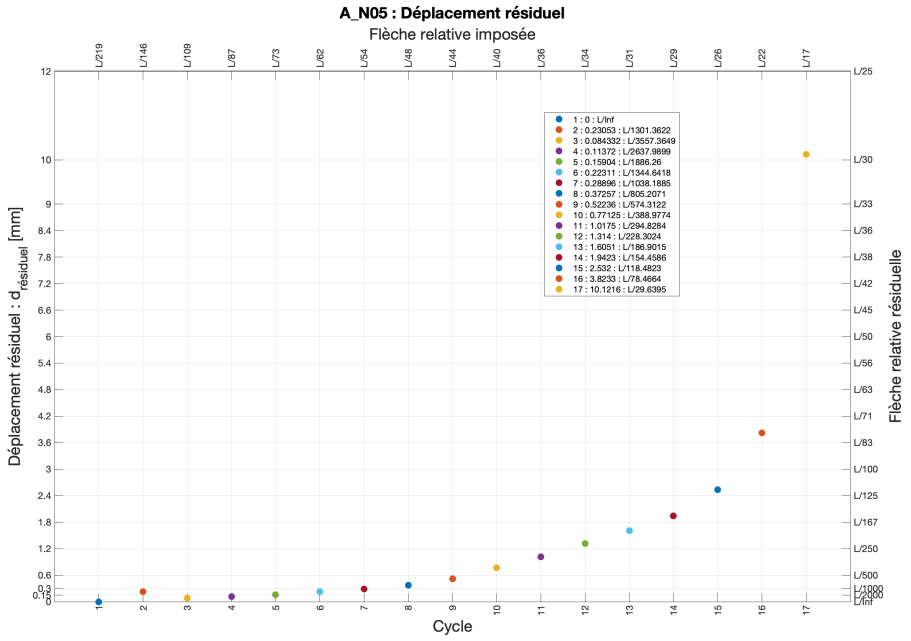


FIGURE M.29 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N05 de la batterie 1

Force maximale

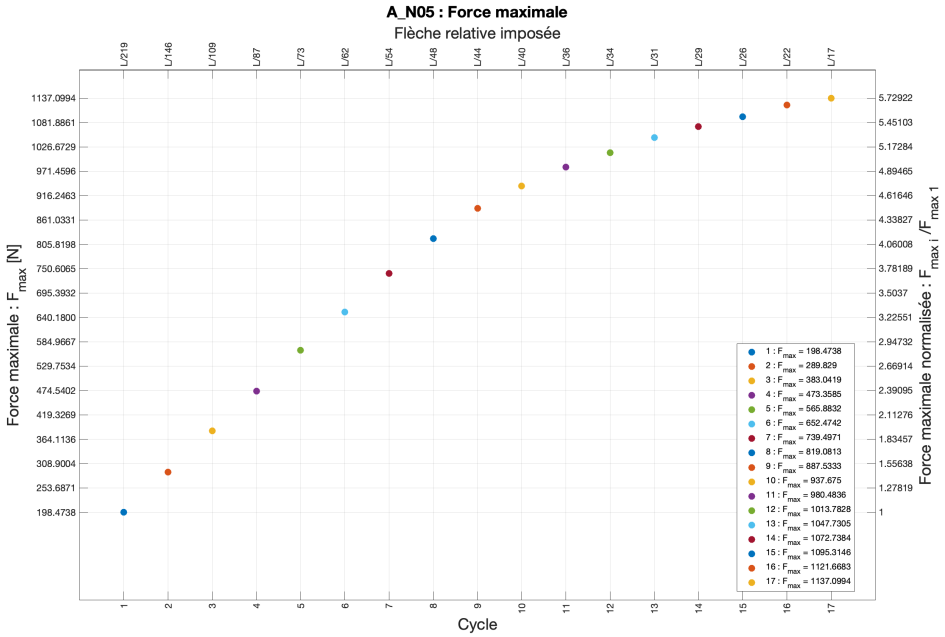


FIGURE M.30 – Force maximale de l'éprouvette N05 de la batterie 1

Module de Young

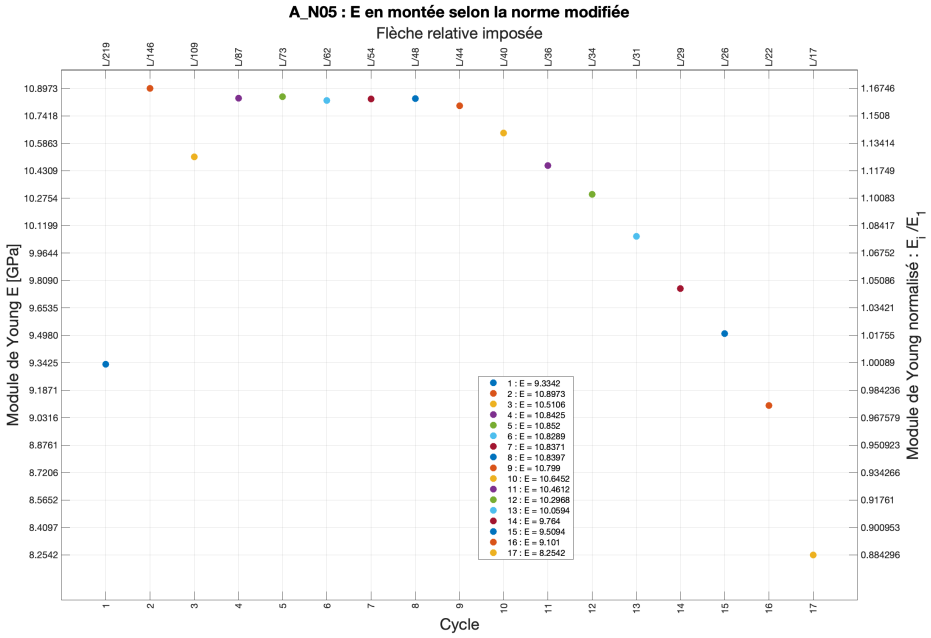


Figure M.31 – Module de Young en montée de l'éprouvette N05 de la batterie 1

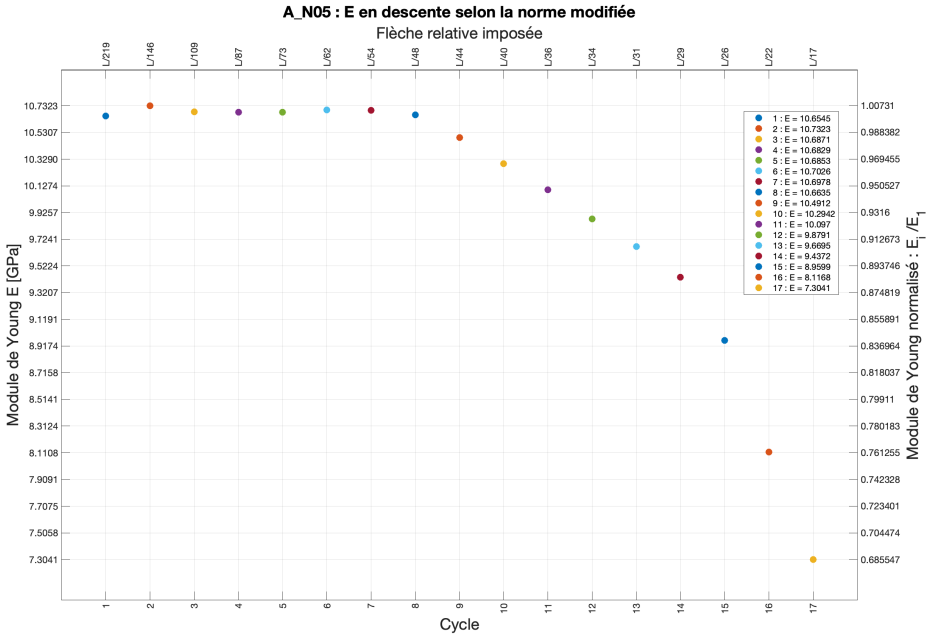


Figure M.32 – Module de Young en descente de l'éprouvette N05 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

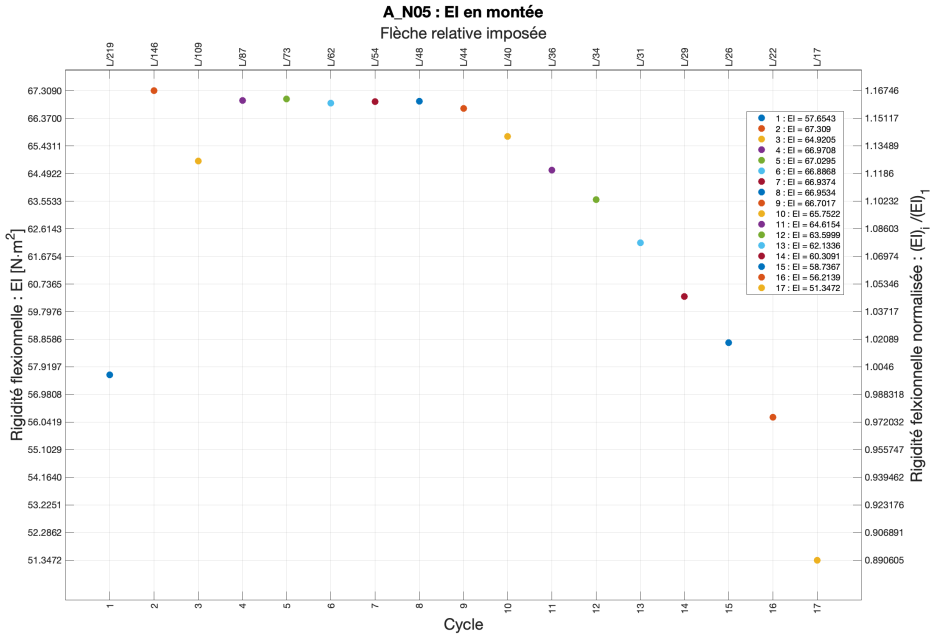


FIGURE M.33 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N05 de la batterie 1

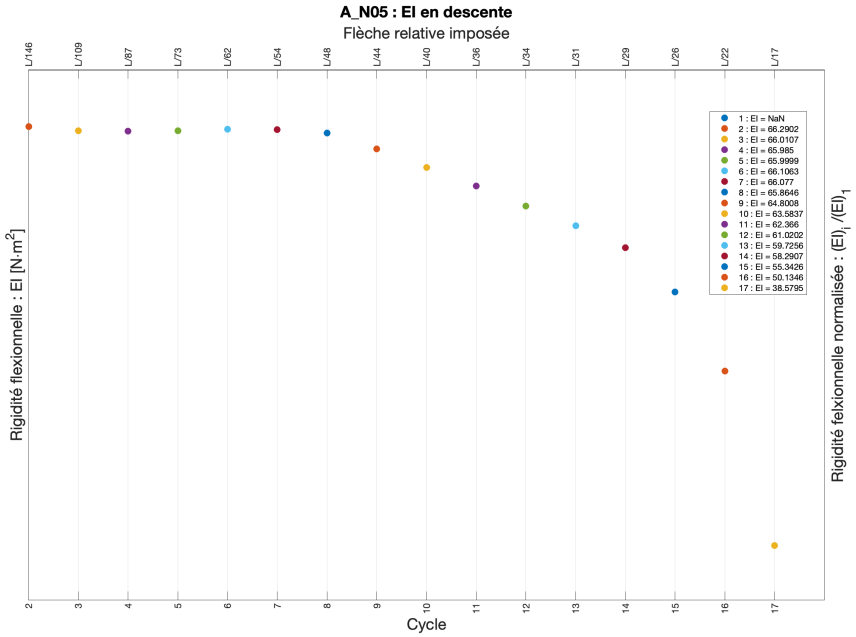


FIGURE M.34 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N05 de la batterie 1

Fonction S

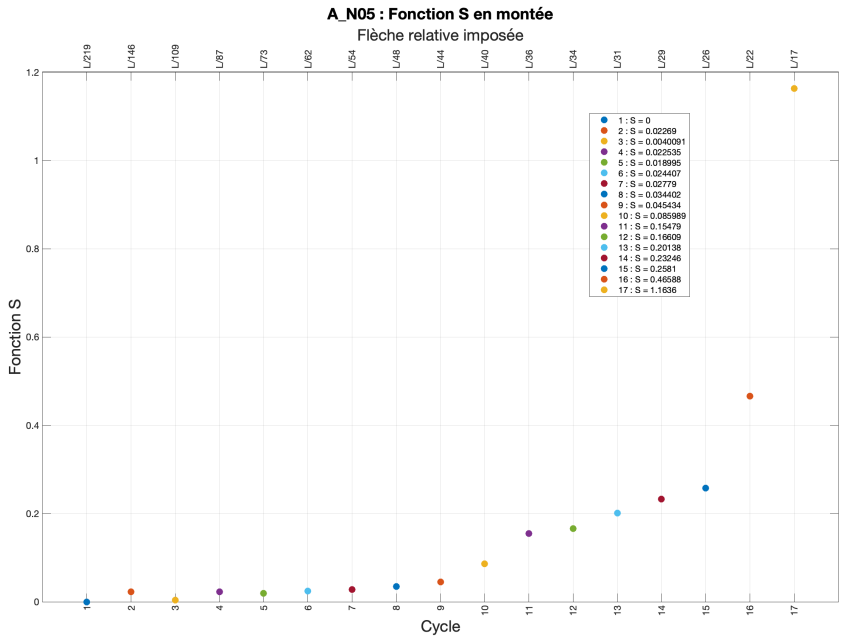


Figure M.35 – Fonction S en montée de l'éprouvette N05 de la batterie 1

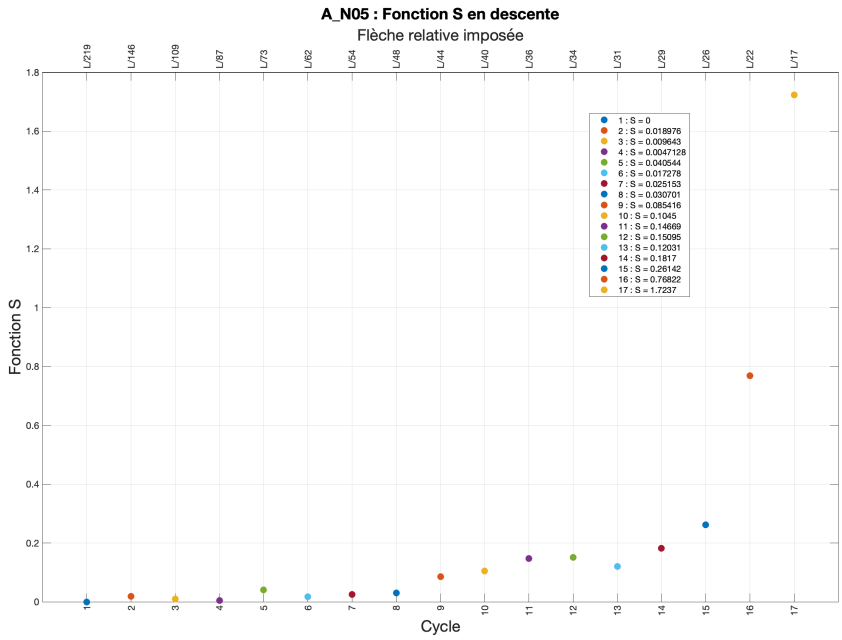


Figure M.36 – Fonction S en descente de l'éprouvette N05 de la batterie 1

Éprouvette N06

Global

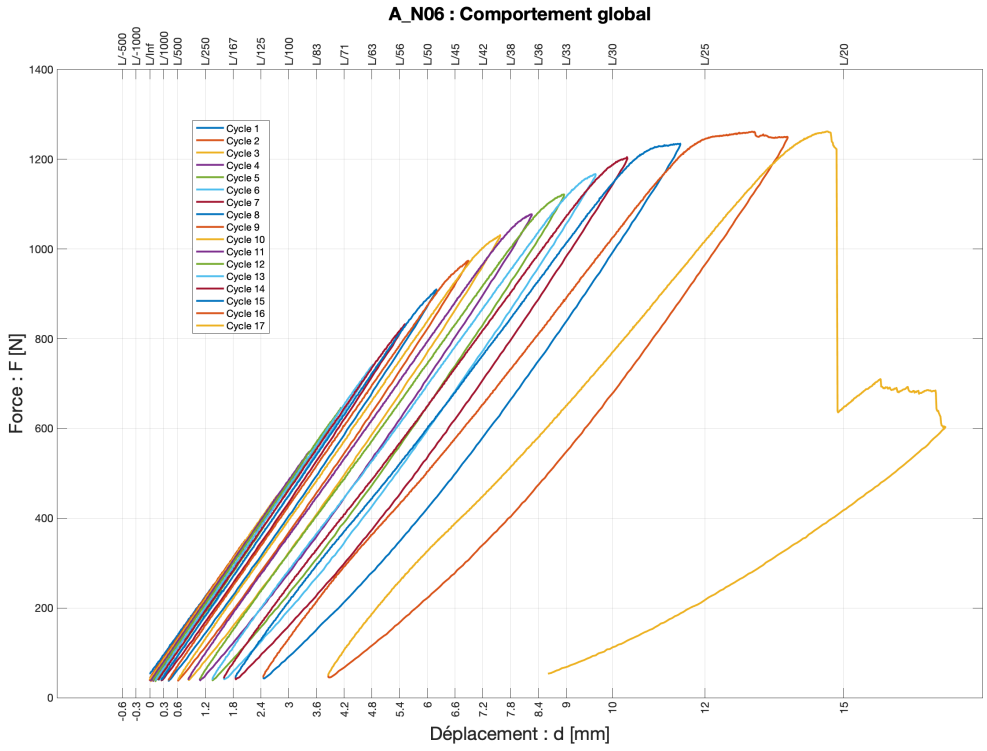


FIGURE M.37 – Comportement global de l'éprouvette N06 de la batterie 1

Déplacement résiduel

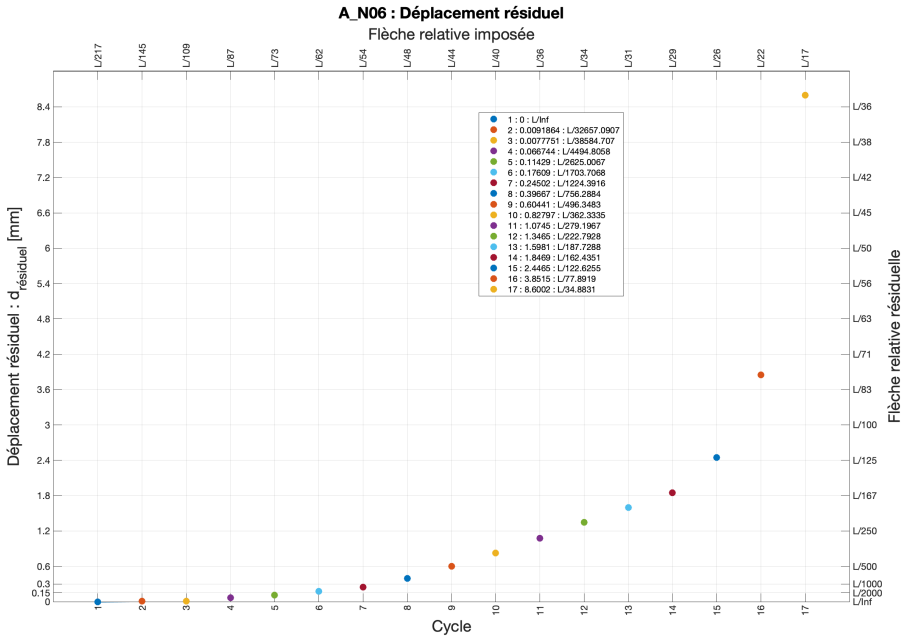


Figure M.38 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N06 de la batterie 1

Force maximale

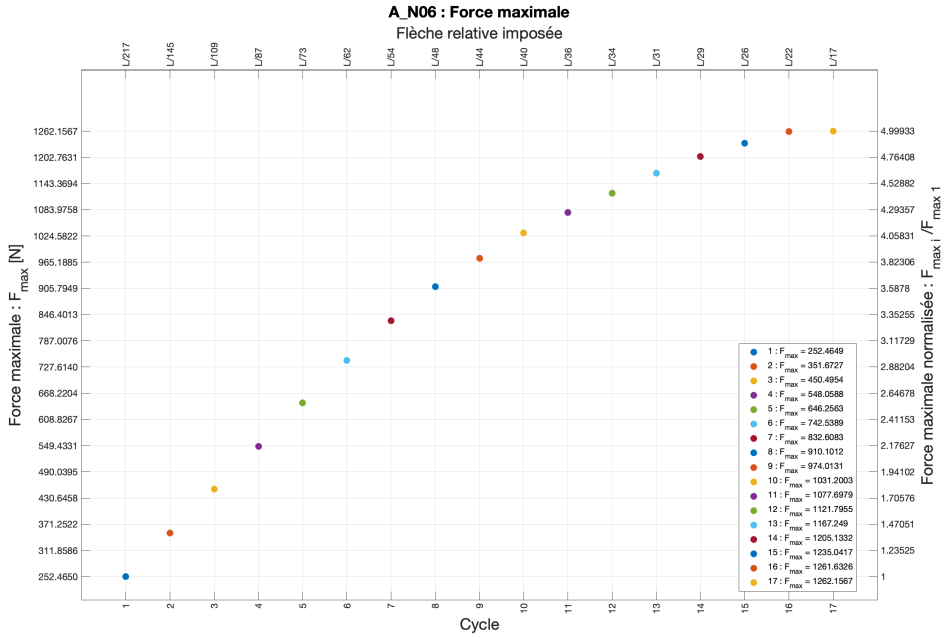


Figure M.39 – Force maximale de l'éprouvette N06 de la batterie 1

Module de Young

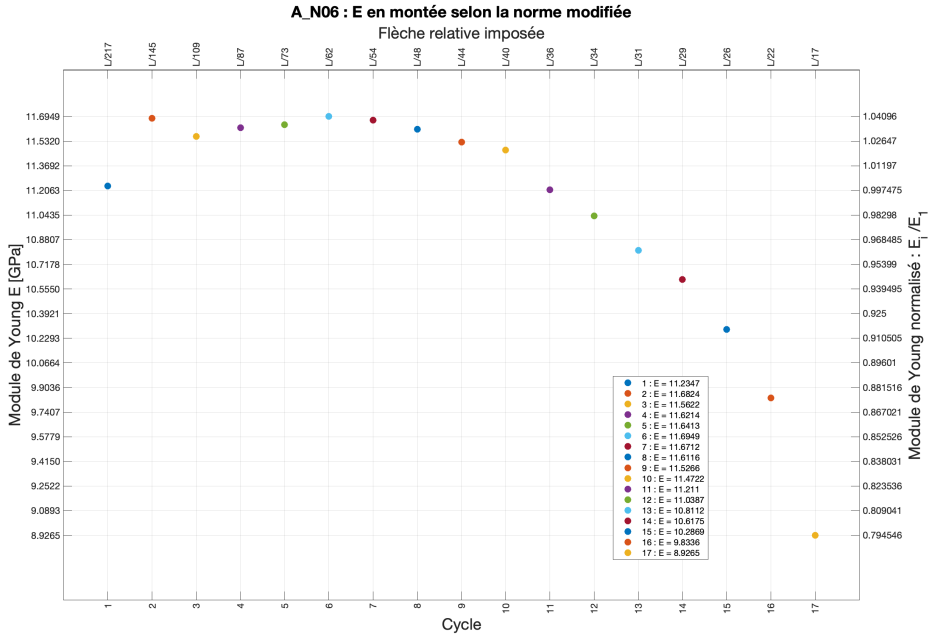


FIGURE M.40 – Module de Young en montée de l'éprouvette N06 de la batterie 1

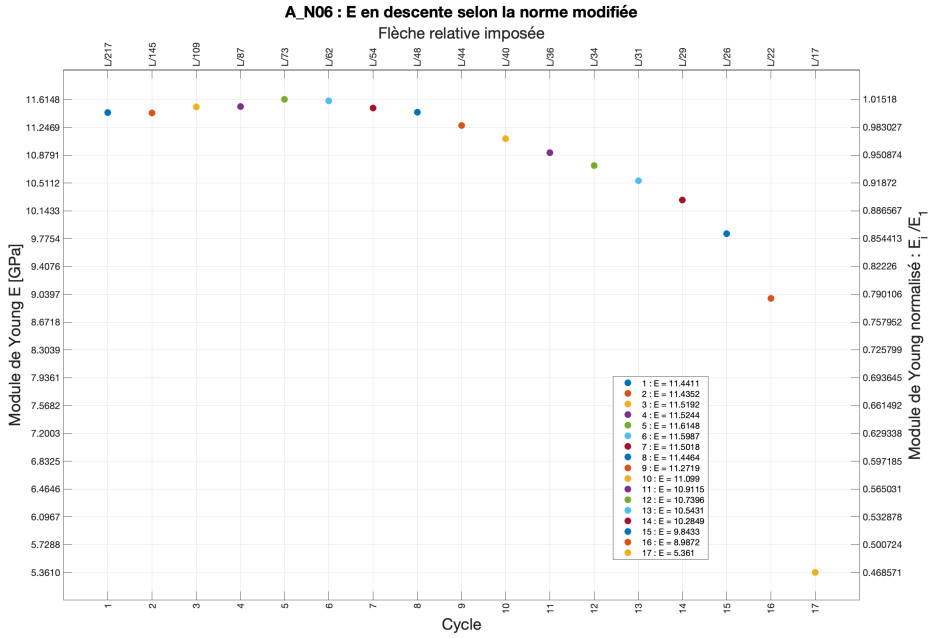


FIGURE M.41 – Module de Young en descente de l'éprouvette N06 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

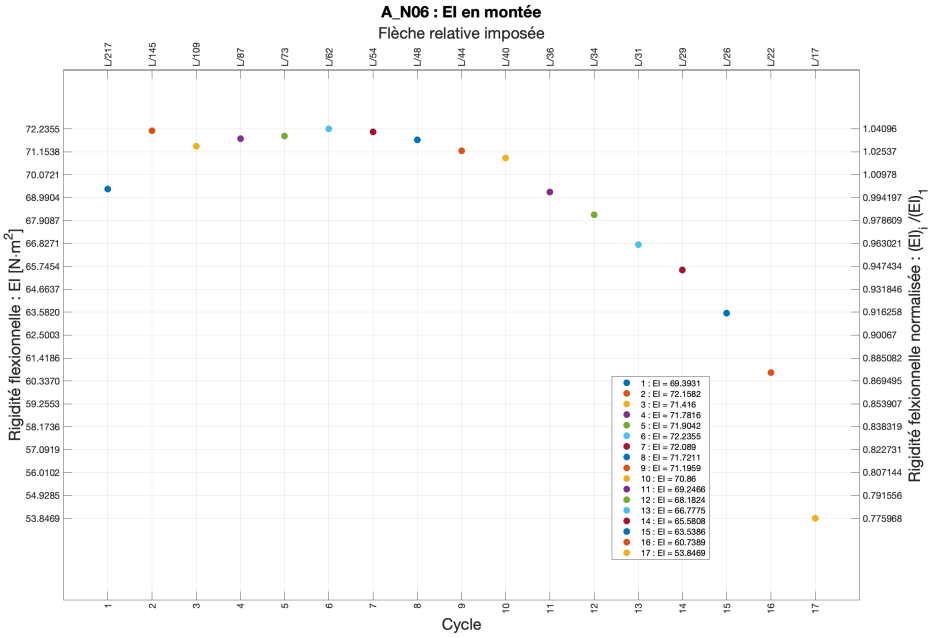


Figure M.42 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N06 de la batterie 1

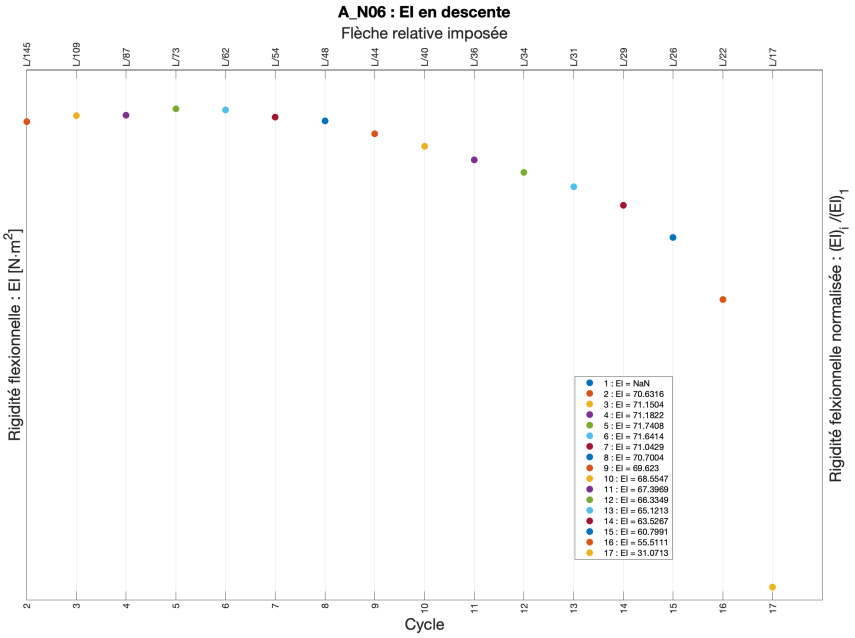


Figure M.43 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N06 de la batterie 1

Fonction S

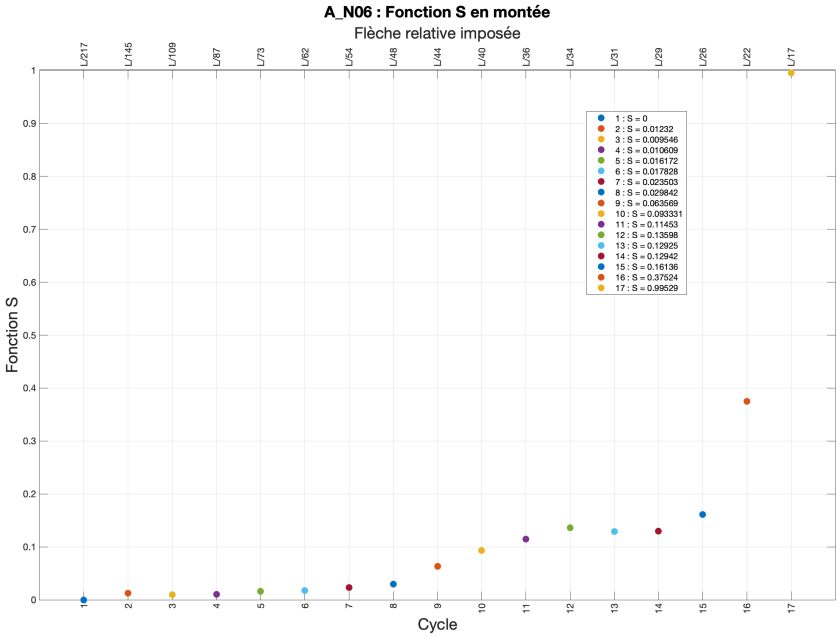


FIGURE M.44 – Fonction S en montée de l'éprouvette N06 de la batterie 1

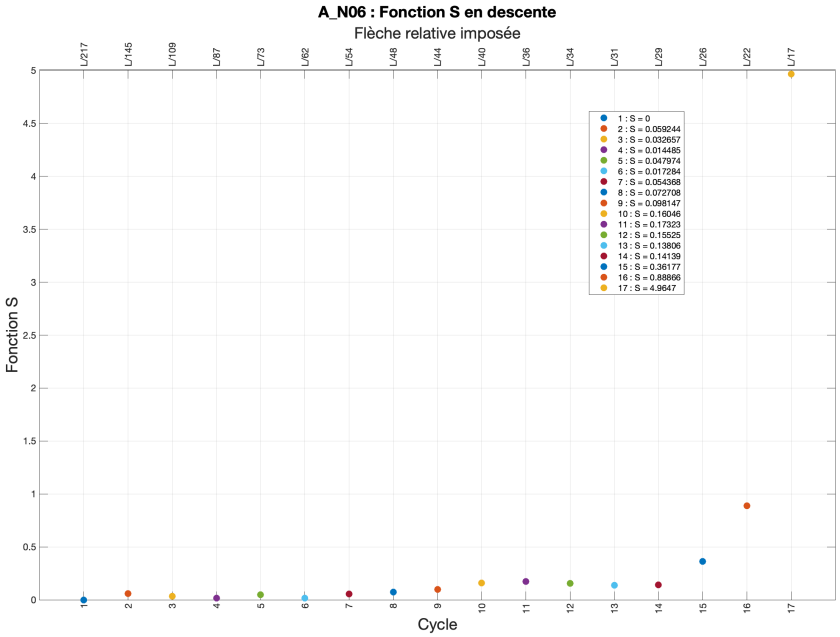


FIGURE M.45 – Fonction S en descente de l'éprouvette N06 de la batterie 1

Éprouvette N07

Global

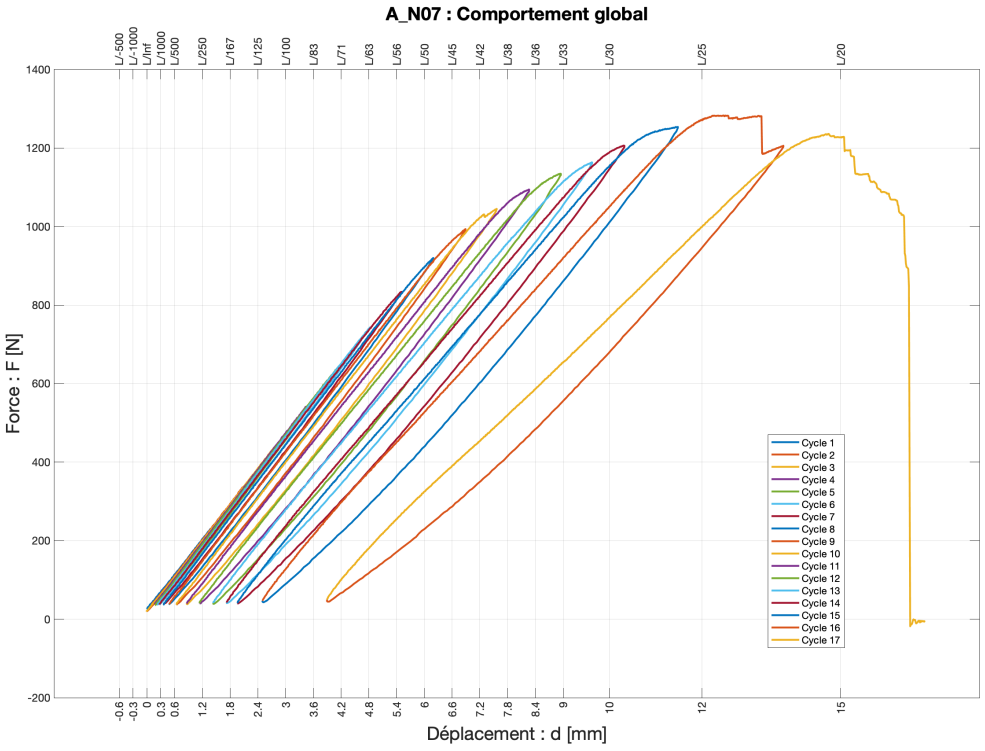


Figure M.46 – Comportement global de l'éprouvette N07 de la batterie 1

Déplacement résiduel

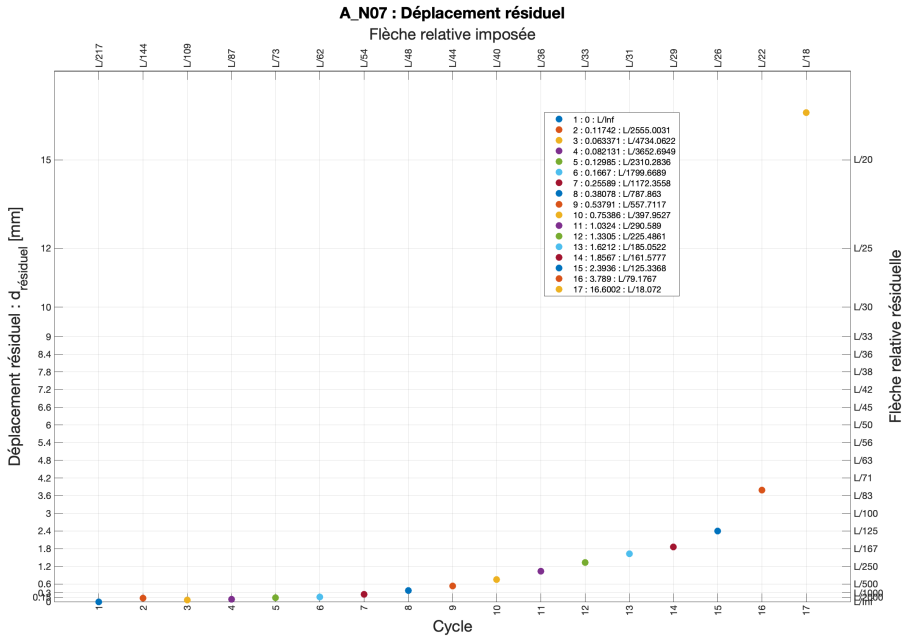


FIGURE M.47 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N07 de la batterie 1

Force maximale

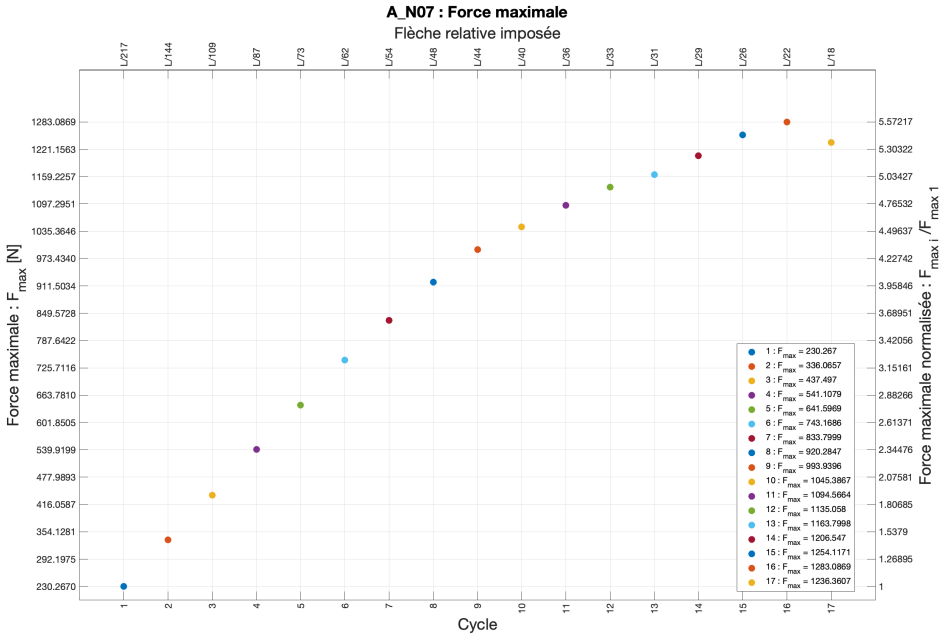


FIGURE M.48 – Force maximale de l'éprouvette N07 de la batterie 1

Module de Young

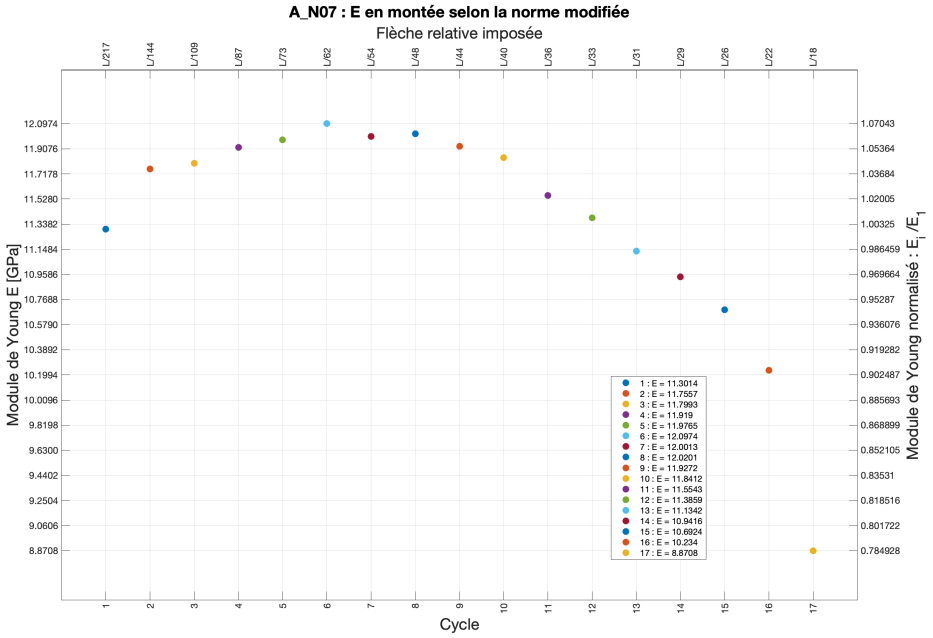


Figure M.49 – Module de Young en montée de l'éprouvette N07 de la batterie 1

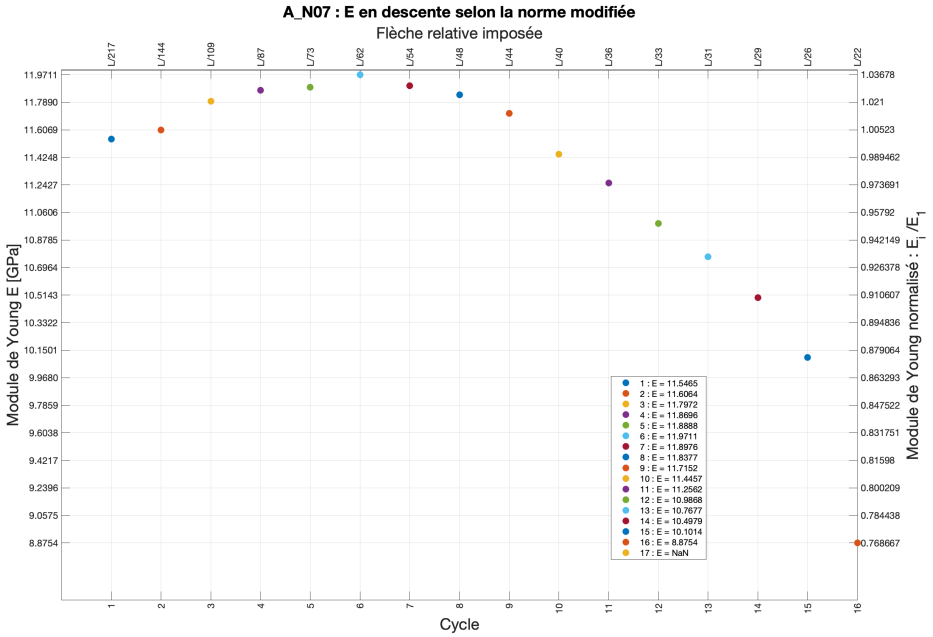


Figure M.50 – Module de Young en descente de l'éprouvette N07 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

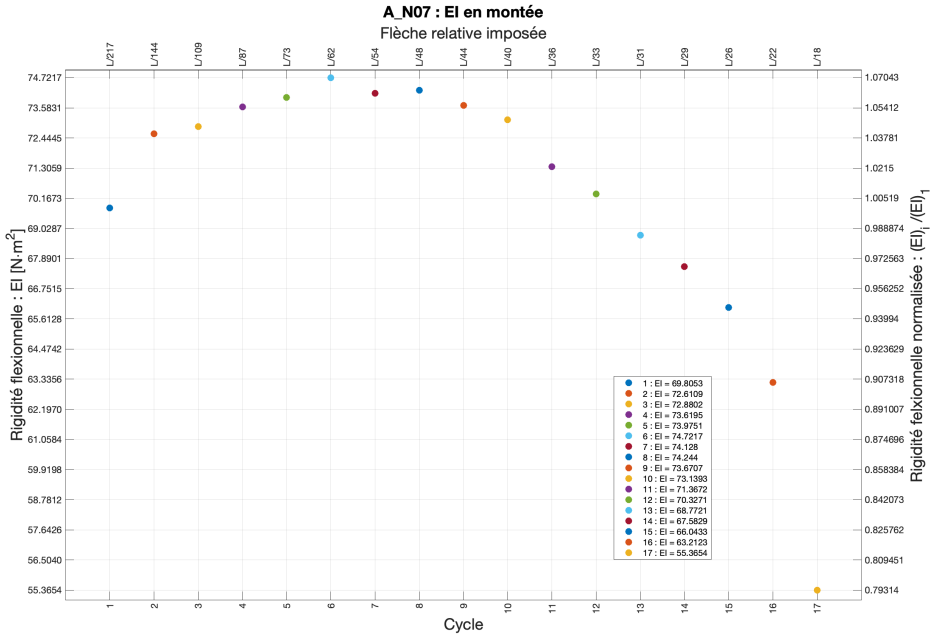


FIGURE M.51 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N07 de la batterie 1

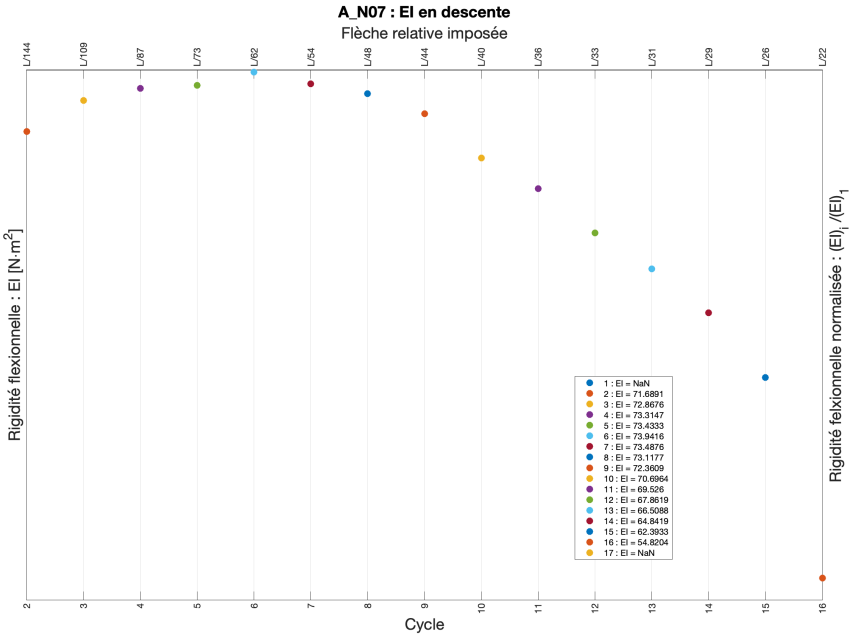


FIGURE M.52 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N07 de la batterie 1

Fonction S

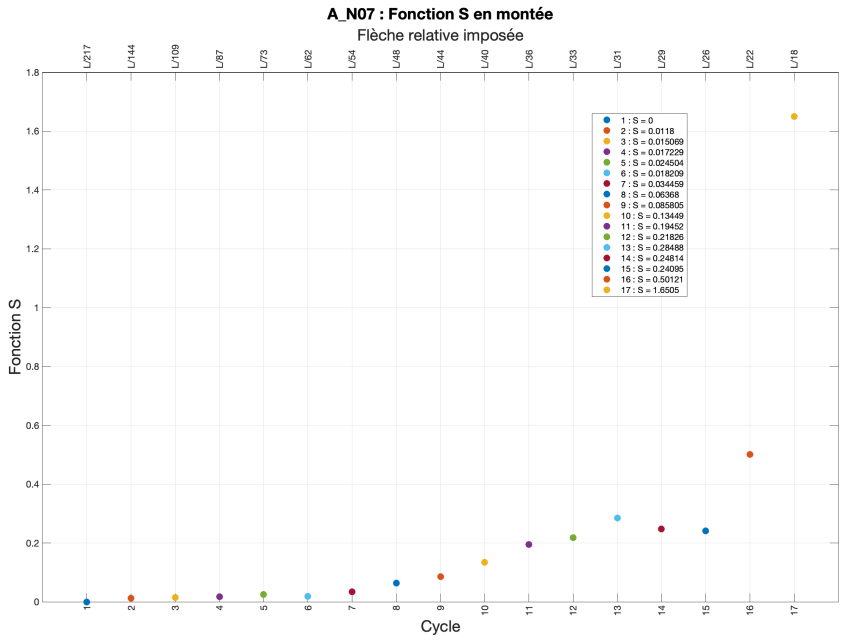


Figure M.53 – Fonction S en montée de l'éprouvette N07 de la batterie 1

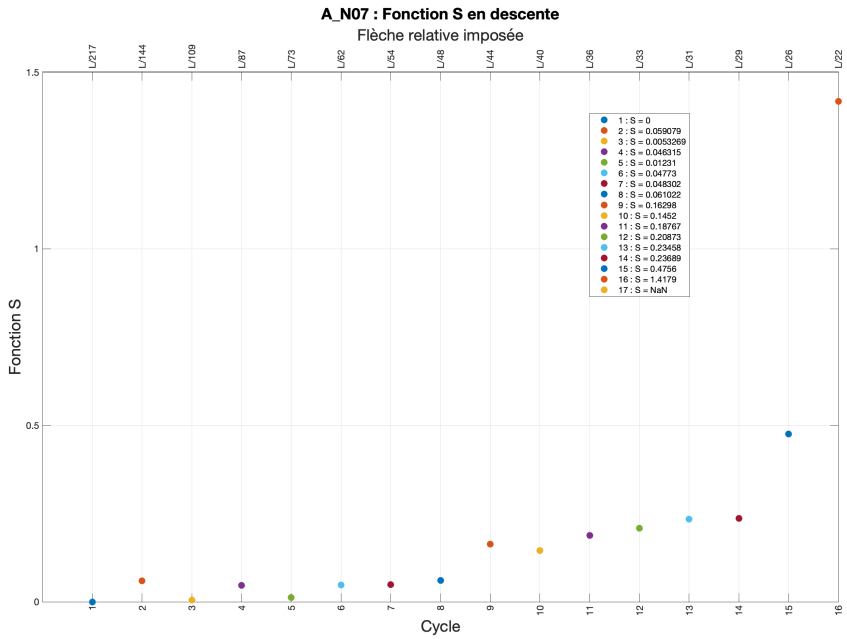


Figure M.54 – Fonction S en descente de l'éprouvette N07 de la batterie 1

Éprouvette N08

Global

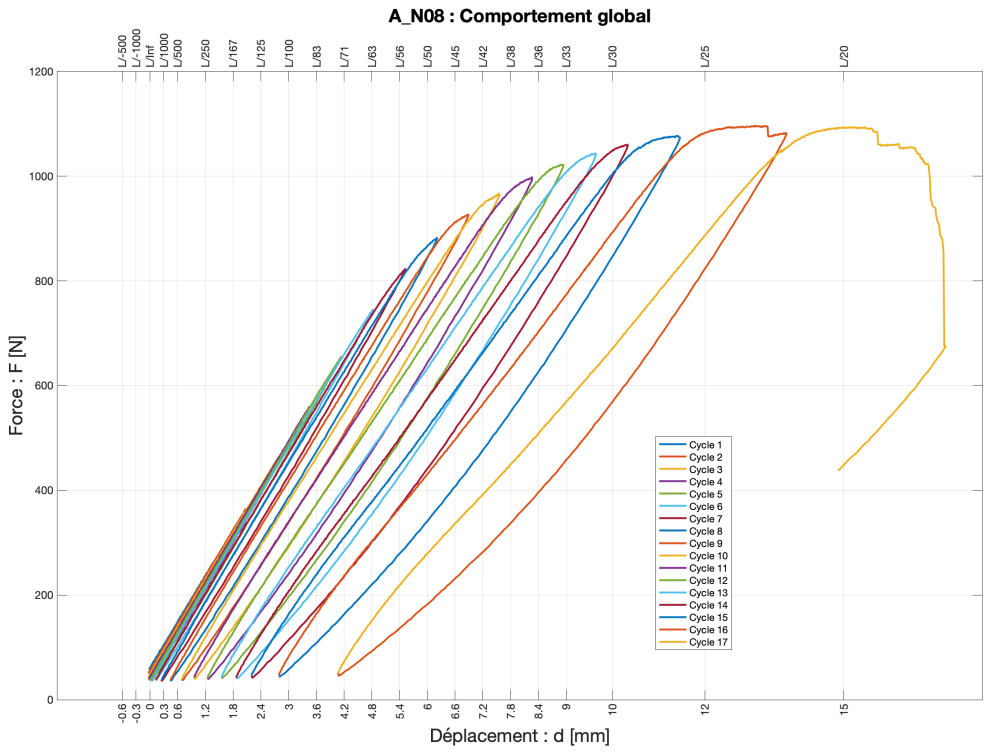


FIGURE M.55 – Comportement global de l'éprouvette N08 de la batterie 1

Déplacement résiduel

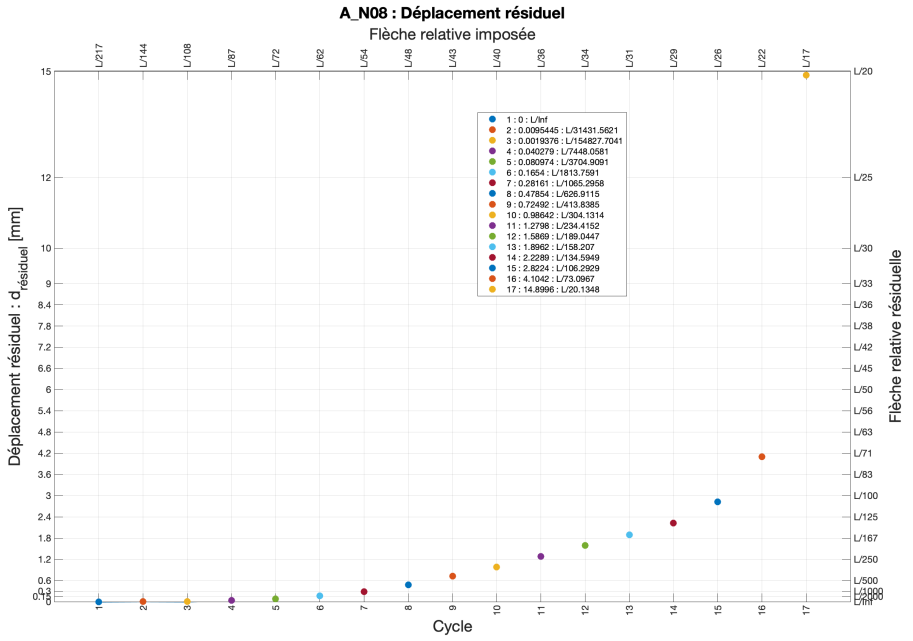


Figure M.56 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N08 de la batterie 1

Force maximale

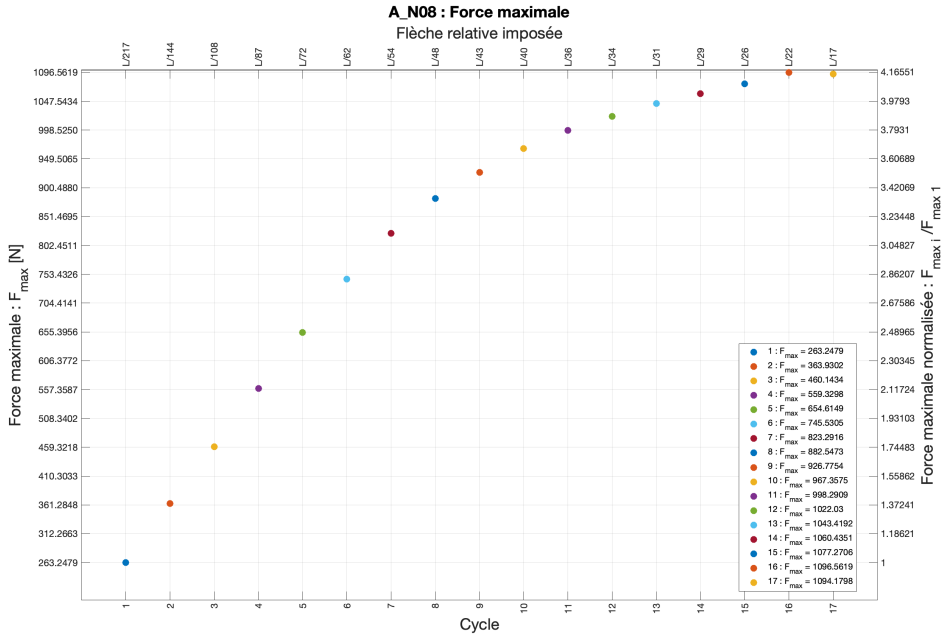


Figure M.57 – Force maximale de l'éprouvette N08 de la batterie 1

Module de Young

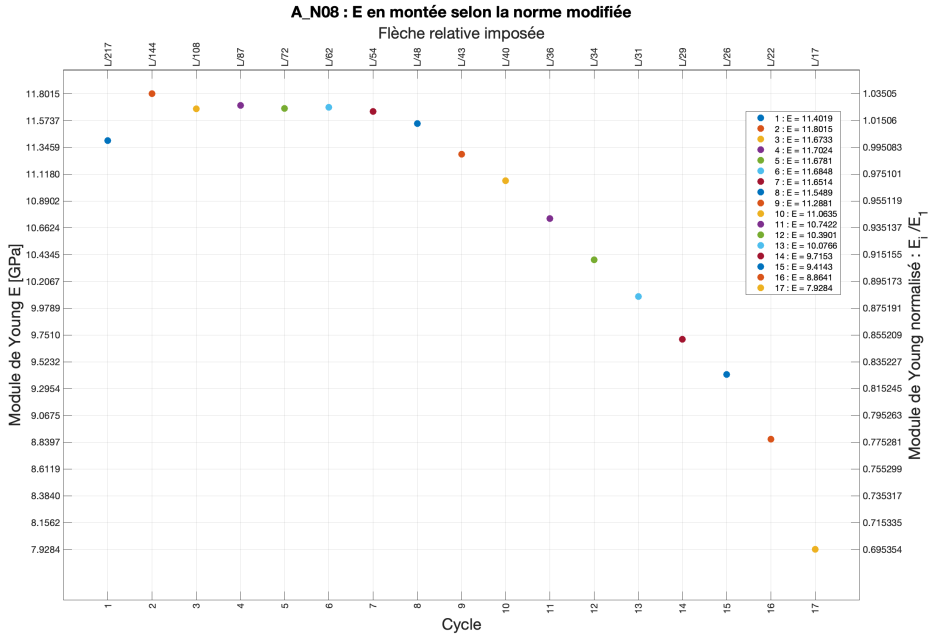


FIGURE M.58 – Module de Young en montée de l'éprouvette N08 de la batterie 1

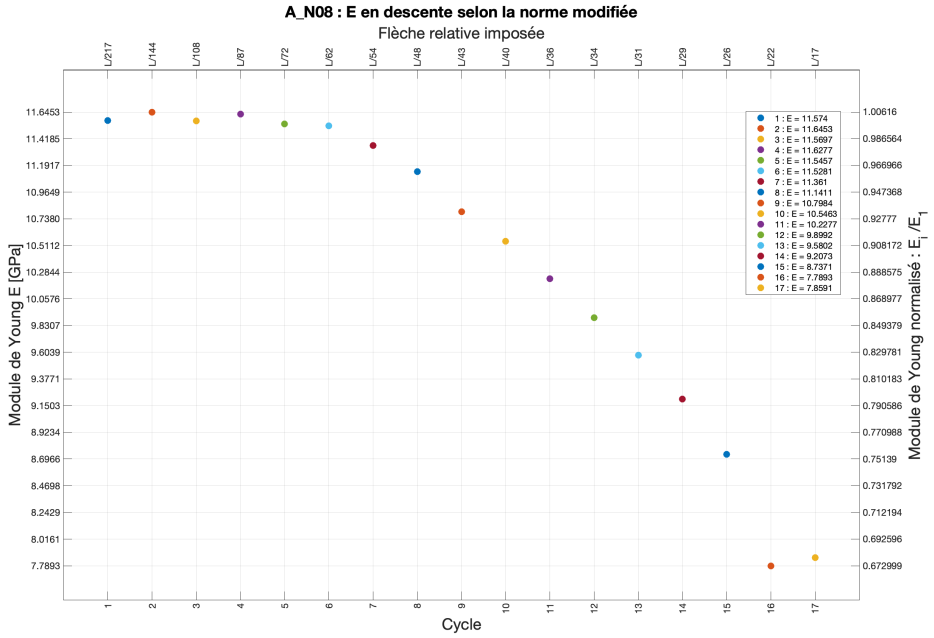


FIGURE M.59 – Module de Young en descente de l'éprouvette N08 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

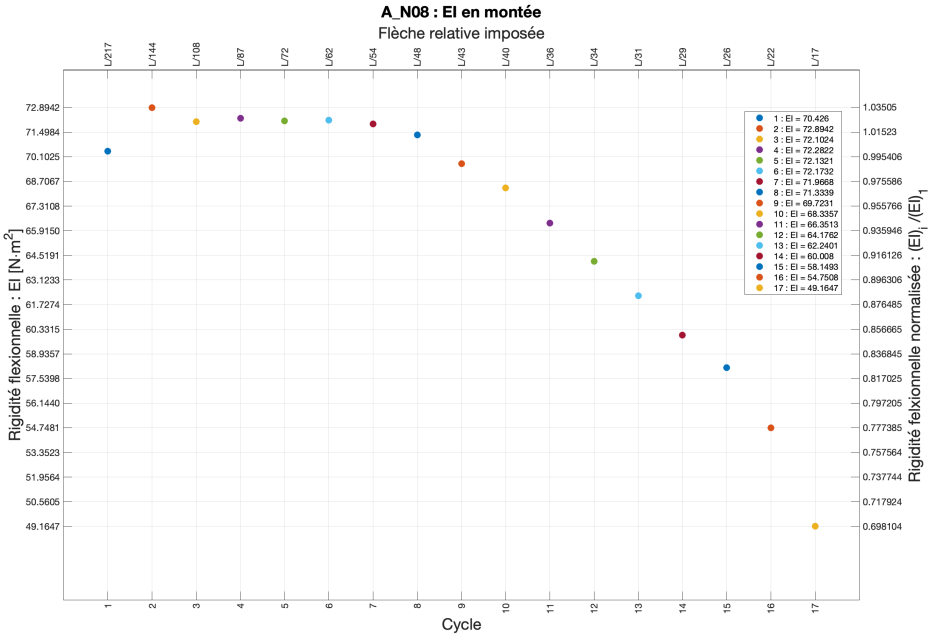


Figure M.60 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N08 de la batterie 1

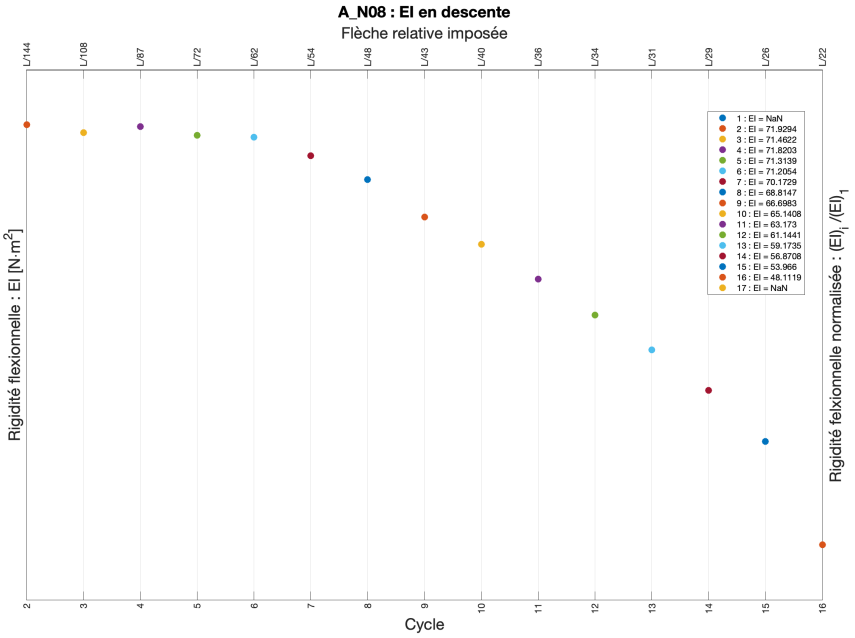


Figure M.61 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N08 de la batterie 1

Fonction S

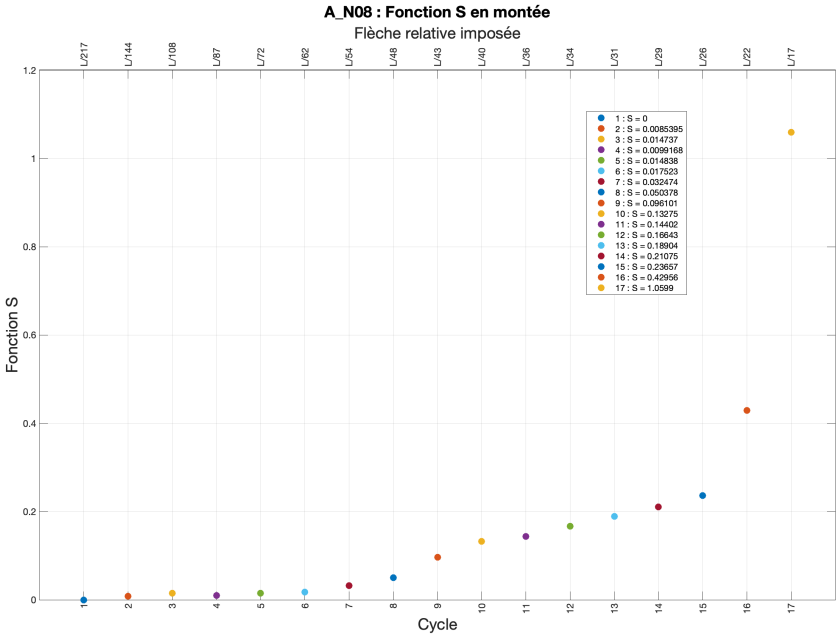


FIGURE M.62 – Fonction S en montée de l'éprouvette N08 de la batterie 1

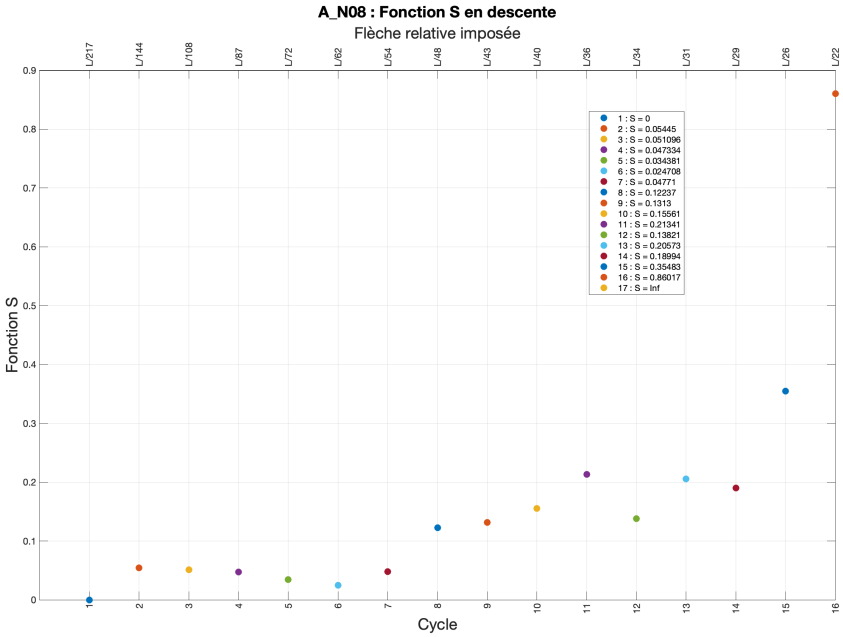


FIGURE M.63 – Fonction S en descente de l'éprouvette N08 de la batterie 1

Éprouvette N09

Global

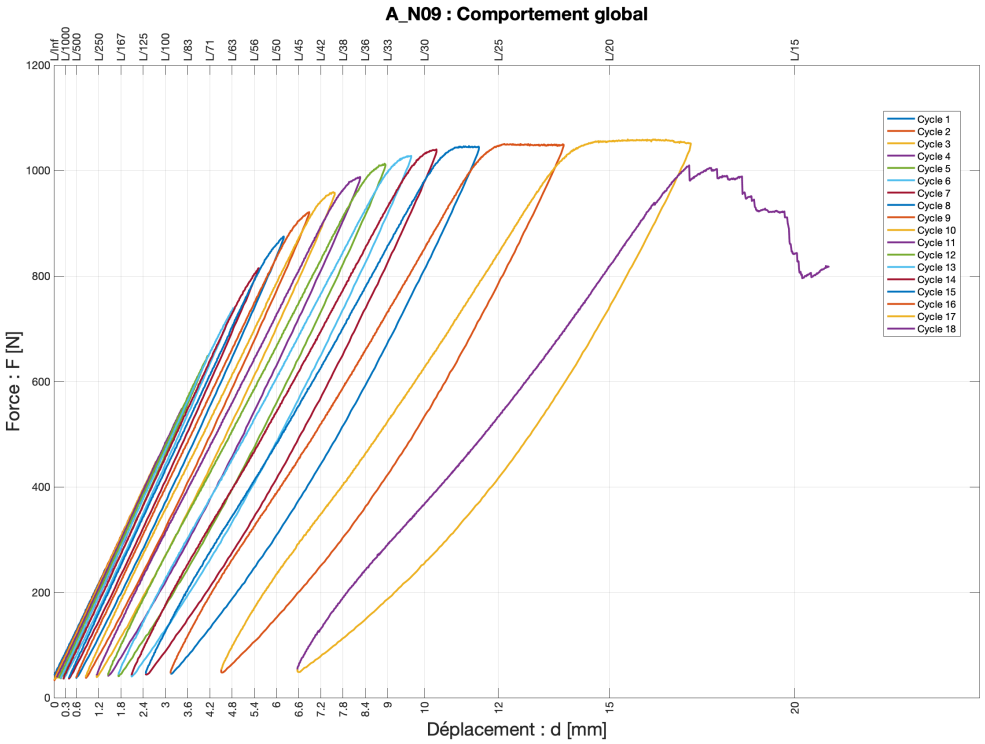


Figure M.64 – Comportement global de l'éprouvette N09 de la batterie 1

Déplacement résiduel

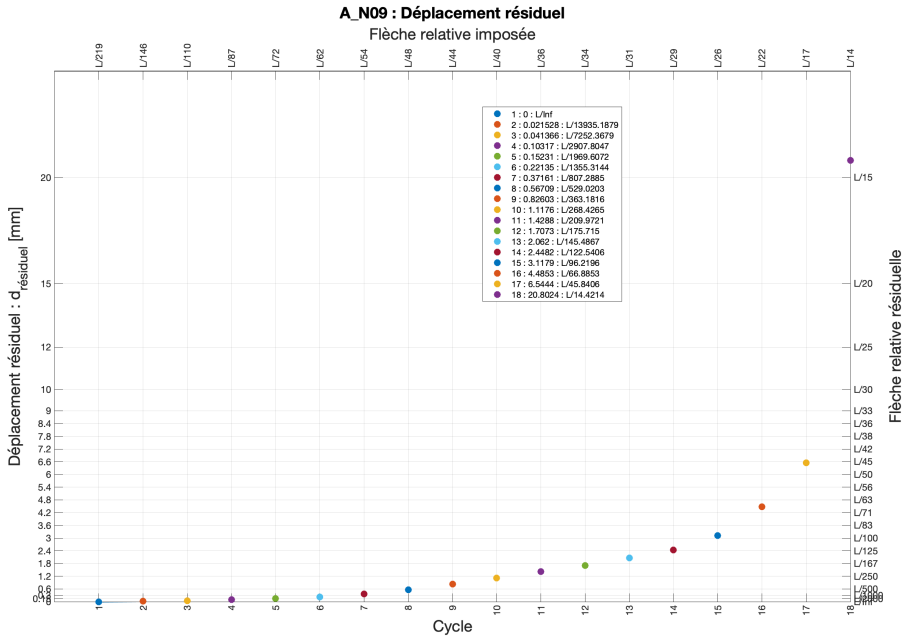


FIGURE M.65 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N09 de la batterie 1

Force maximale

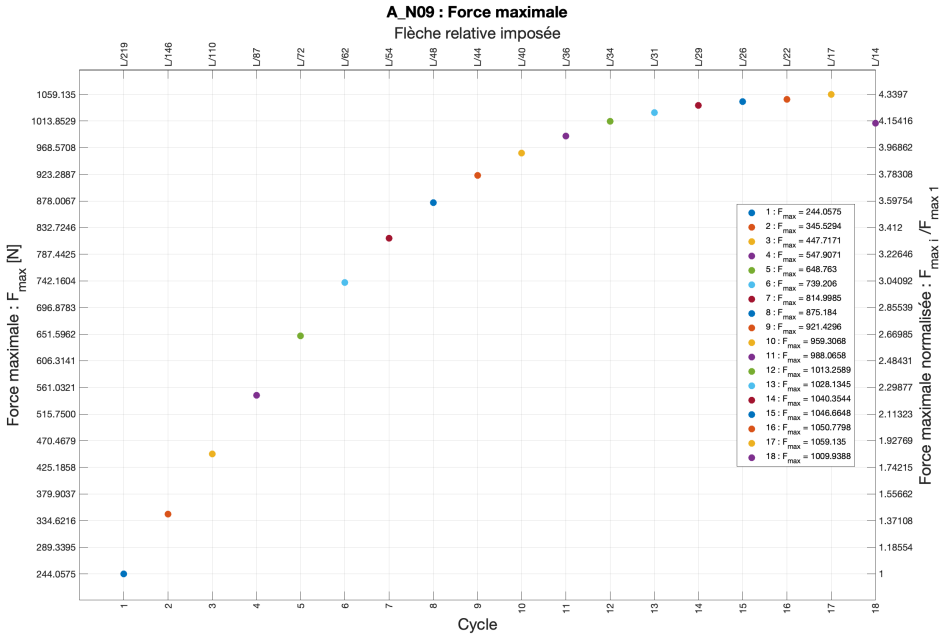


FIGURE M.66 – Force maximale de l'éprouvette N09 de la batterie 1

Module de Young

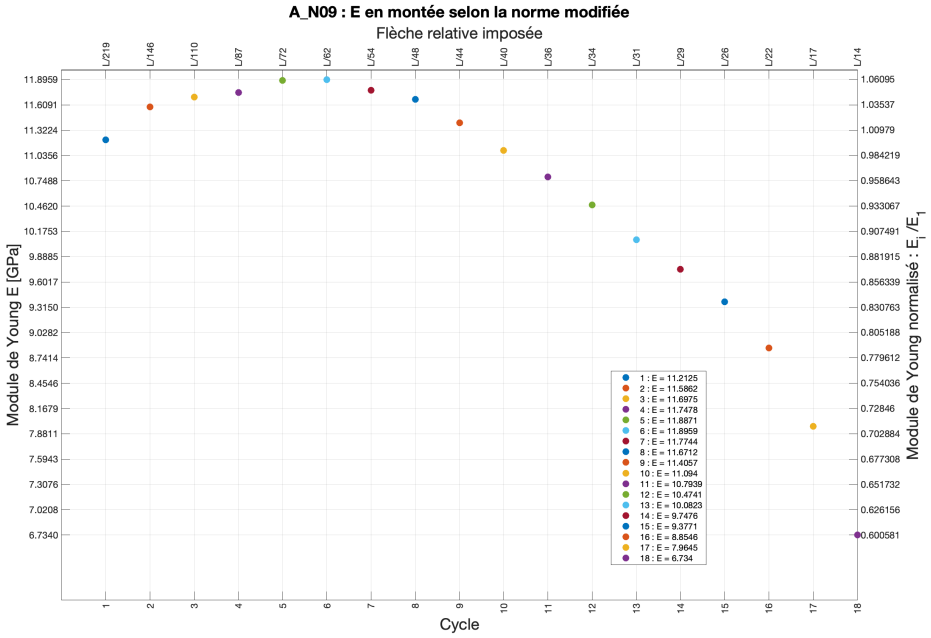


Figure M.67 – Module de Young en montée de l'éprouvette N09 de la batterie 1

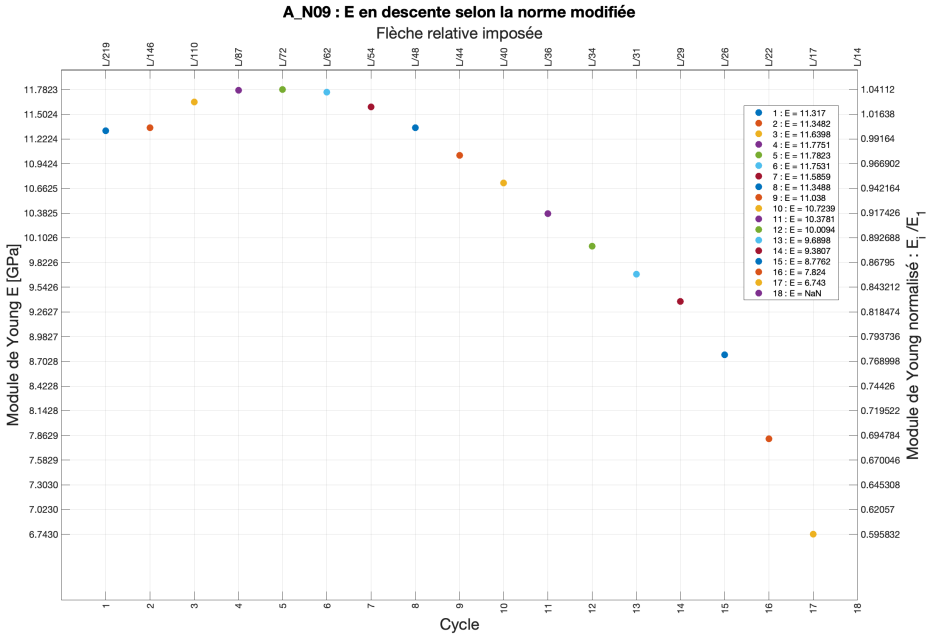


Figure M.68 – Module de Young en descente de l'éprouvette N09 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

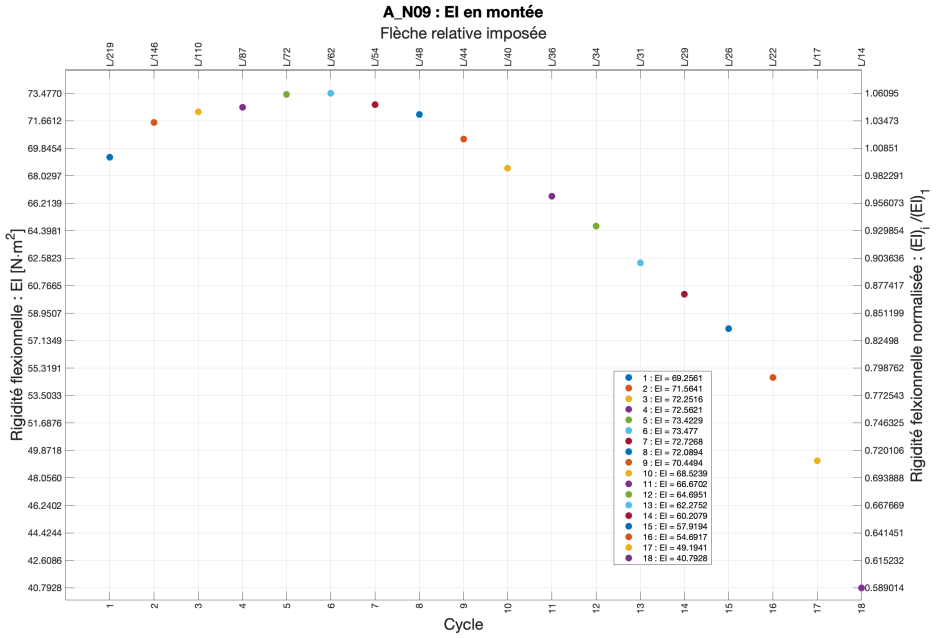


FIGURE M.69 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N09 de la batterie 1

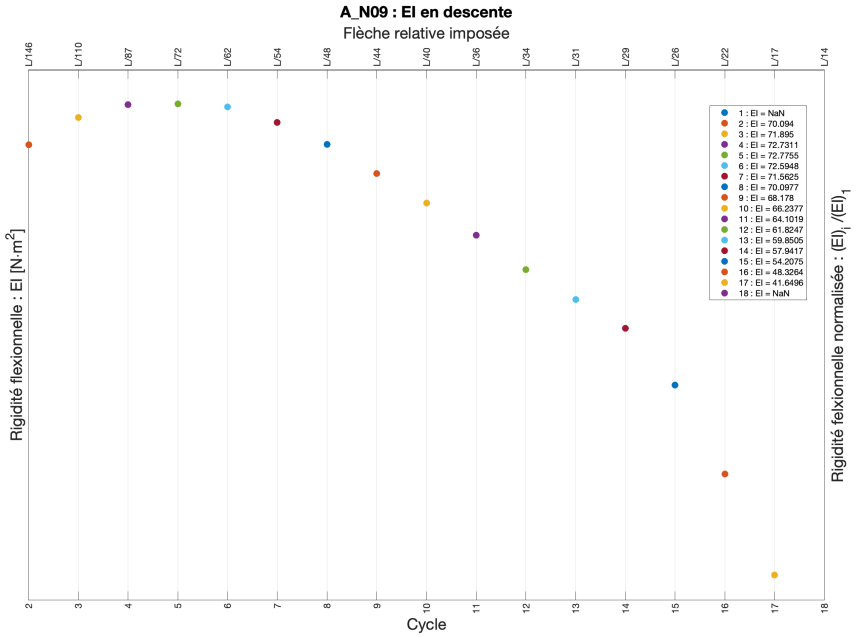


FIGURE M.70 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N09 de la batterie 1

Fonction S

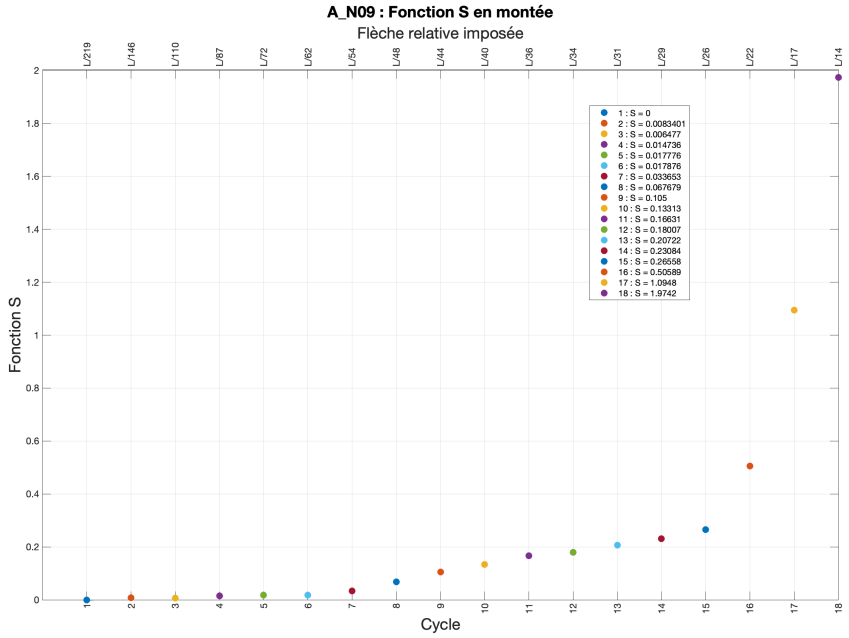


Figure M.71 – Fonction S en montée de l'éprouvette N09 de la batterie 1

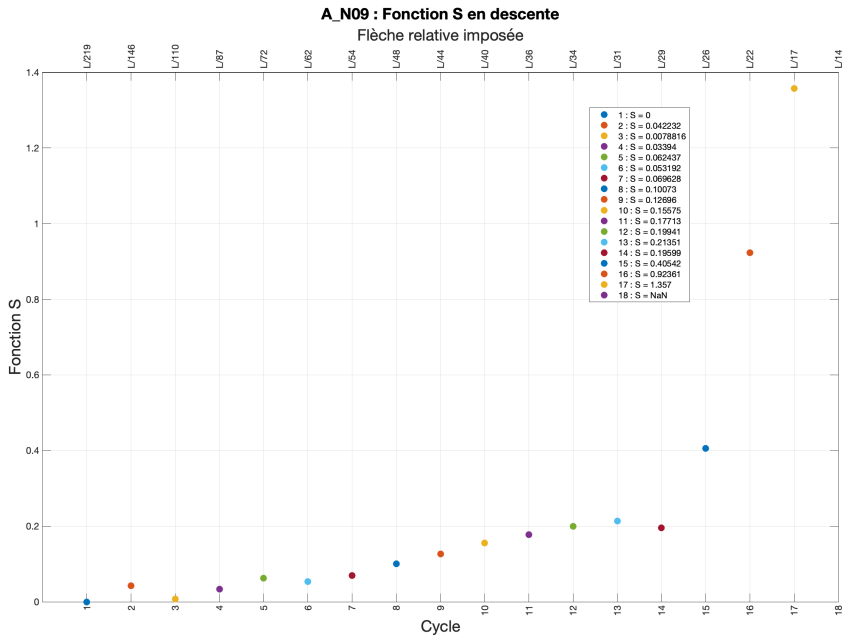


Figure M.72 – Fonction S en descente de l'éprouvette N09 de la batterie 1

Éprouvette N10

Global

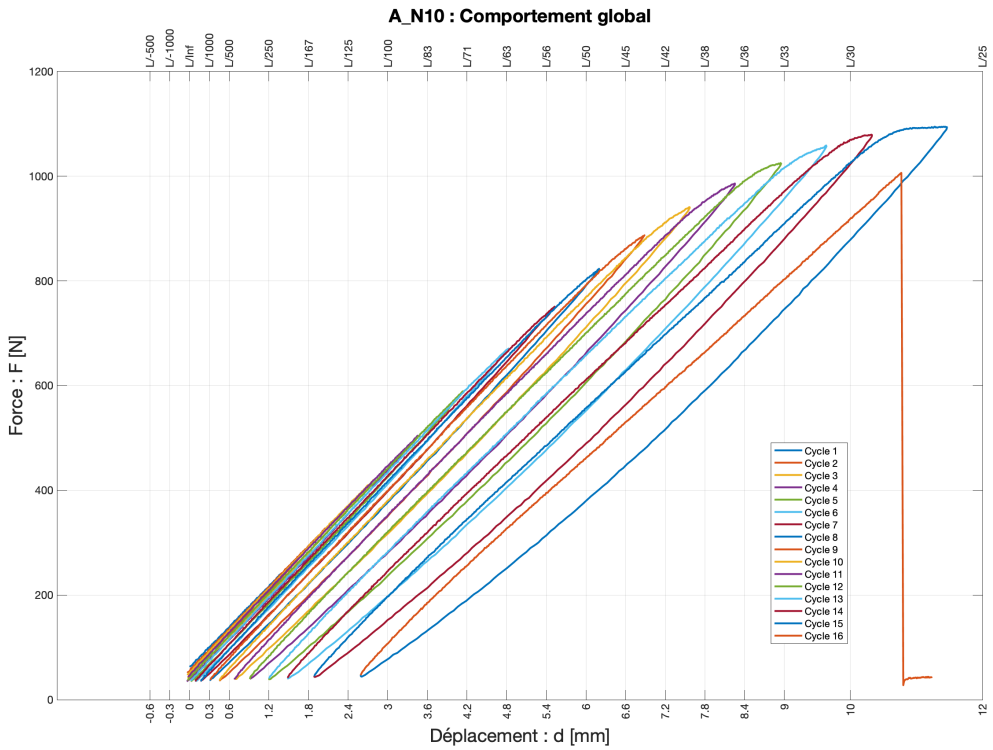


FIGURE M.73 – Comportement global de l'éprouvette N10 de la batterie 1

Déplacement résiduel

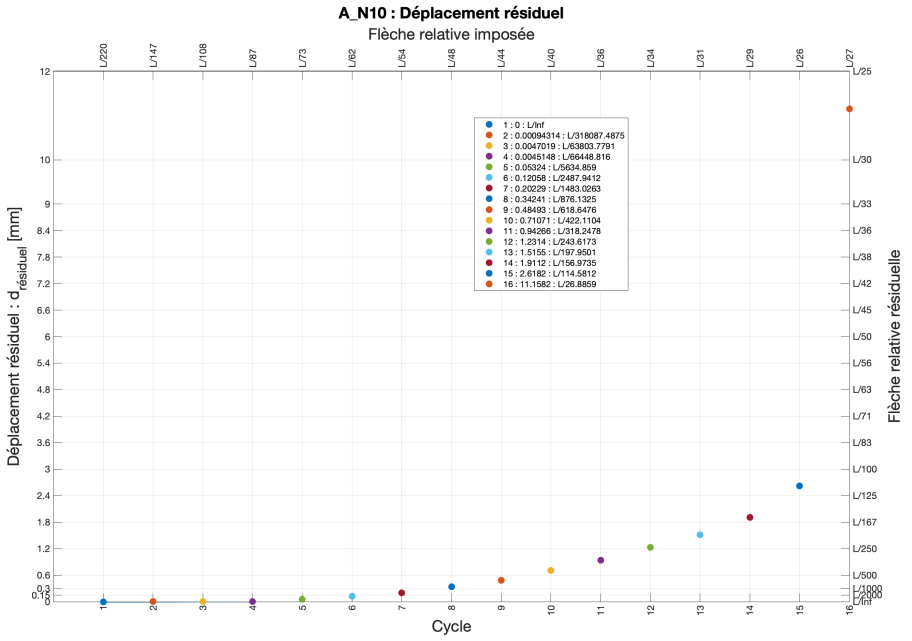


Figure M.74 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N10 de la batterie 1

Force maximale

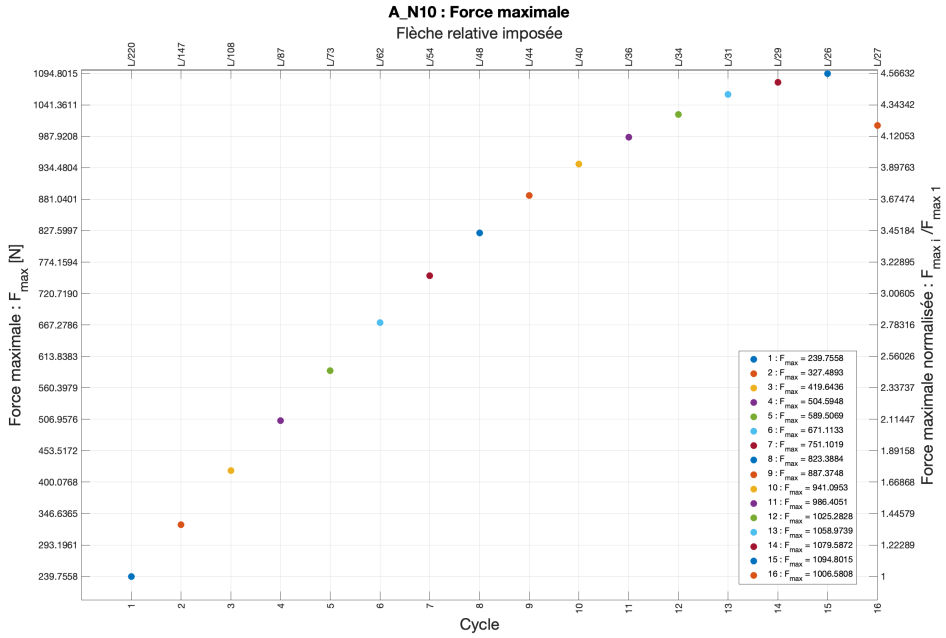


Figure M.75 – Force maximale de l'éprouvette N10 de la batterie 1

Module de Young

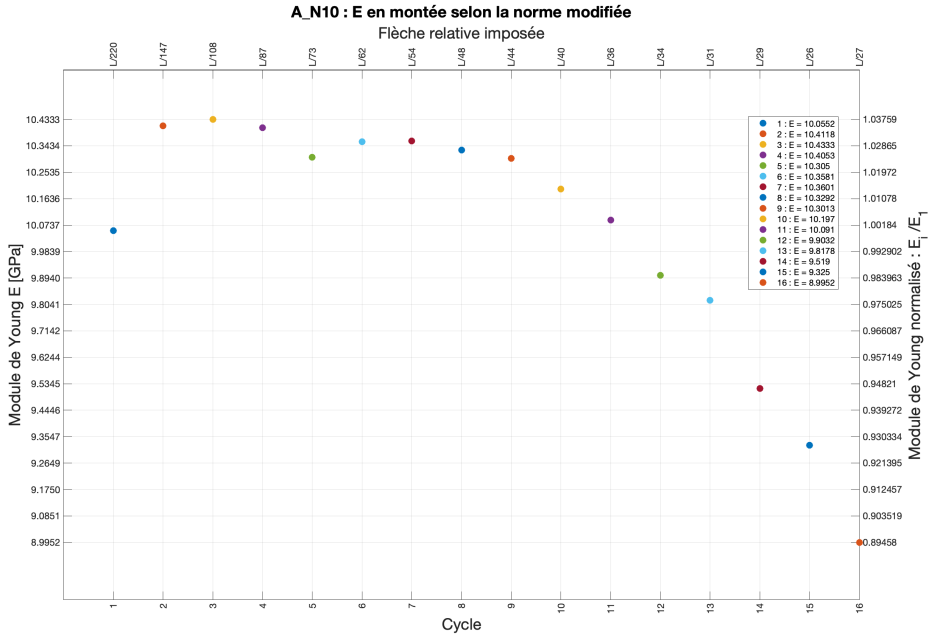


FIGURE M.76 – Module de Young en montée de l'éprouvette N10 de la batterie 1

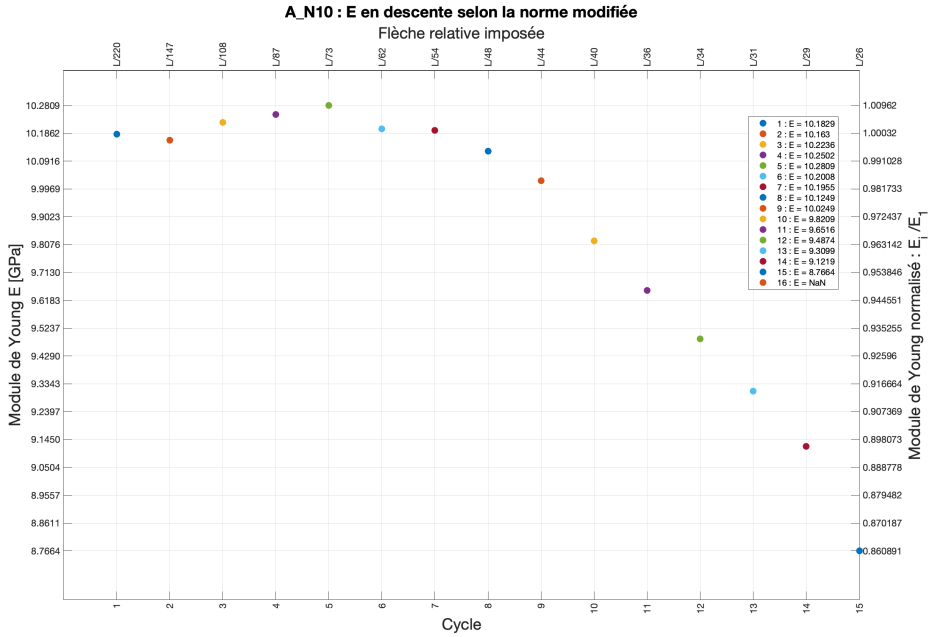


FIGURE M.77 – Module de Young en descente de l'éprouvette N10 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

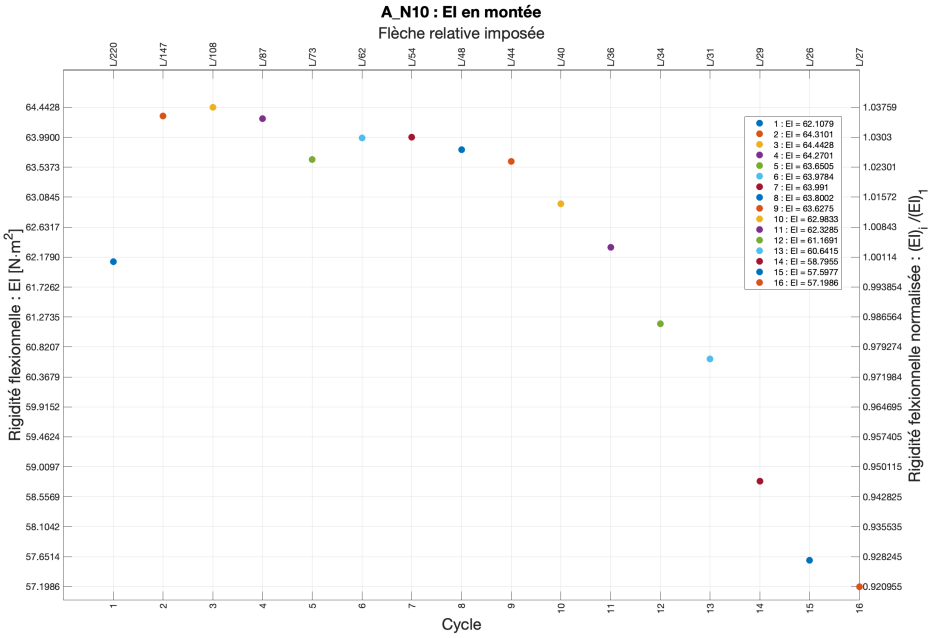


Figure M.78 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N10 de la batterie 1

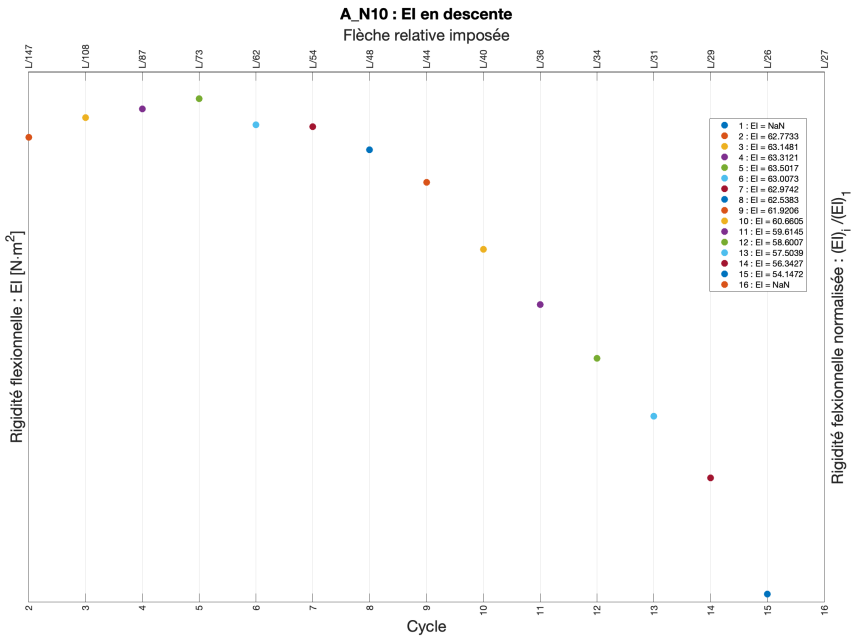


Figure M.79 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N10 de la batterie 1

Fonction S

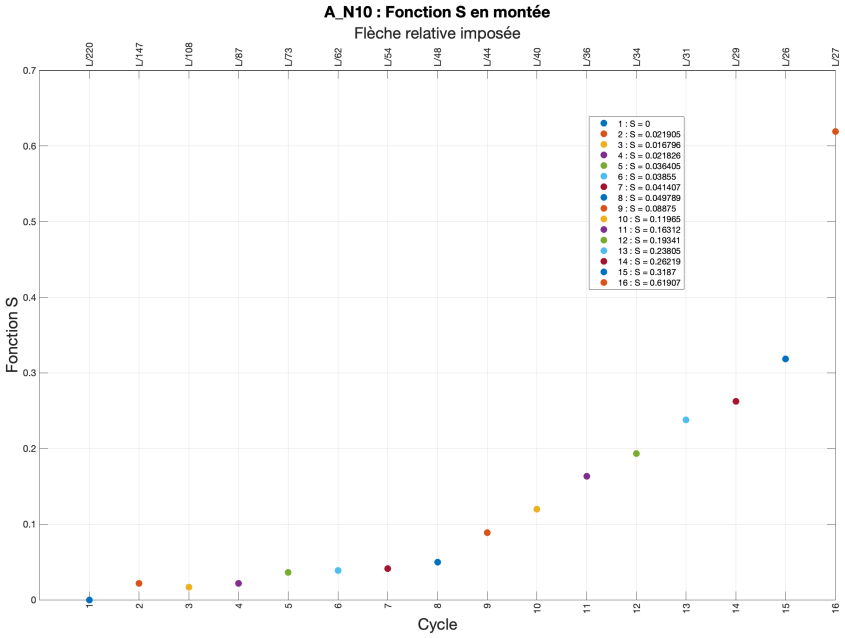


FIGURE M.80 – Fonction S en montée de l'éprouvette N10 de la batterie 1

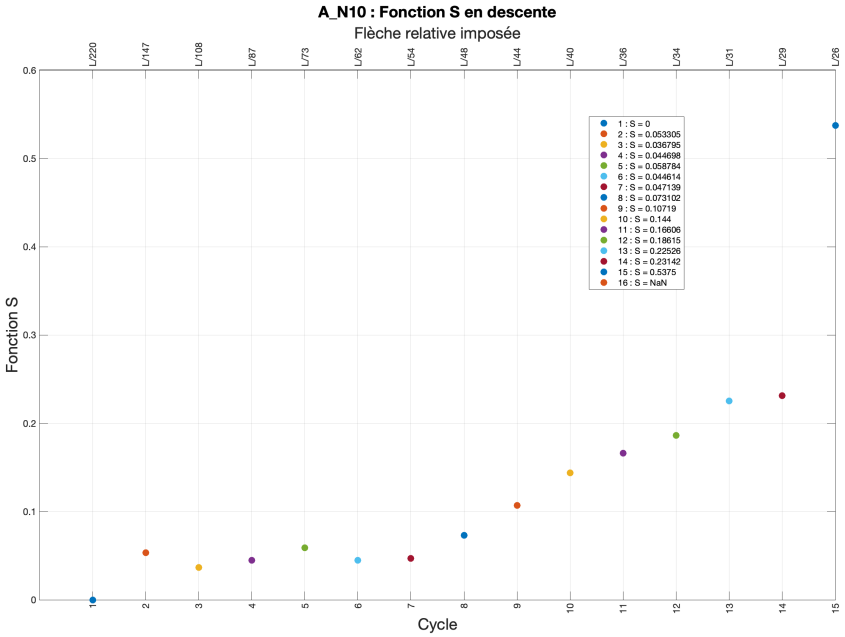


FIGURE M.81 – Fonction S en descente de l'éprouvette N10 de la batterie 1

Éprouvette N11

Global

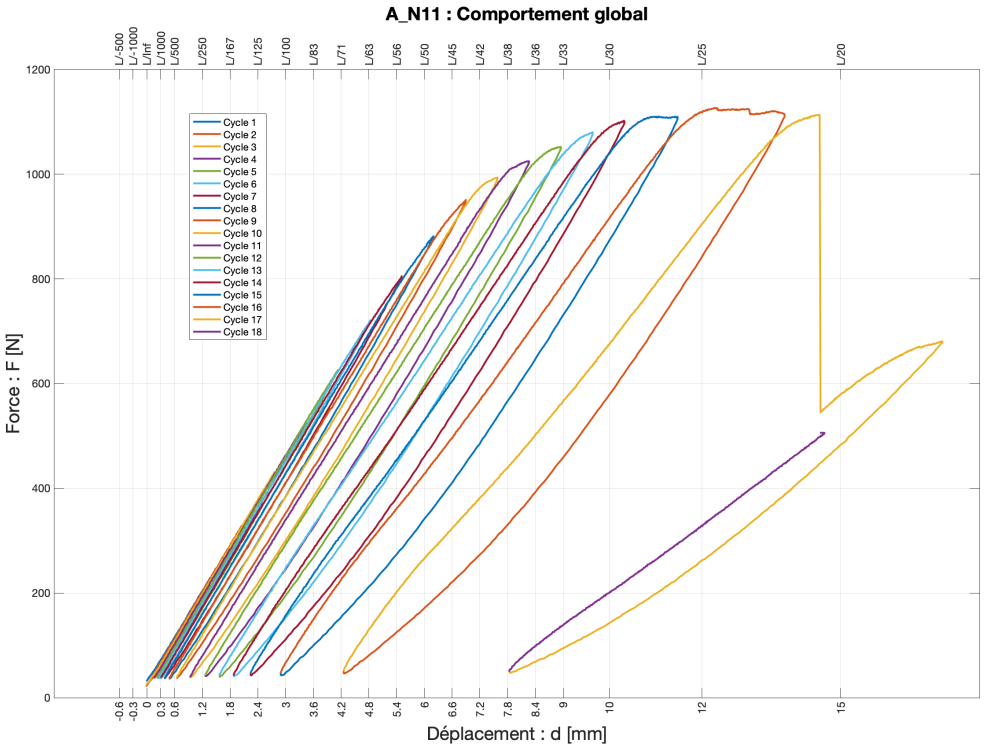


Figure M.82 – Comportement global de l'éprouvette N11 de la batterie 1

Déplacement résiduel

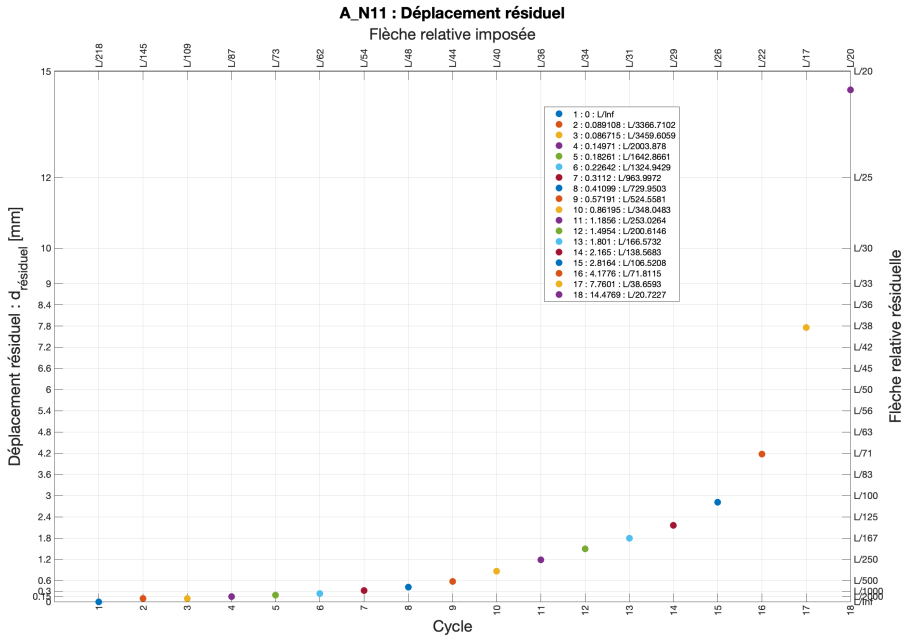


FIGURE M.83 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N11 de la batterie 1

Force maximale

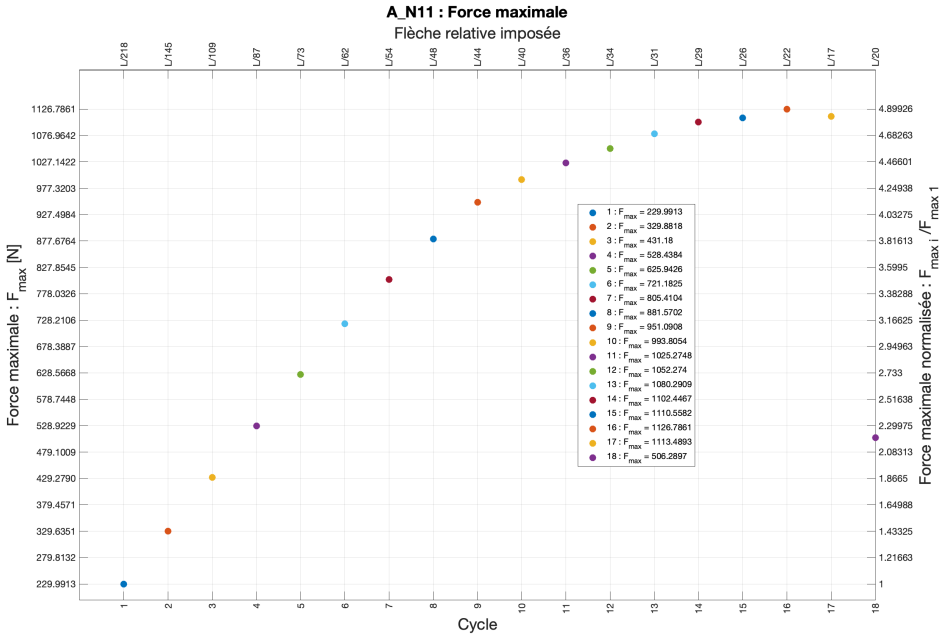


FIGURE M.84 – Force maximale de l'éprouvette N11 de la batterie 1

Module de Young

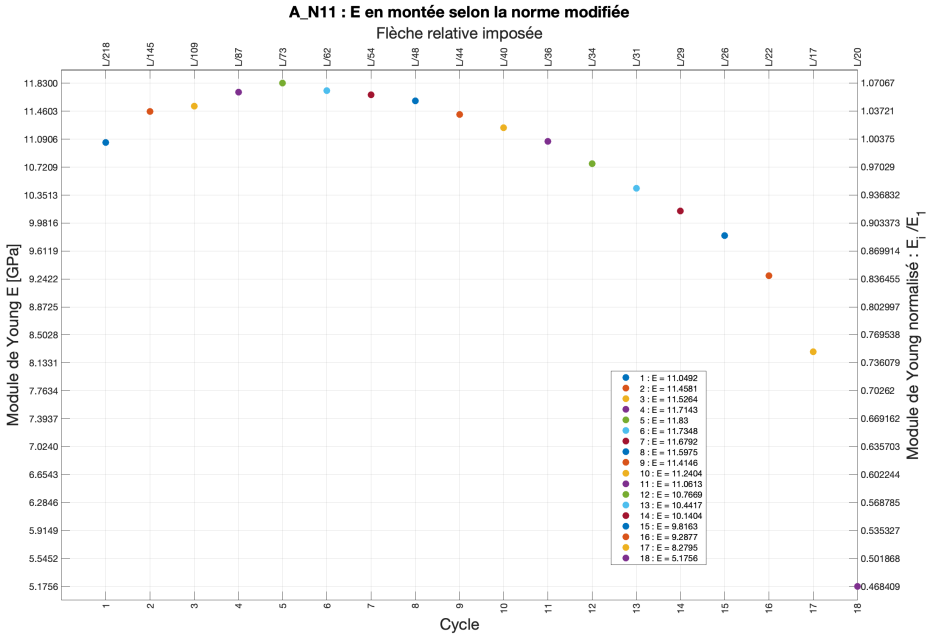


Figure M.85 – Module de Young en montée de l'éprouvette N11 de la batterie 1

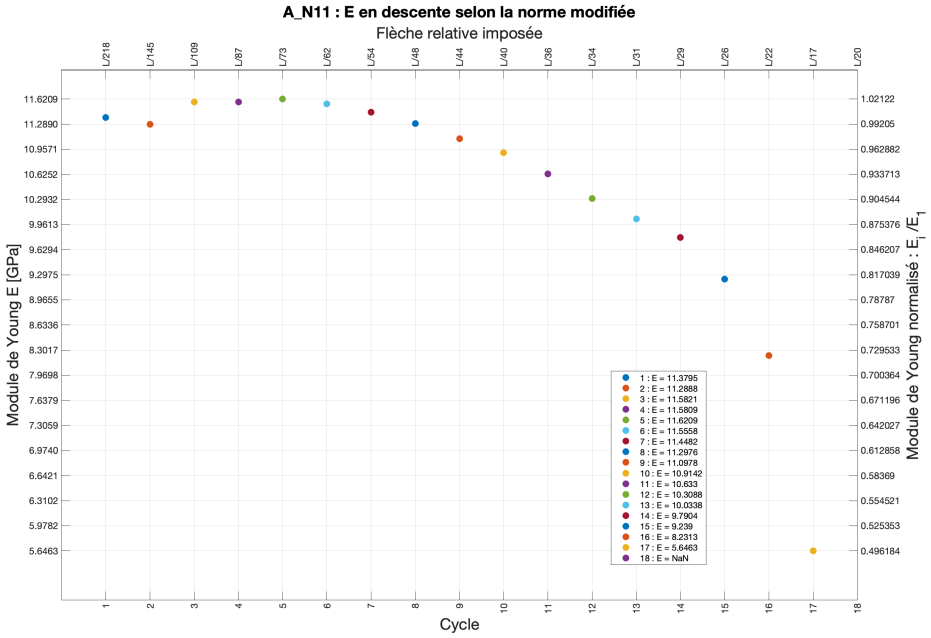


Figure M.86 – Module de Young en descente de l'éprouvette N11 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

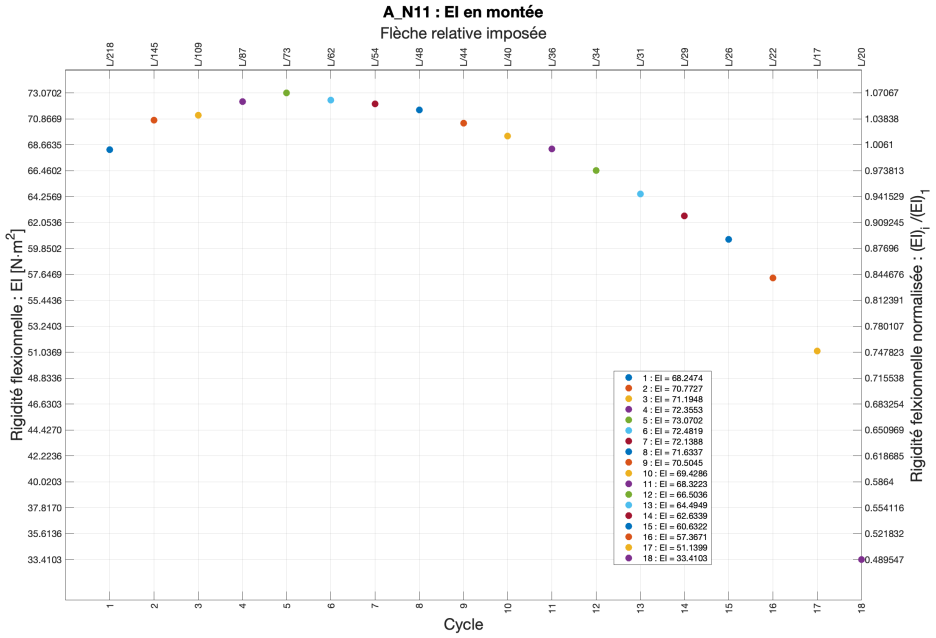


FIGURE M.87 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N11 de la batterie 1

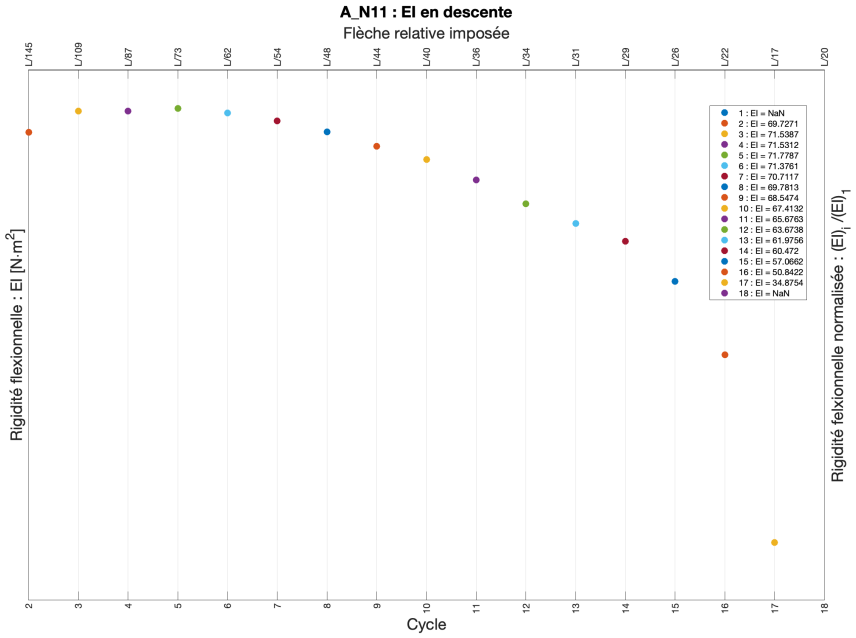


FIGURE M.88 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N11 de la batterie 1

Fonction S

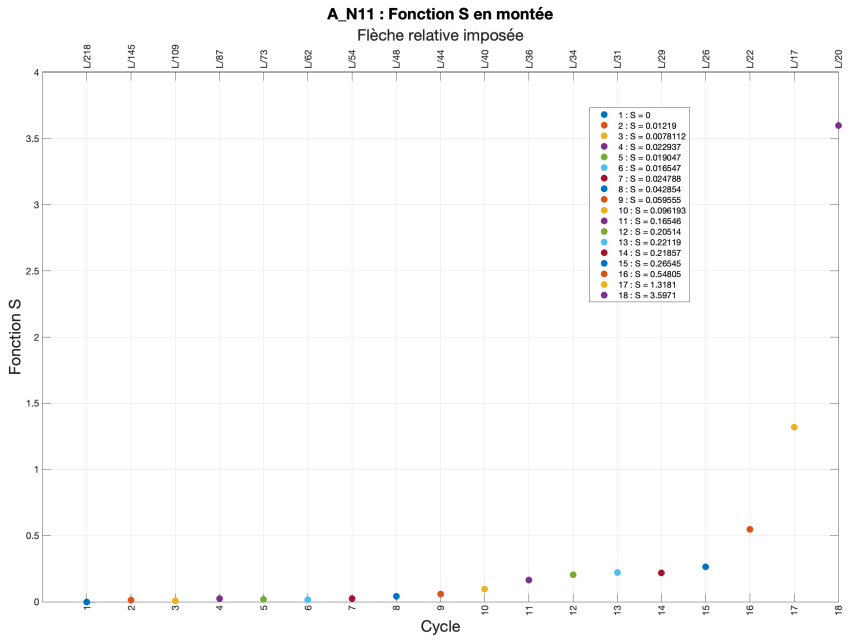


Figure M.89 – Fonction S en montée de l'éprouvette N11 de la batterie 1

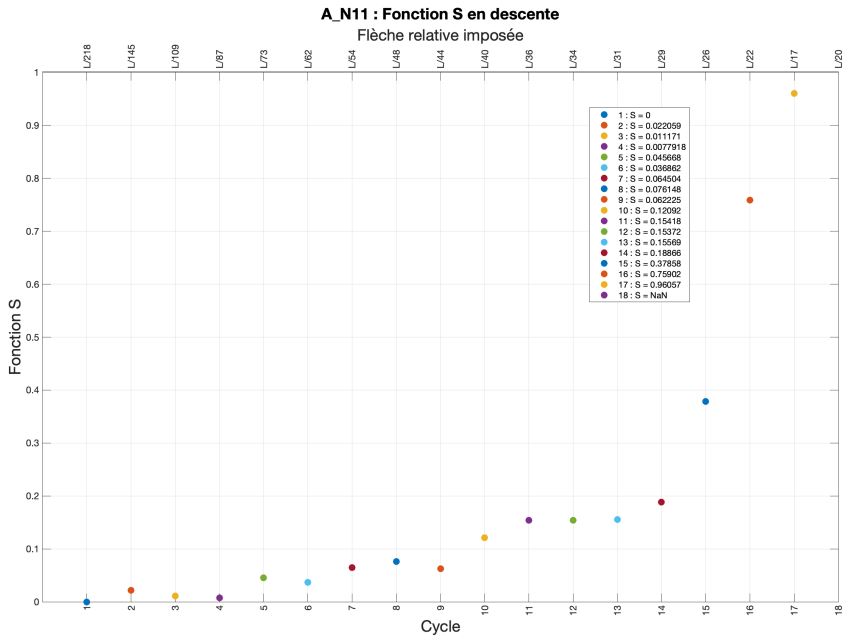


Figure M.90 – Fonction S en descente de l'éprouvette N11 de la batterie 1

Éprouvette N12

Global

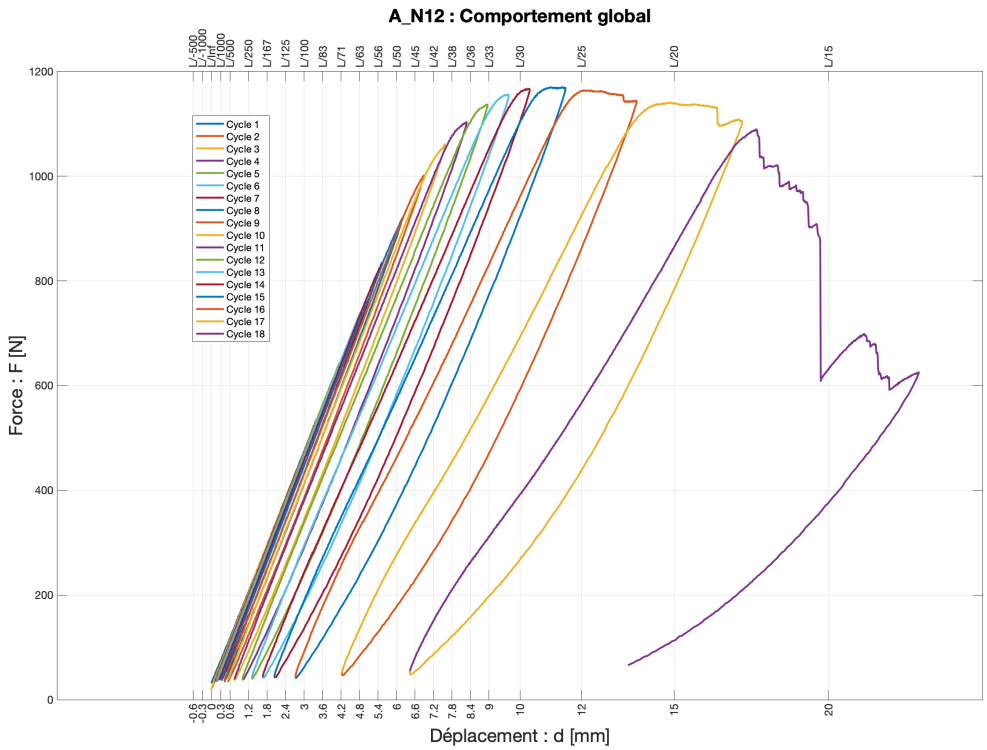


FIGURE M.91 – Comportement global de l'éprouvette N12 de la batterie 1

Déplacement résiduel

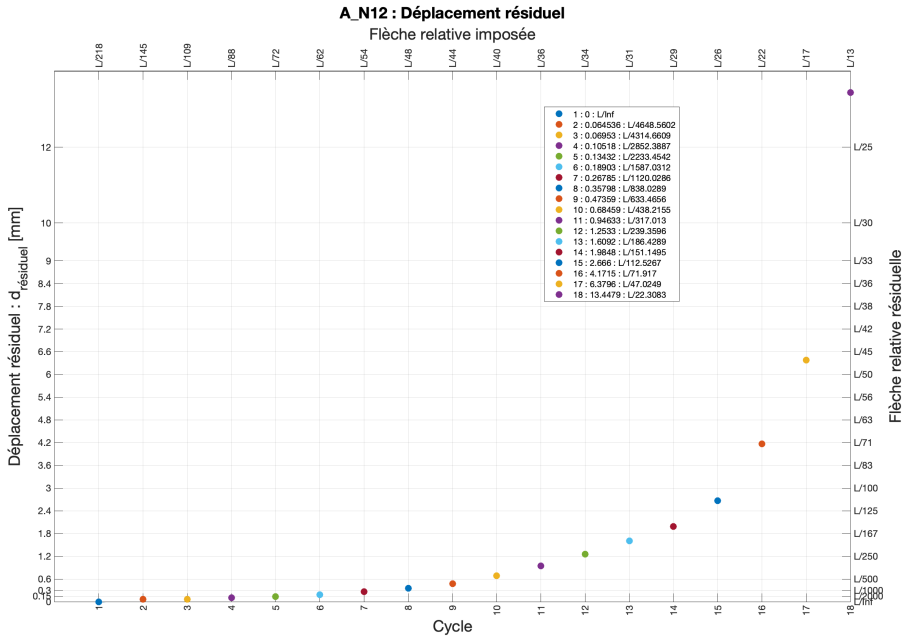


Figure M.92 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N12 de la batterie 1

Force maximale

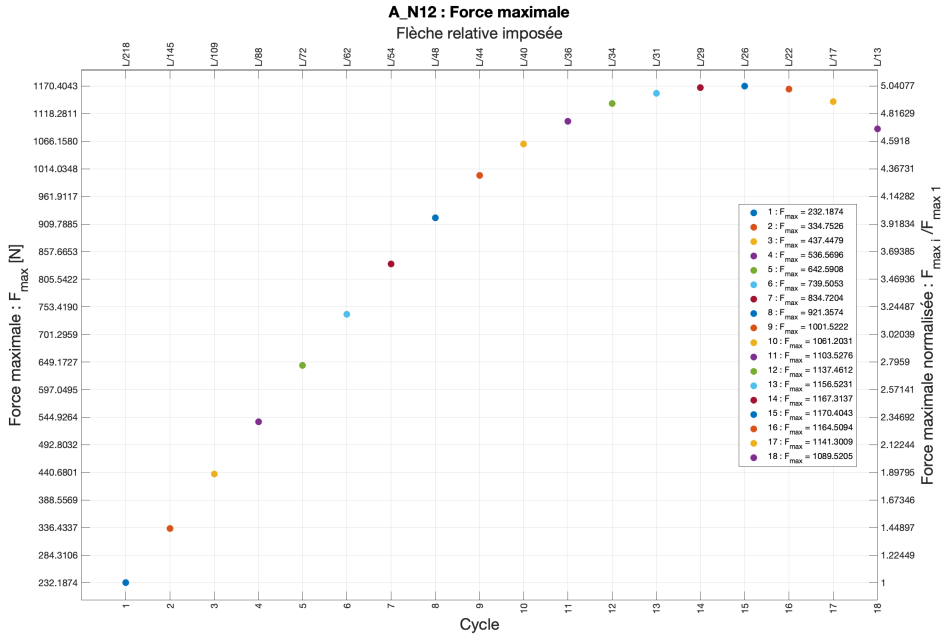


Figure M.93 – Force maximale de l'éprouvette N12 de la batterie 1

Module de Young

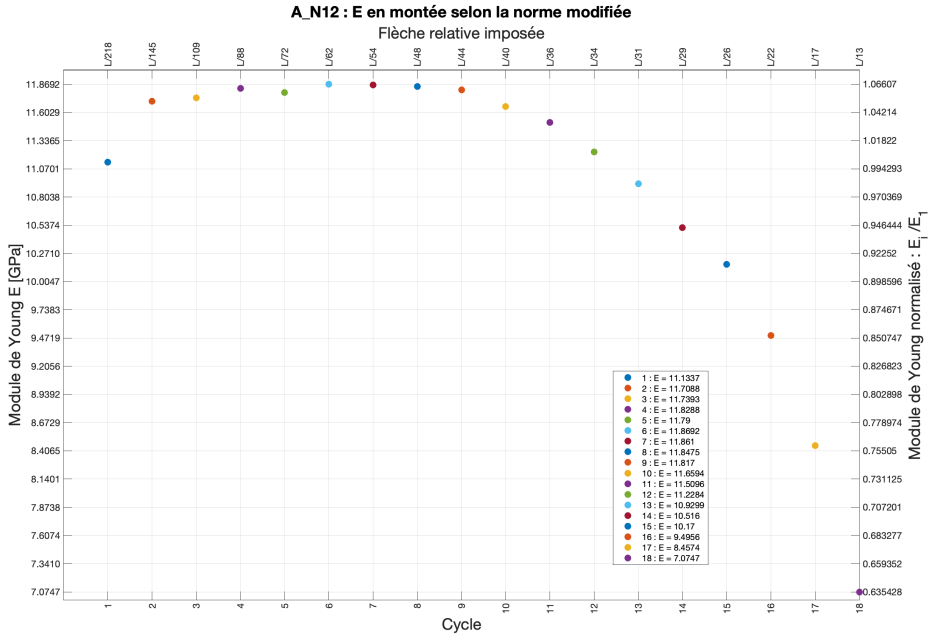


FIGURE M.94 – Module de Young en montée de l'éprouvette N12 de la batterie 1

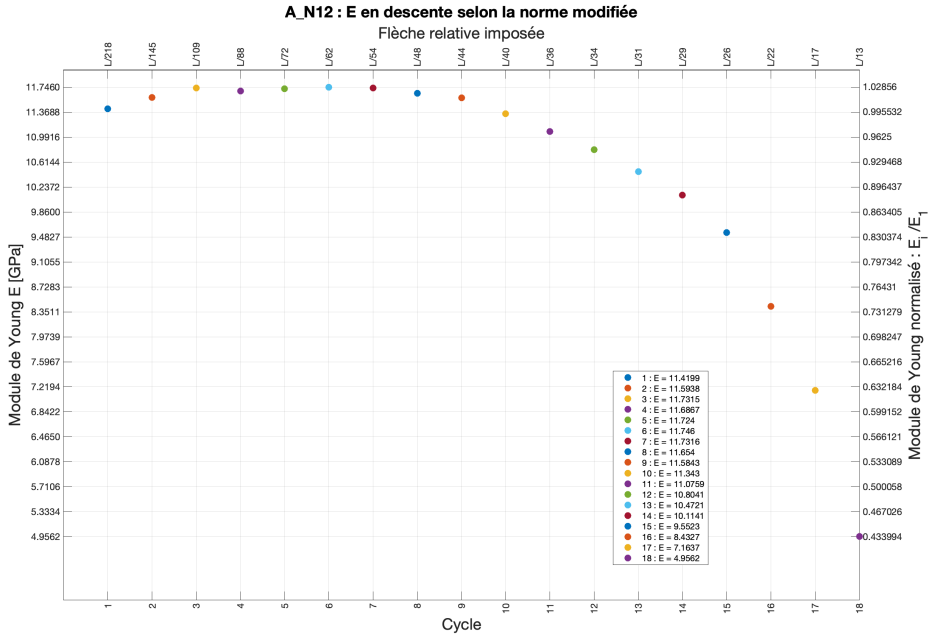


FIGURE M.95 – Module de Young en descente de l'éprouvette N12 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

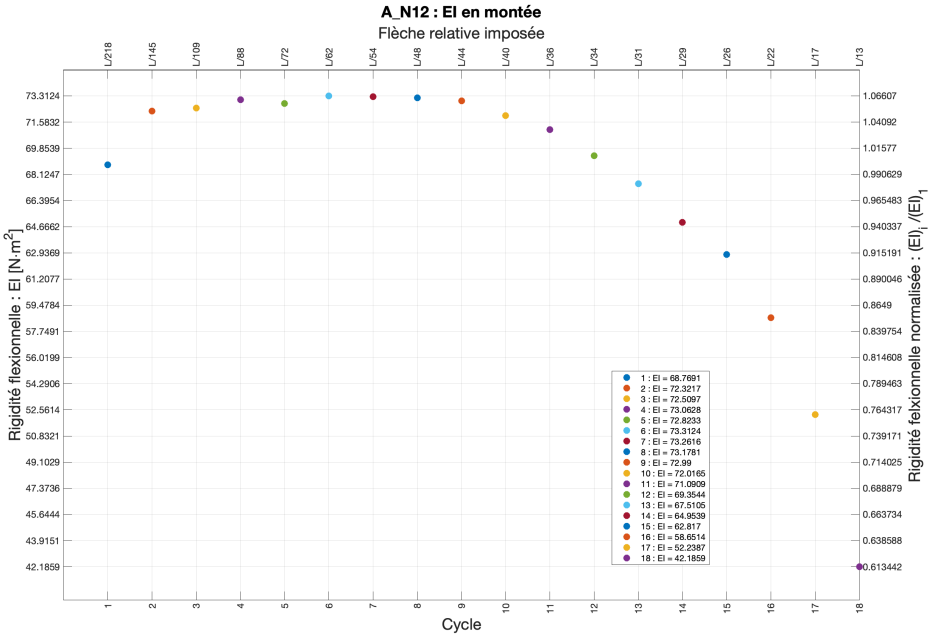


Figure M.96 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N12 de la batterie 1

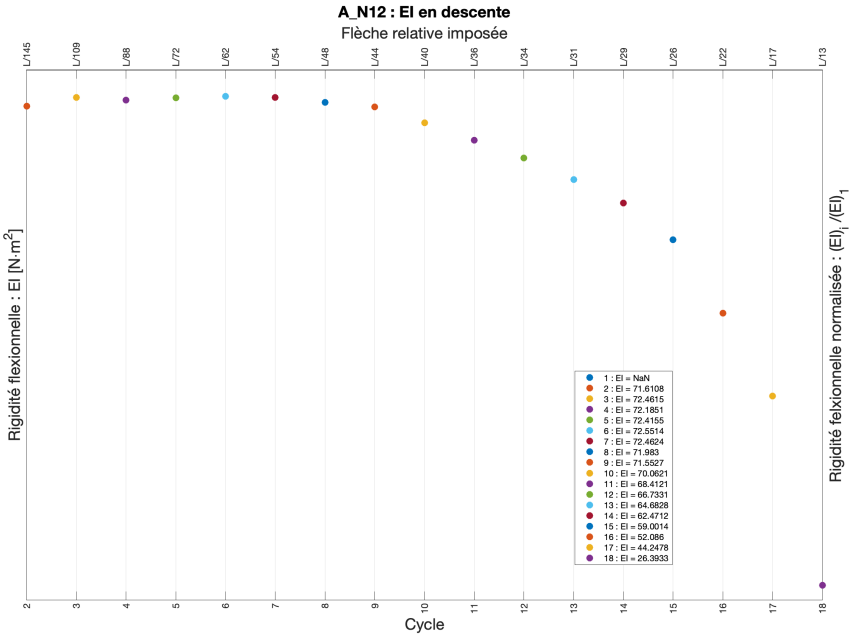


Figure M.97 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N12 de la batterie 1

Fonction S

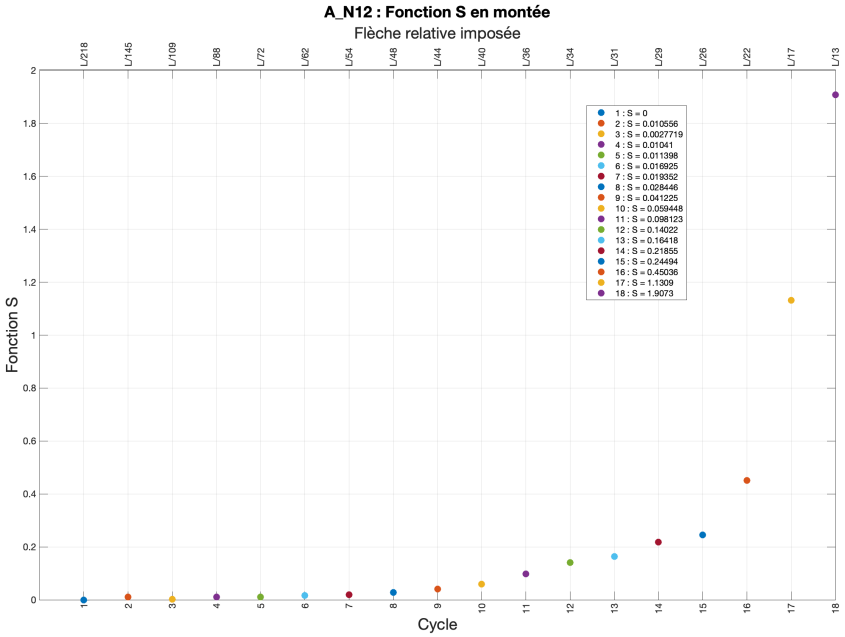


FIGURE M.98 – Fonction S en montée de l'éprouvette N12 de la batterie 1

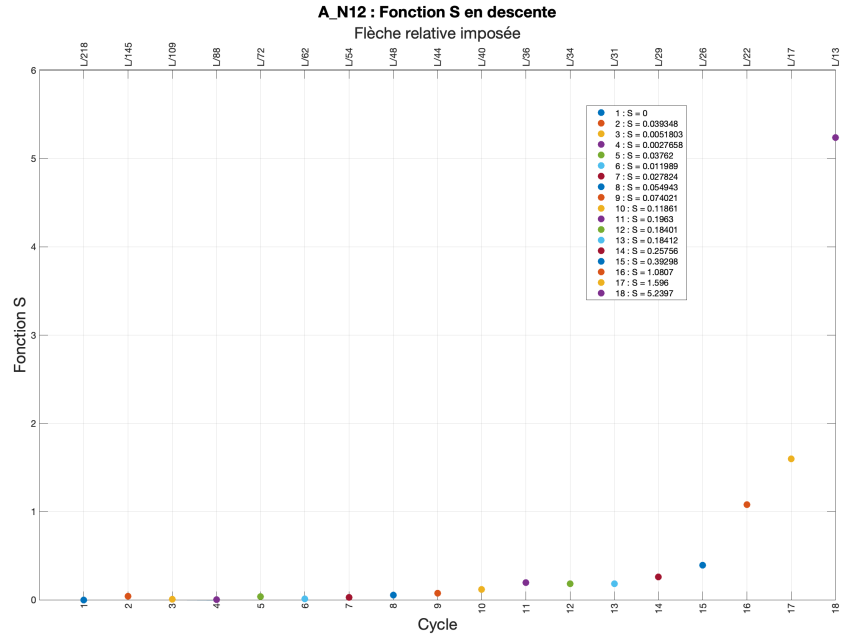


FIGURE M.99 – Fonction S en descente de l'éprouvette N12 de la batterie 1

Éprouvette N13

Global

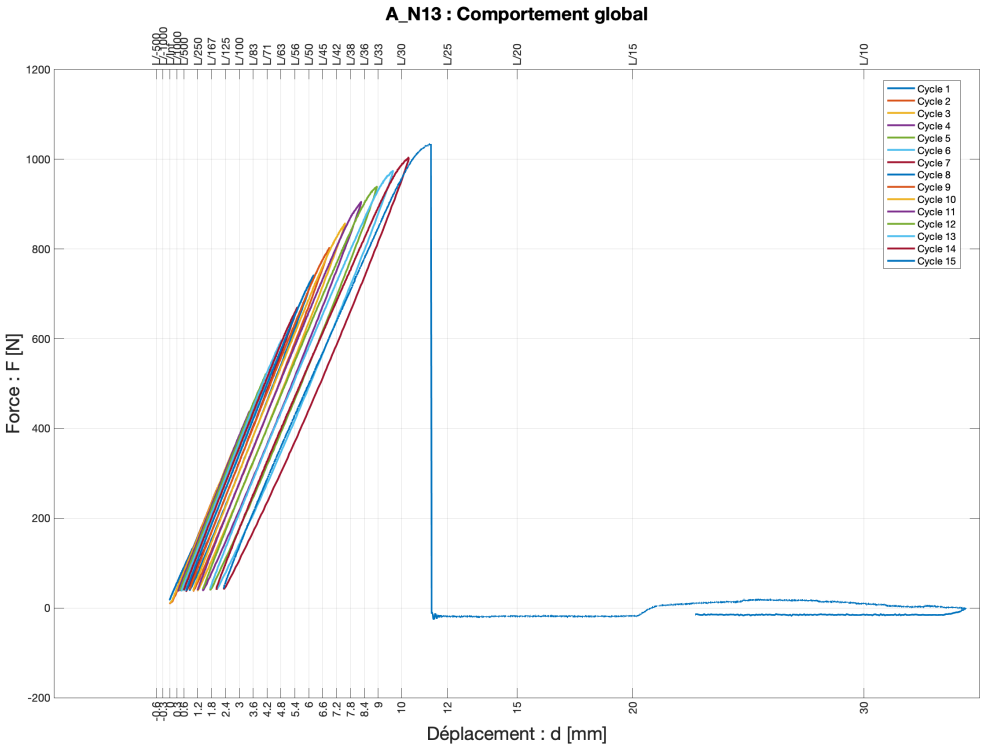


Figure M.100 – Comportement global de l'éprouvette N13 de la batterie 1

Déplacement résiduel

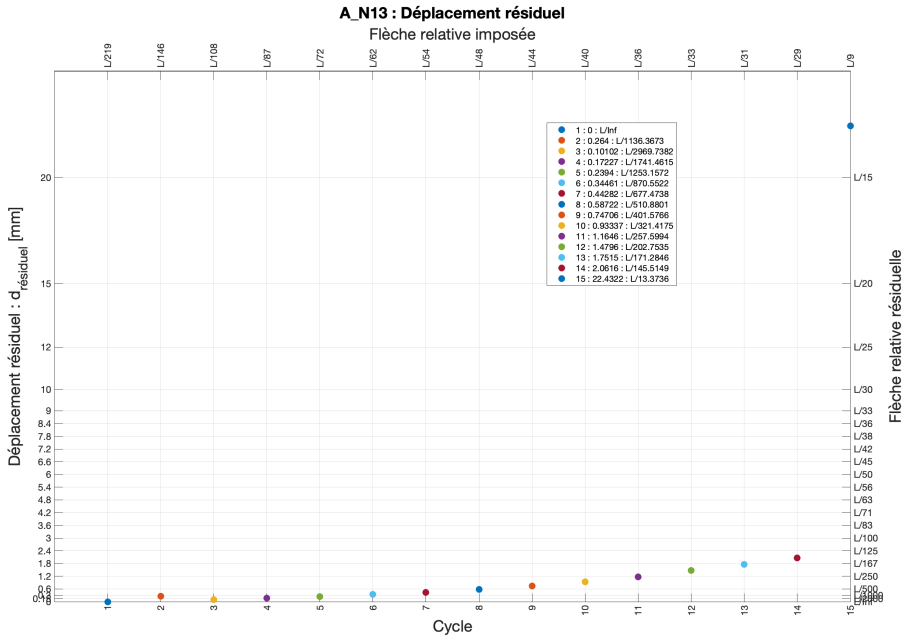


FIGURE M.101 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N13 de la batterie 1

Force maximale

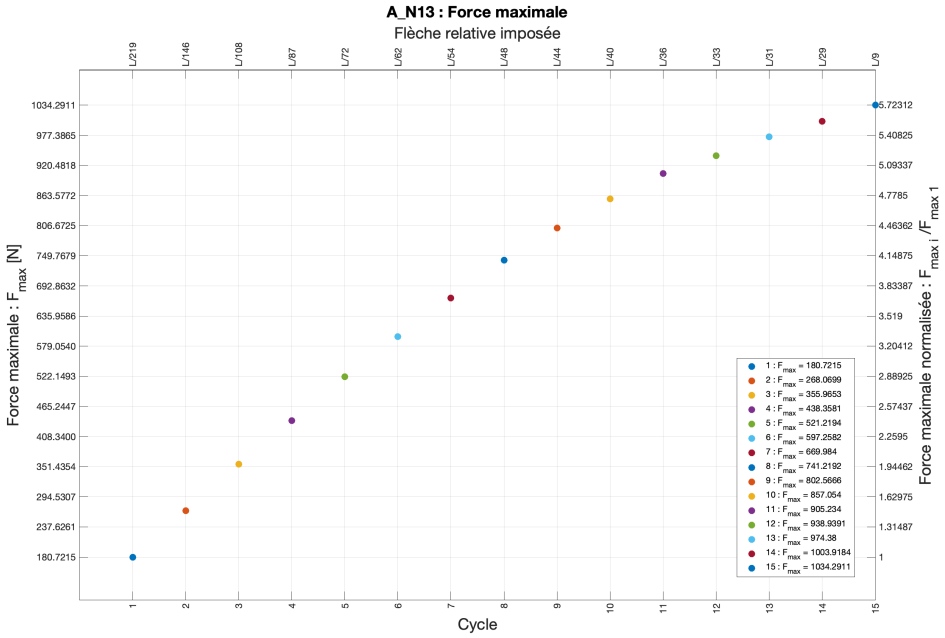


FIGURE M.102 – Force maximale de l'éprouvette N13 de la batterie 1

Module de Young

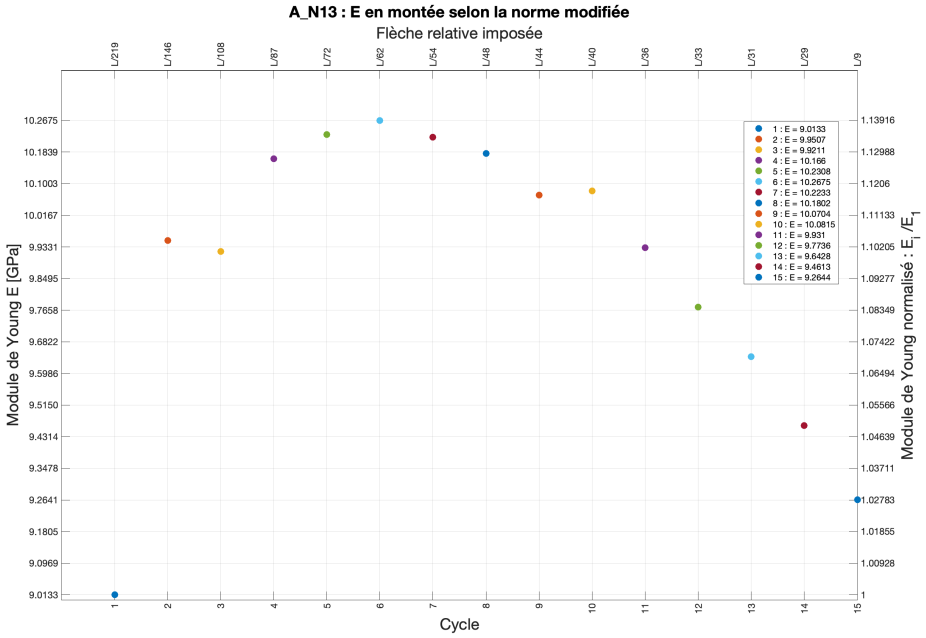


Figure M.103 – Module de Young en montée de l'éprouvette N13 de la batterie 1

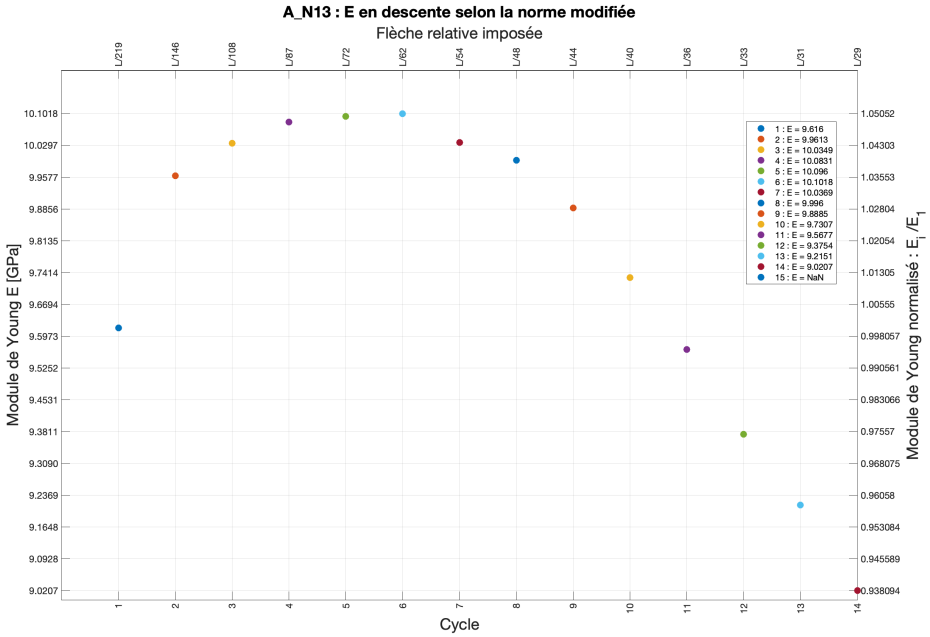


Figure M.104 – Module de Young en descente de l'éprouvette N13 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

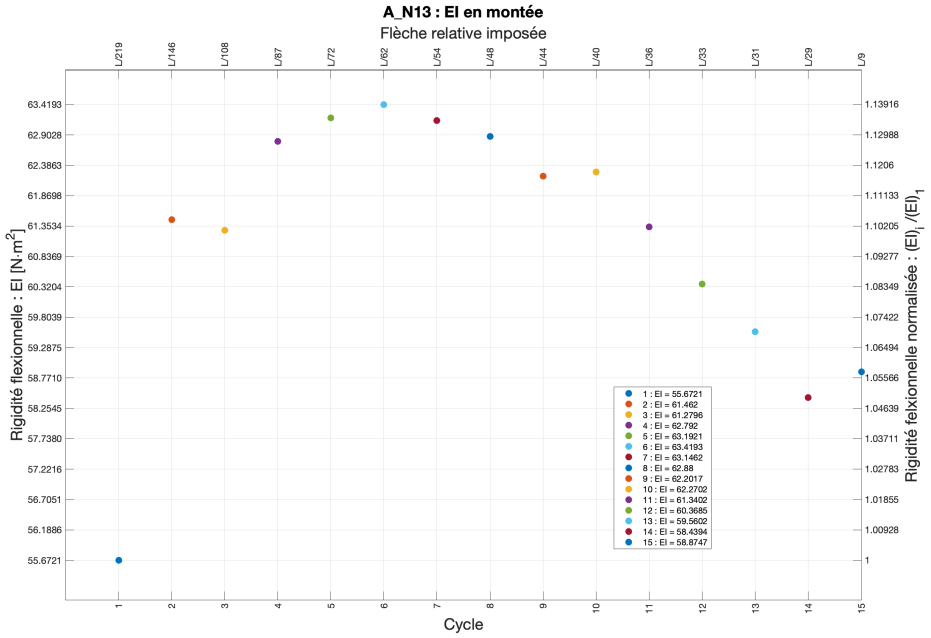


FIGURE M.105 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N13 de la batterie 1

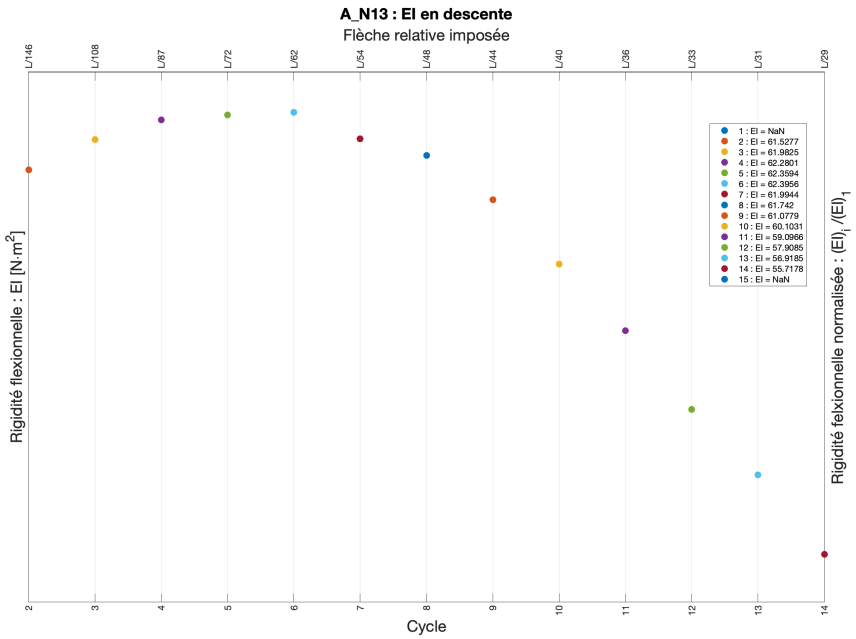


FIGURE M.106 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N13 de la batterie 1

Fonction S

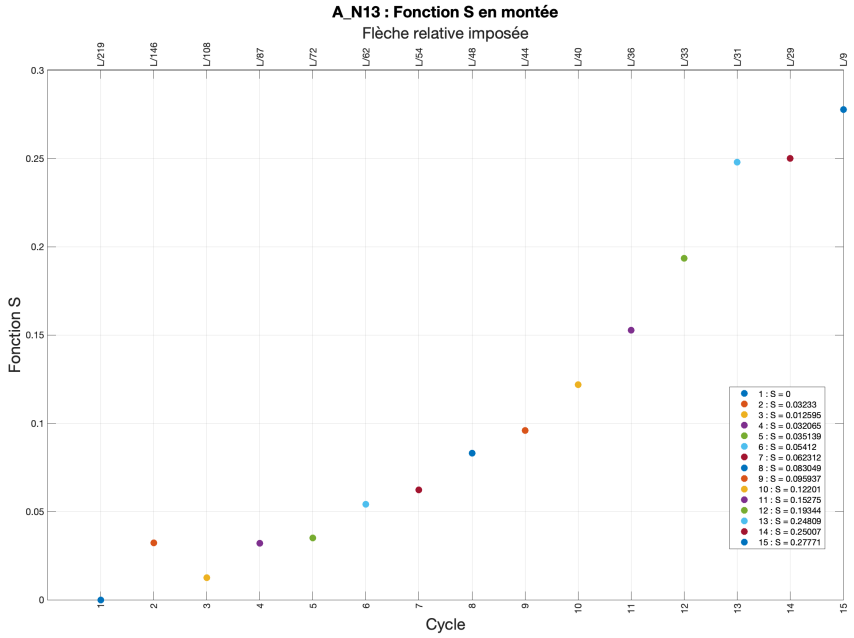


Figure M.107 – Fonction S en montée de l'éprouvette N13 de la batterie 1

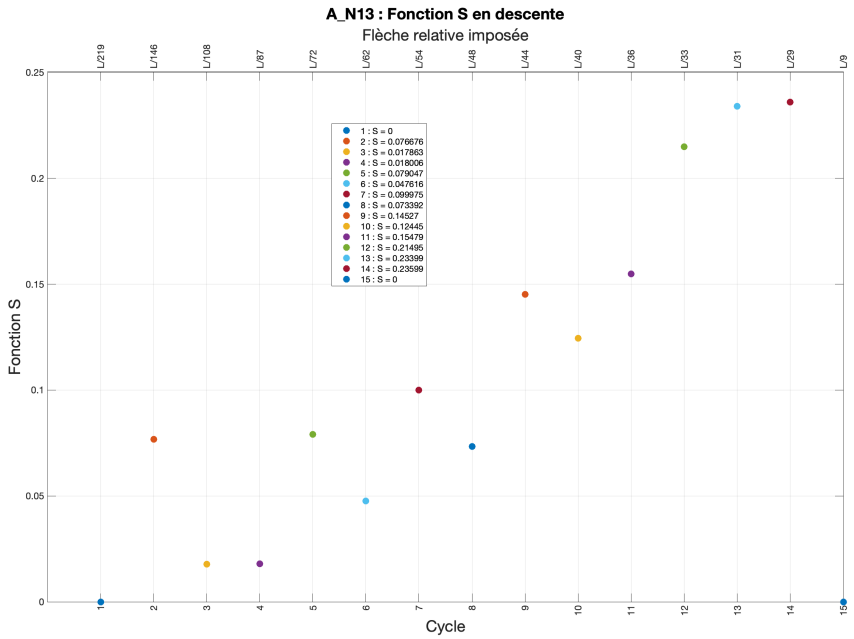


Figure M.108 – Fonction S en descente de l'éprouvette N13 de la batterie 1

Éprouvette N14

Global

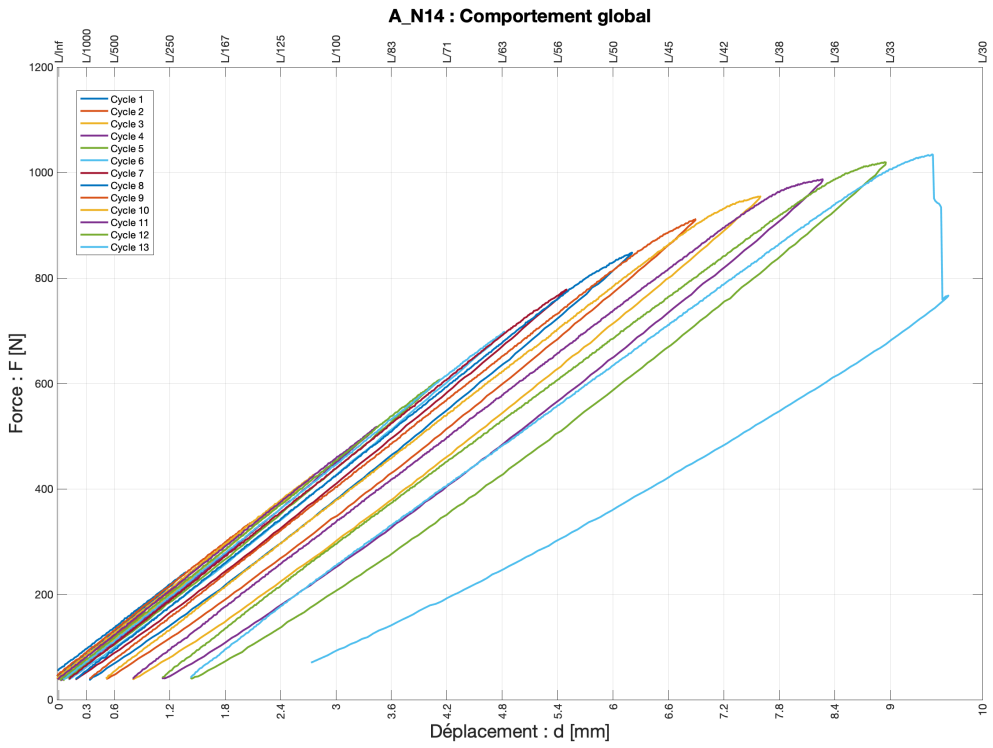


FIGURE M.109 – Comportement global de l'éprouvette N14 de la batterie 1

Déplacement résiduel

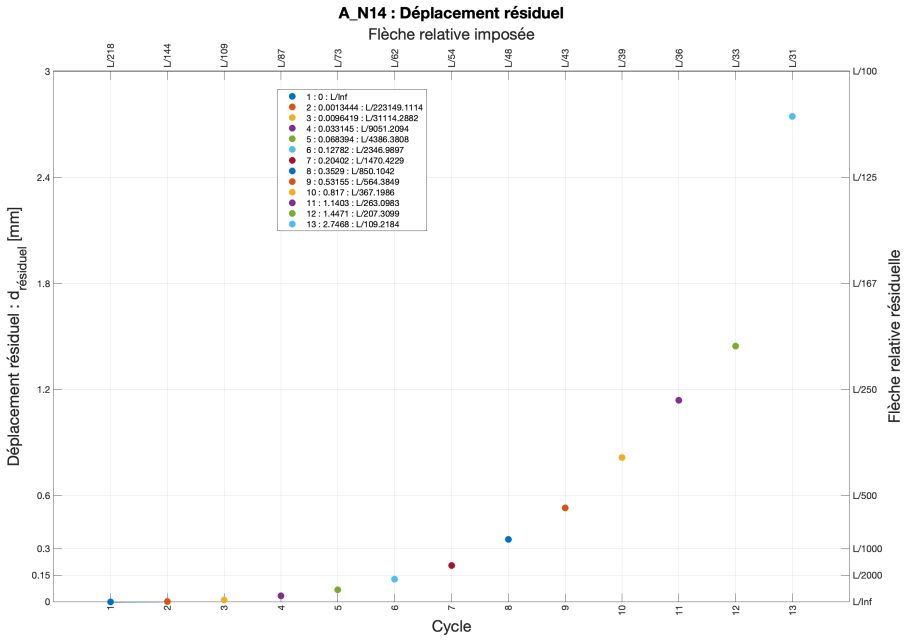


Figure M.110 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N14 de la batterie 1

Force maximale

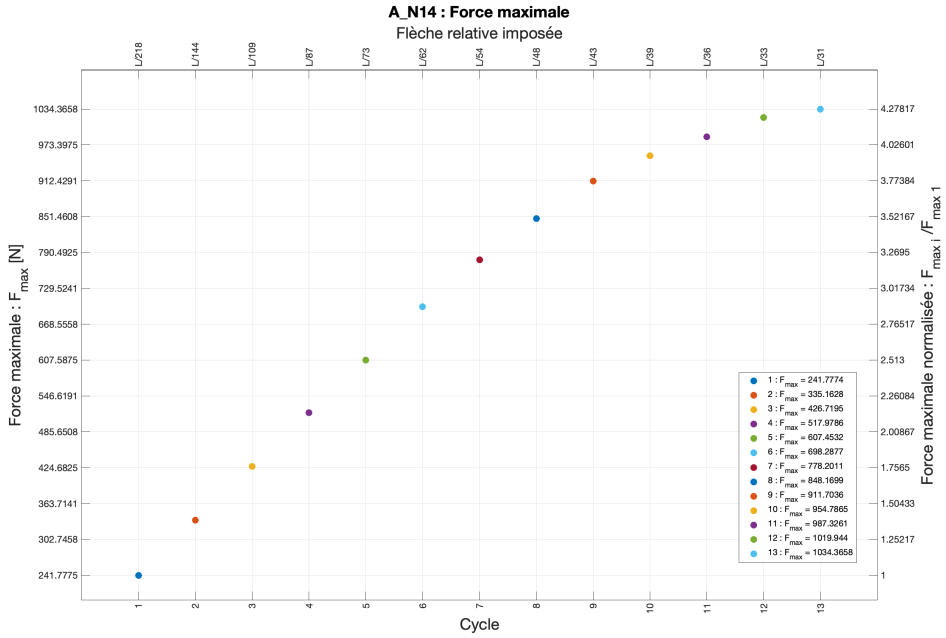


Figure M.111 – Force maximale de l'éprouvette N14 de la batterie 1

Module de Young

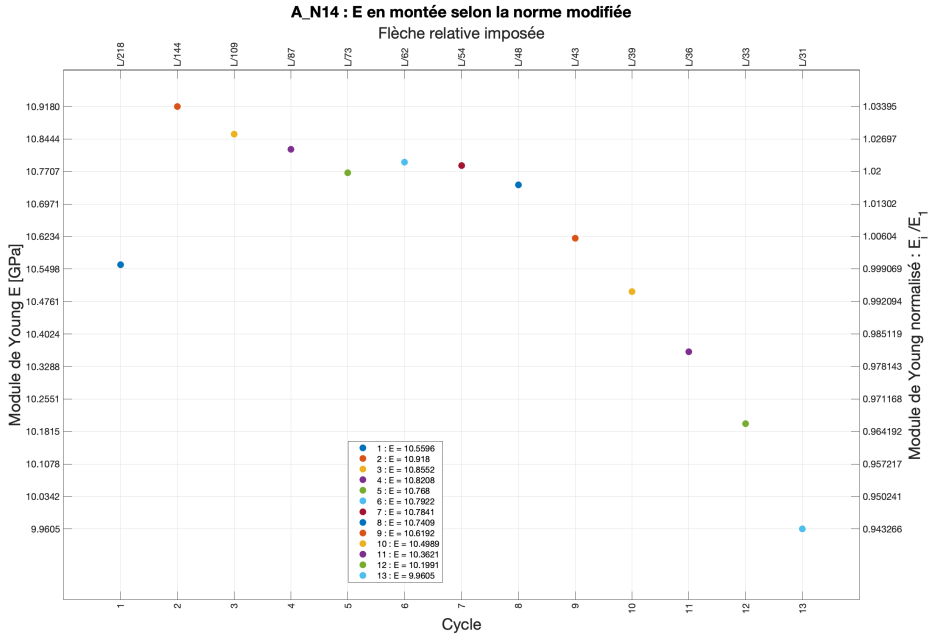


FIGURE M.112 – Module de Young en montée de l'éprouvette N14 de la batterie 1

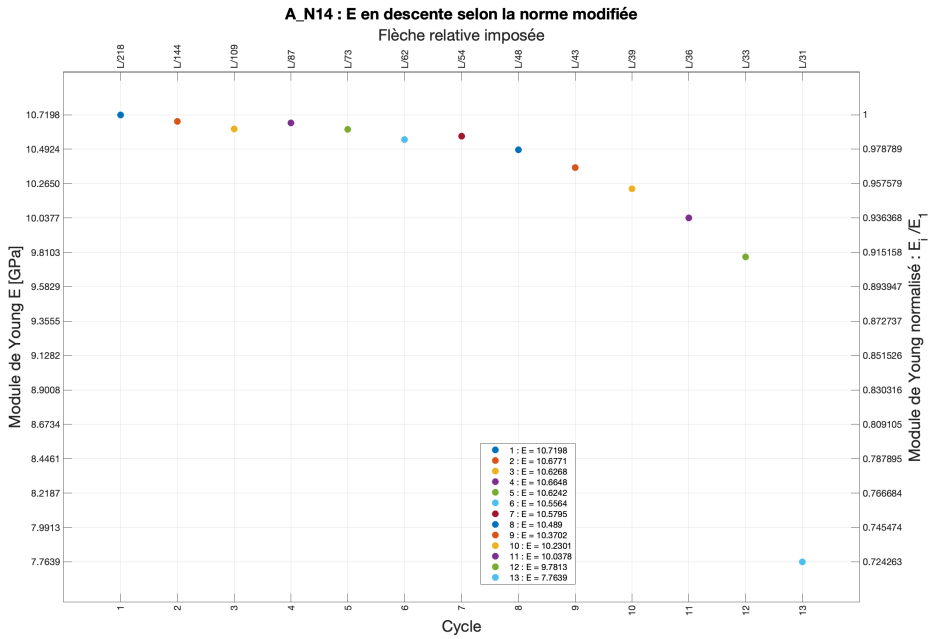


FIGURE M.113 – Module de Young en descente de l'éprouvette N14 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

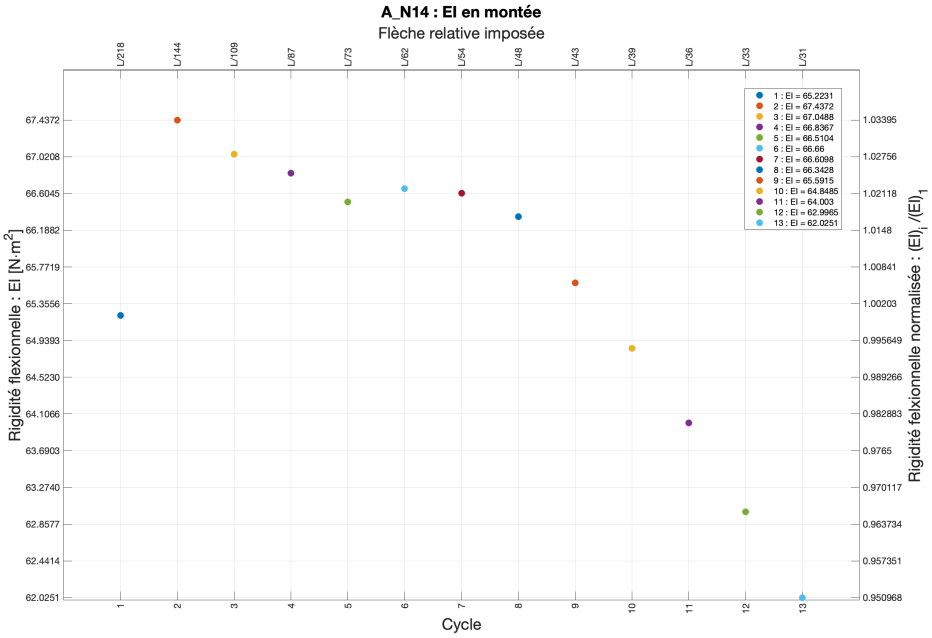


Figure M.114 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N14 de la batterie 1

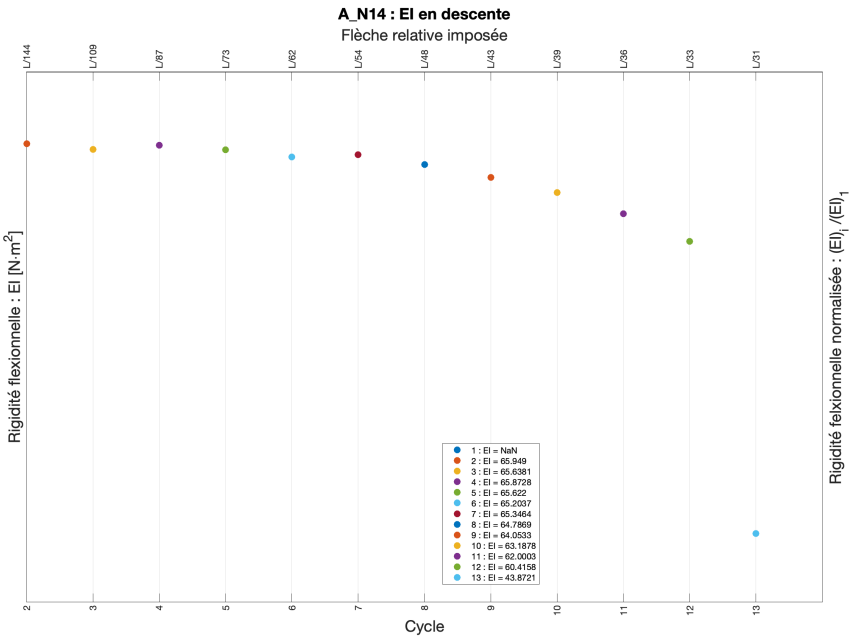


Figure M.115 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N14 de la batterie 1

Fonction S

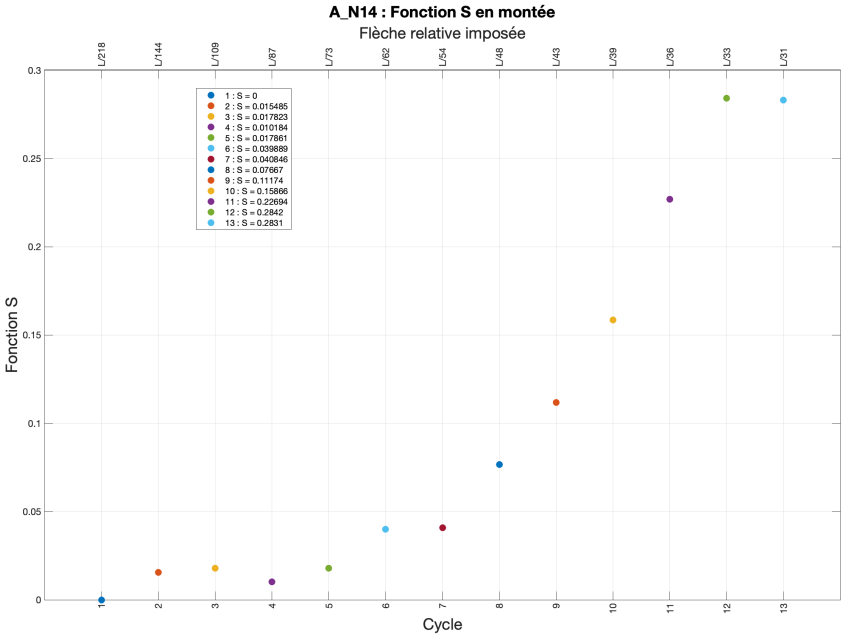


FIGURE M.116 – Fonction S en montée de l'éprouvette N14 de la batterie 1

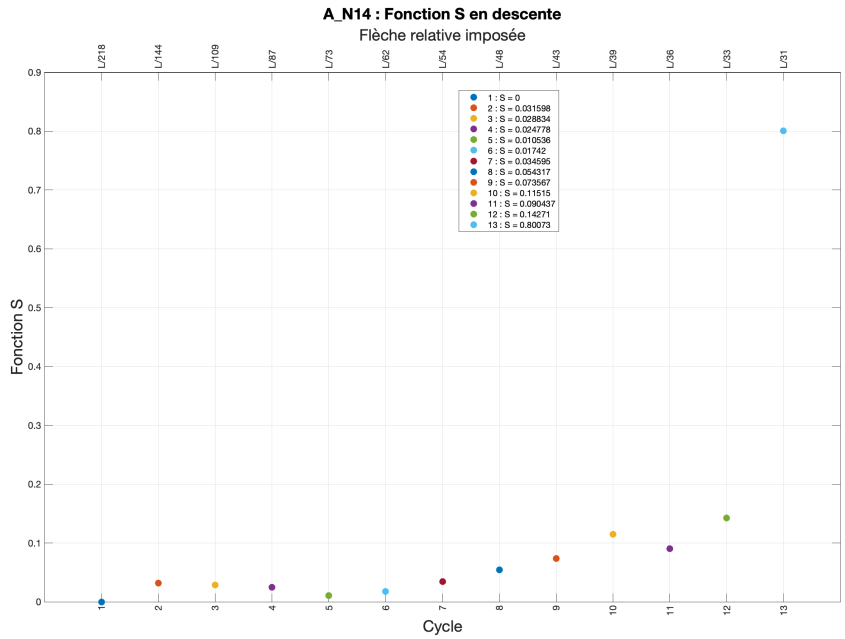


FIGURE M.117 – Fonction S en descente de l'éprouvette N14 de la batterie 1

Éprouvette N15

Global

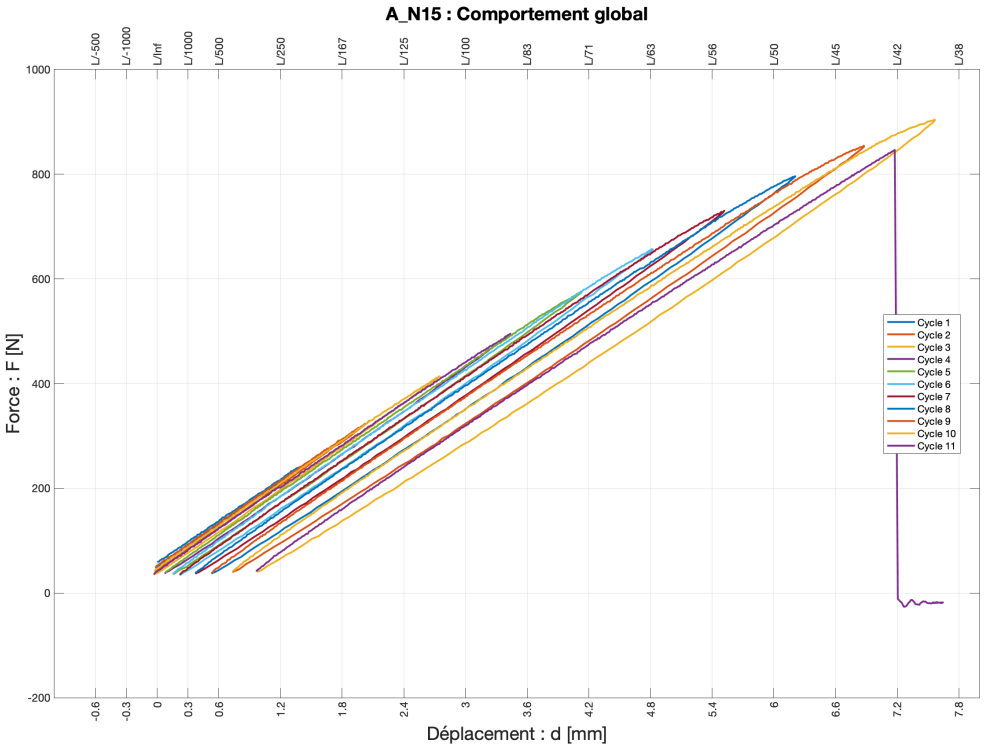


Figure M.118 – Comportement global de l'éprouvette N15 de la batterie 1

Déplacement résiduel

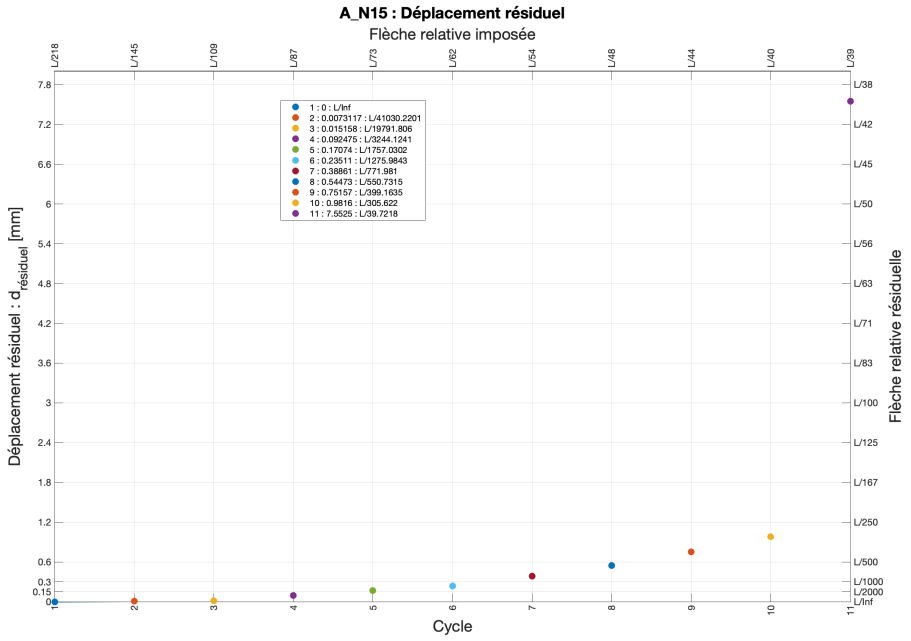


FIGURE M.119 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N15 de la batterie 1

Force maximale

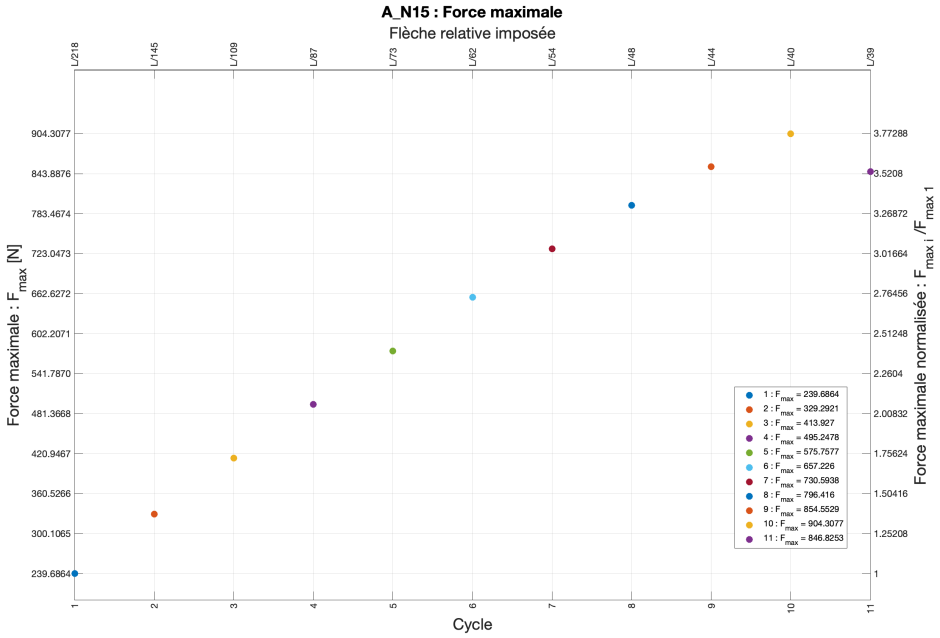


FIGURE M.120 – Force maximale de l'éprouvette N15 de la batterie 1

Module de Young

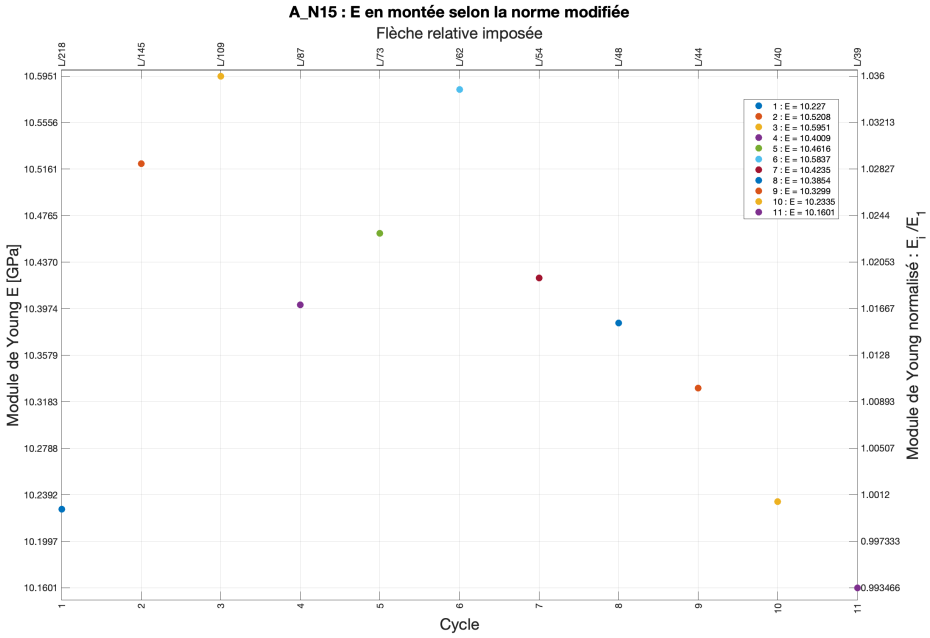


Figure M.121 – Module de Young en montée de l'éprouvette N15 de la batterie 1

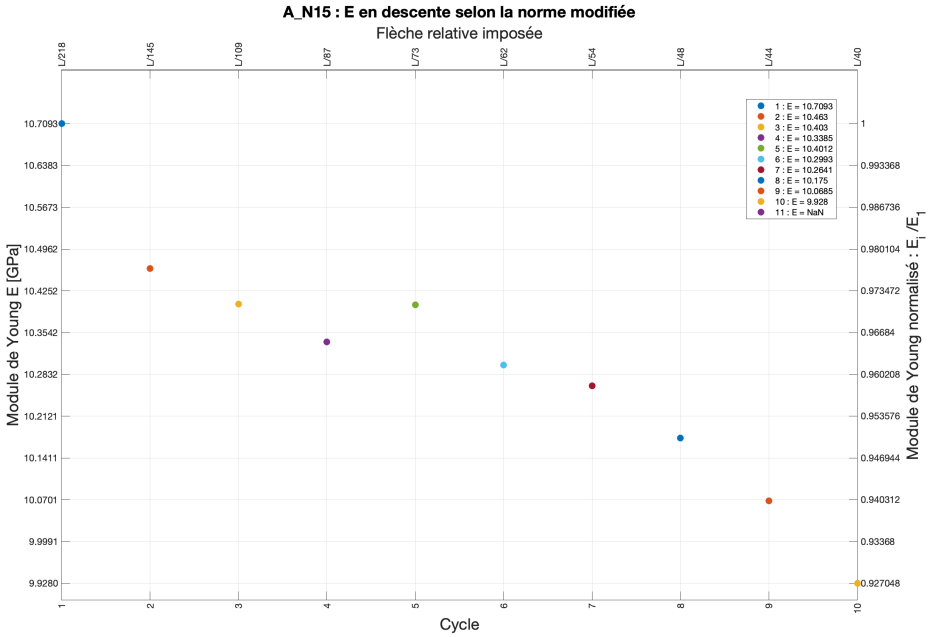


Figure M.122 – Module de Young en descente de l'éprouvette N15 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

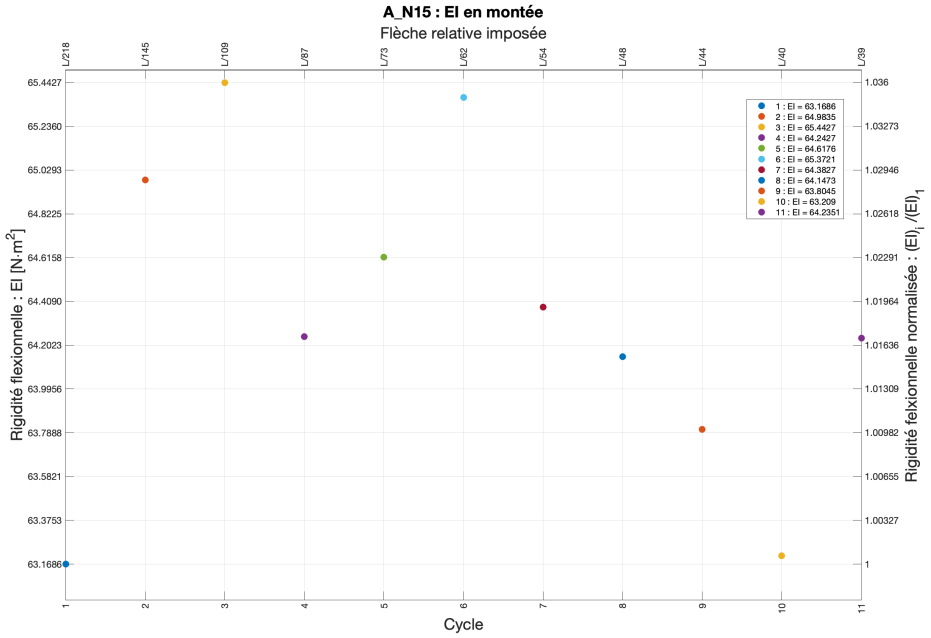


FIGURE M.123 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N15 de la batterie 1

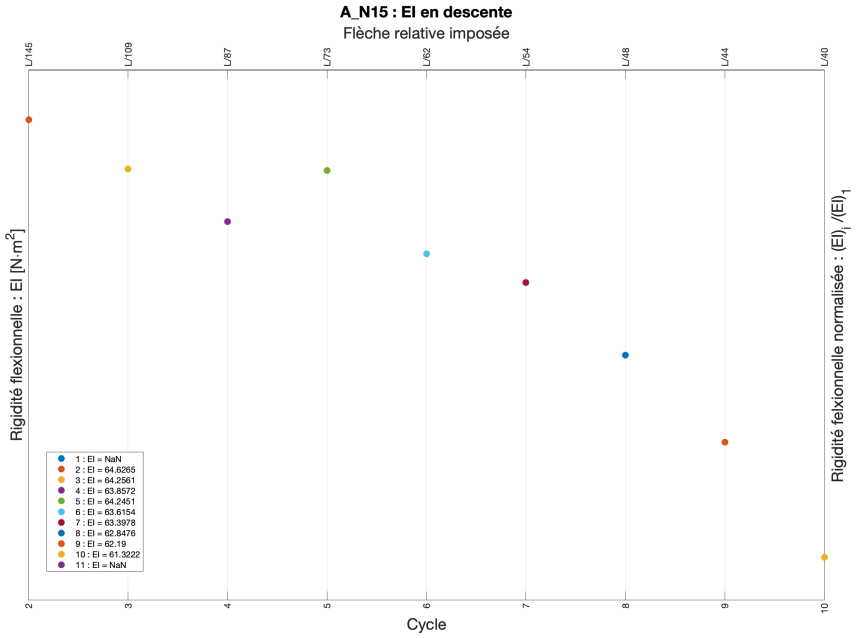


FIGURE M.124 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N15 de la batterie 1

Fonction S

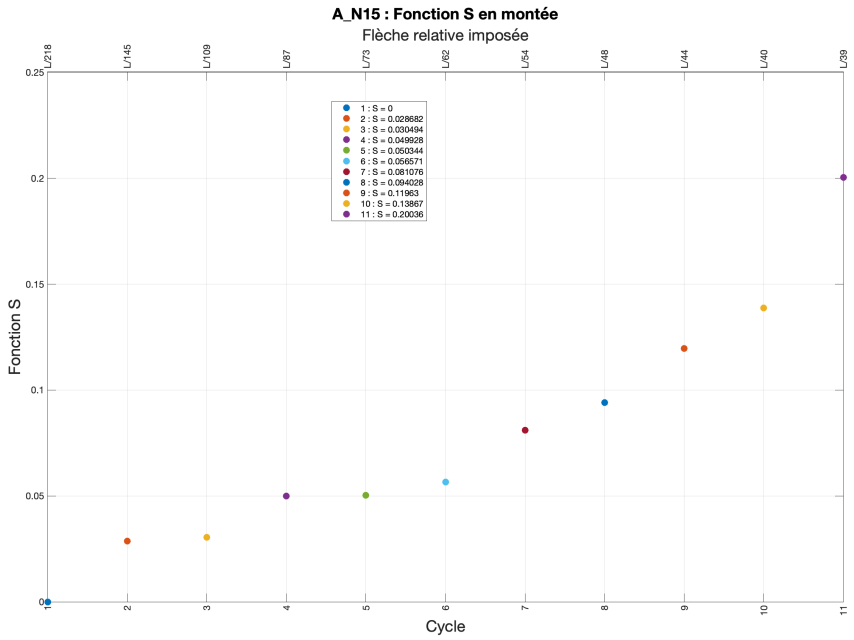


Figure M.125 – Fonction S en montée de l'éprouvette N15 de la batterie 1

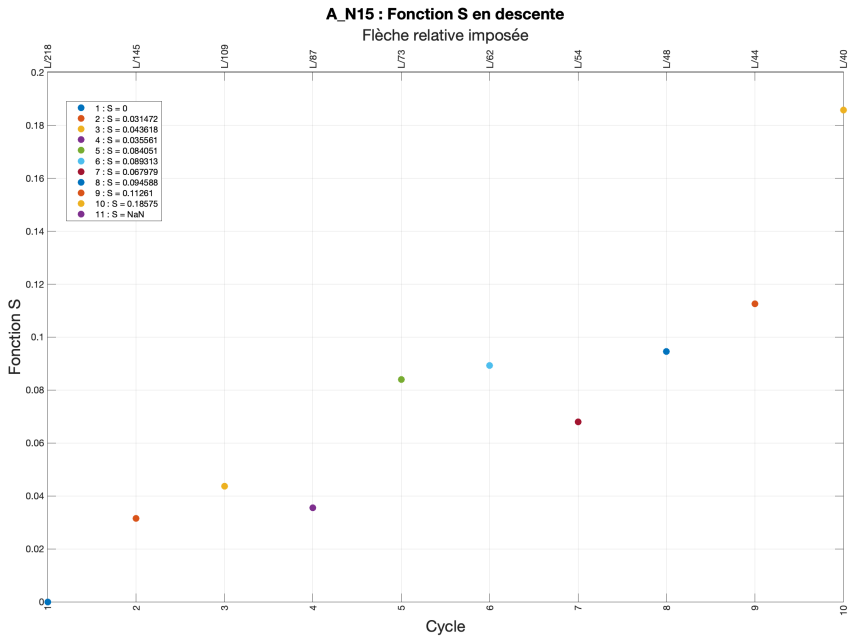


Figure M.126 – Fonction S en descente de l'éprouvette N15 de la batterie 1

Éprouvette N16

Global

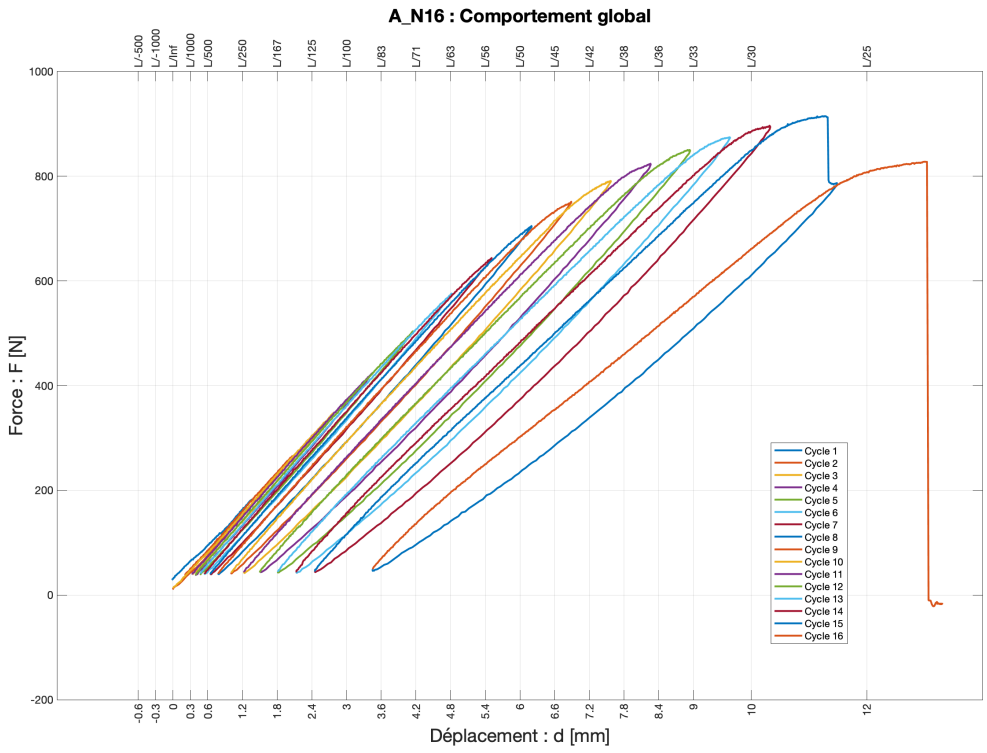


FIGURE M.127 – Comportement global de l'éprouvette N16 de la batterie 1

Déplacement résiduel

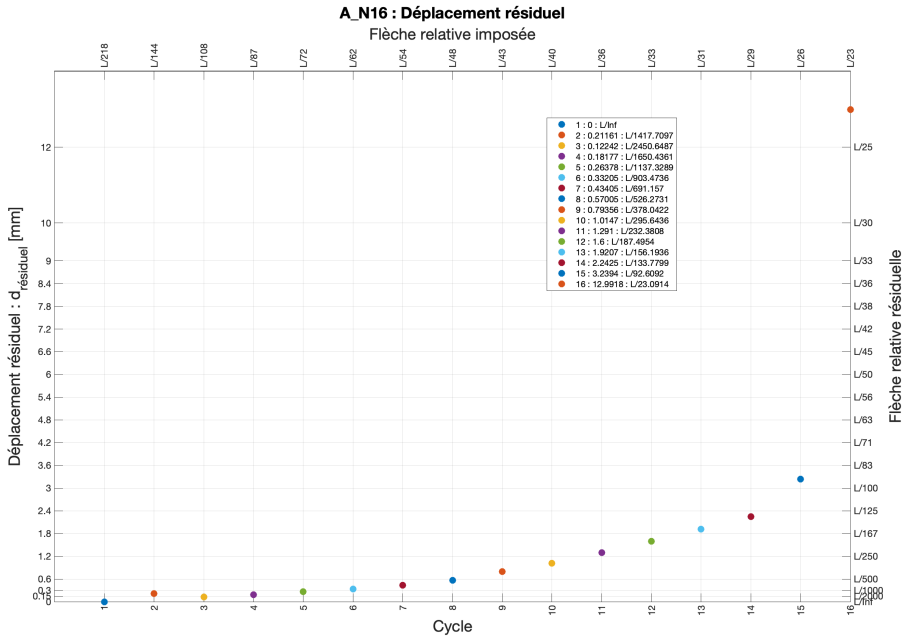


Figure M.128 – Déplacement résiduel de l'éprouvette N16 de la batterie 1

Force maximale

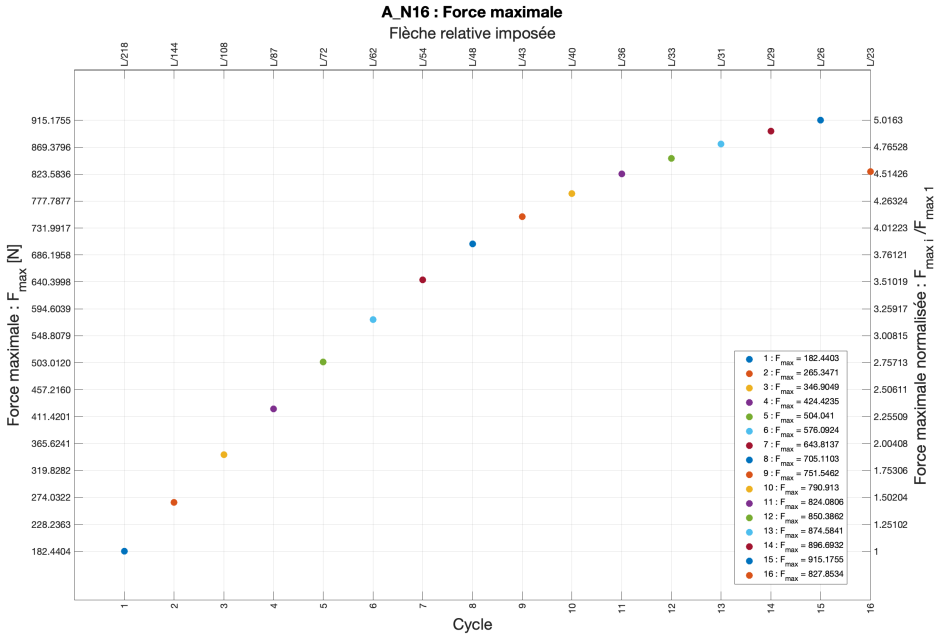


Figure M.129 – Force maximale de l'éprouvette N16 de la batterie 1

Module de Young

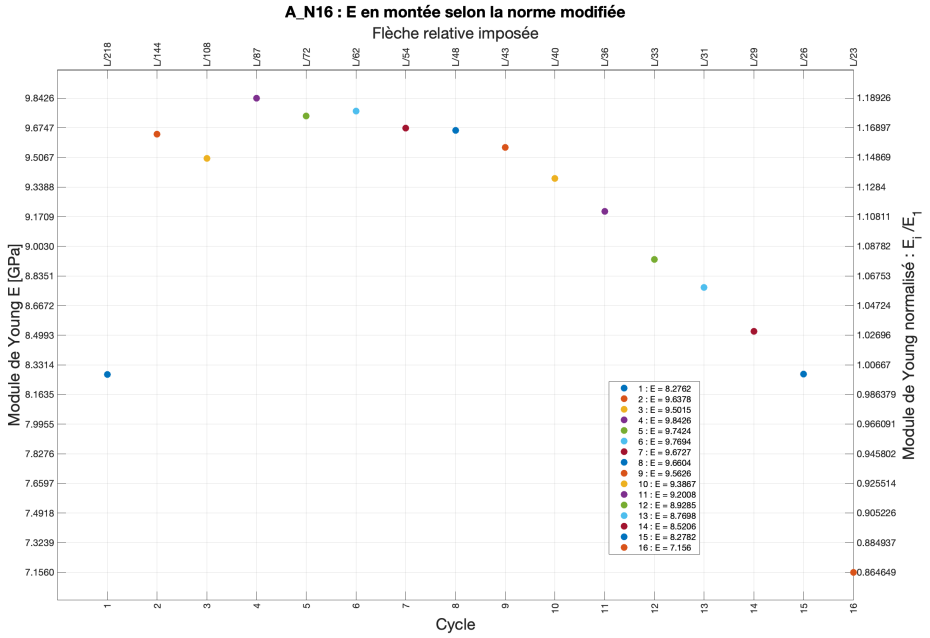


FIGURE M.130 – Module de Young en montée de l'éprouvette N16 de la batterie 1

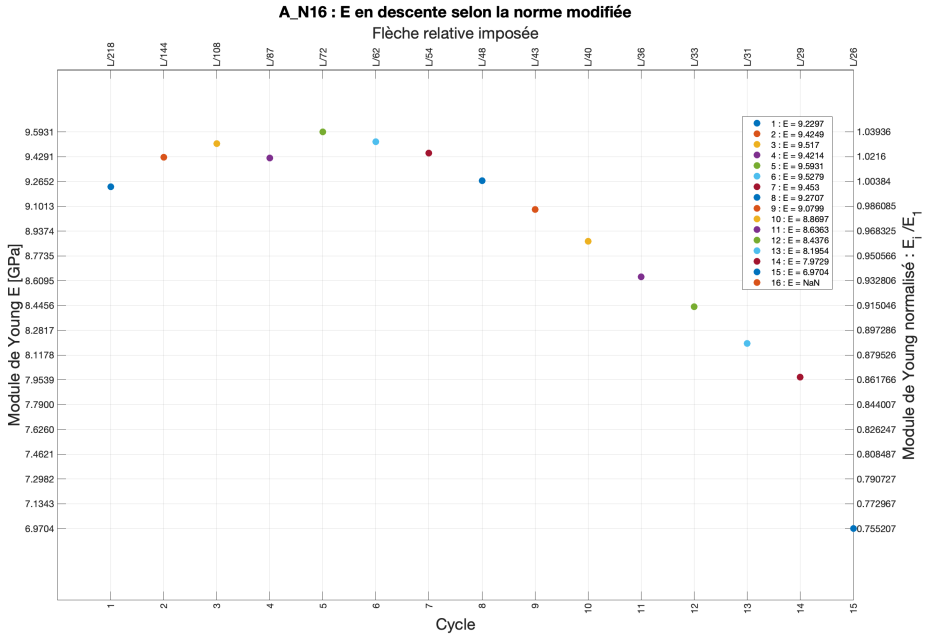


FIGURE M.131 – Module de Young en descente de l'éprouvette N16 de la batterie 1

Rigidité flexionnelle

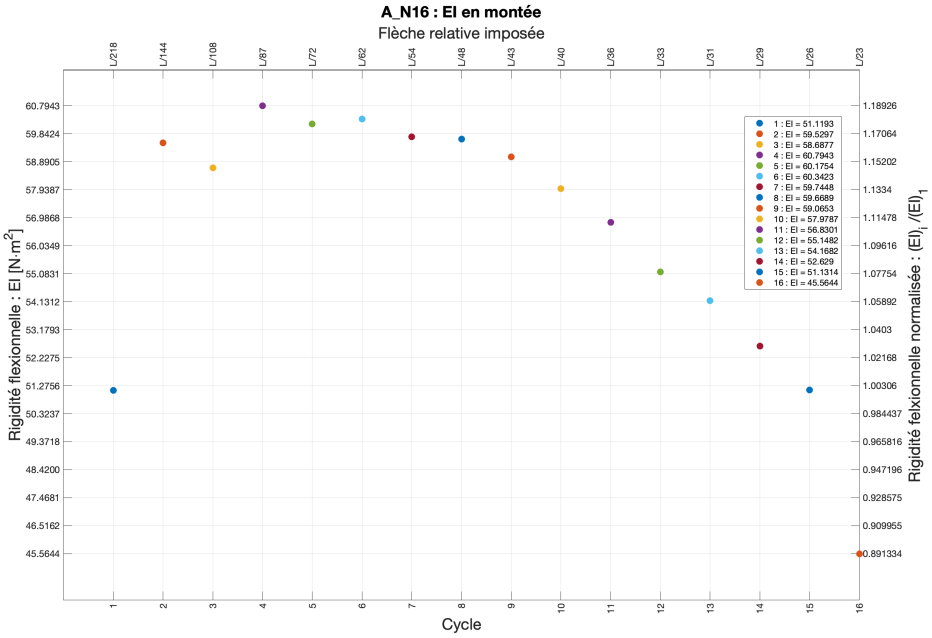


Figure M.132 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette N16 de la batterie 1

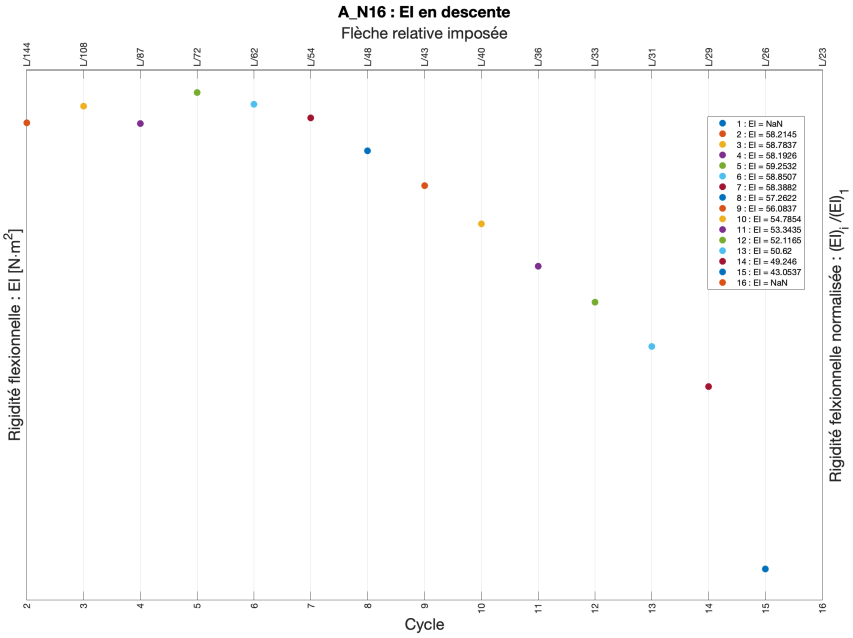


Figure M.133 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette N16 de la batterie 1

Fonction S

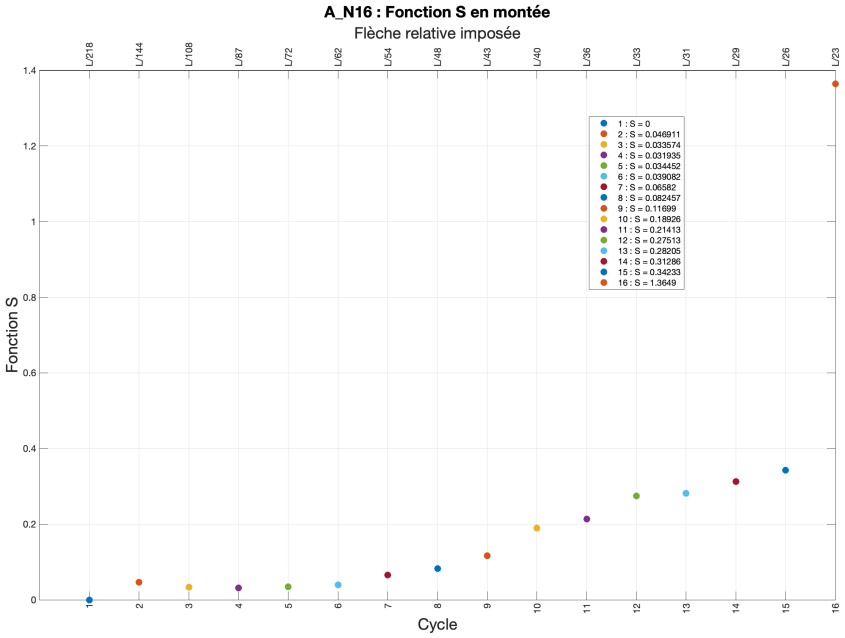


FIGURE M.134 – Fonction S en montée de l'éprouvette N16 de la batterie 1

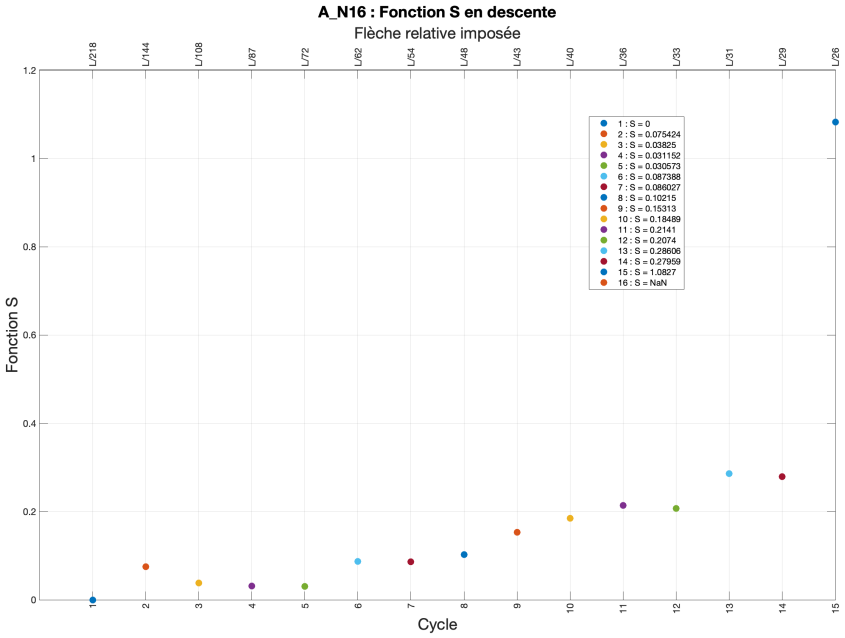


FIGURE M.135 – Fonction S en descente de l'éprouvette N16 de la batterie 1

M.2 Batterie 2 : Chargement statique : Lebow

Éprouvette NS01

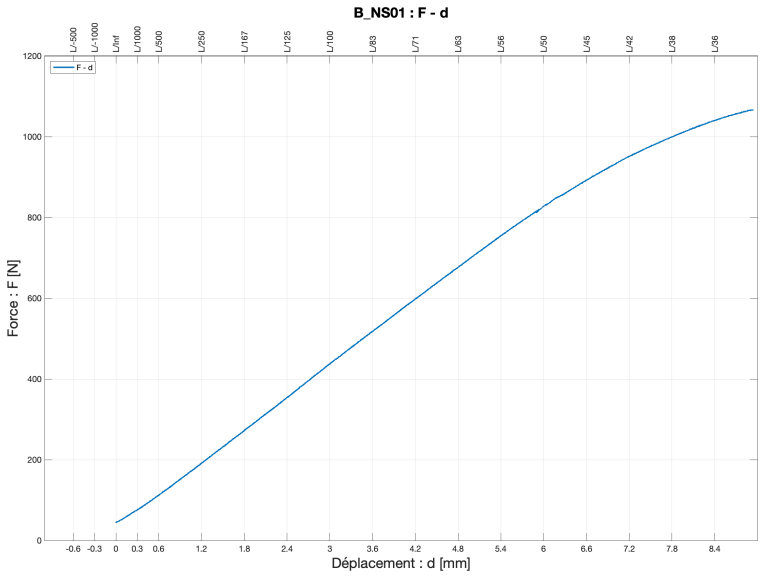


Figure M.136 – Comportement global de l'éprouvette NS01 de la batterie 2

Éprouvette NS02

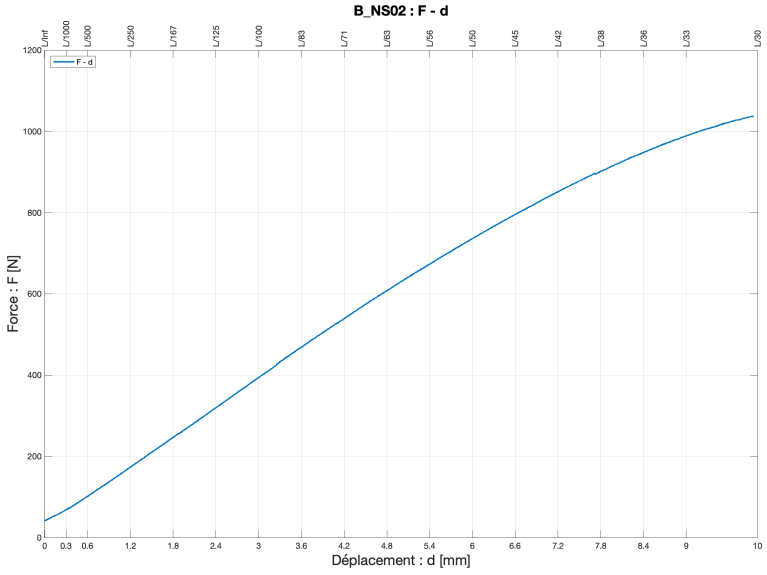


Figure M.137 – Comportement global de l'éprouvette NS02 de la batterie 2

Éprouvette NS03

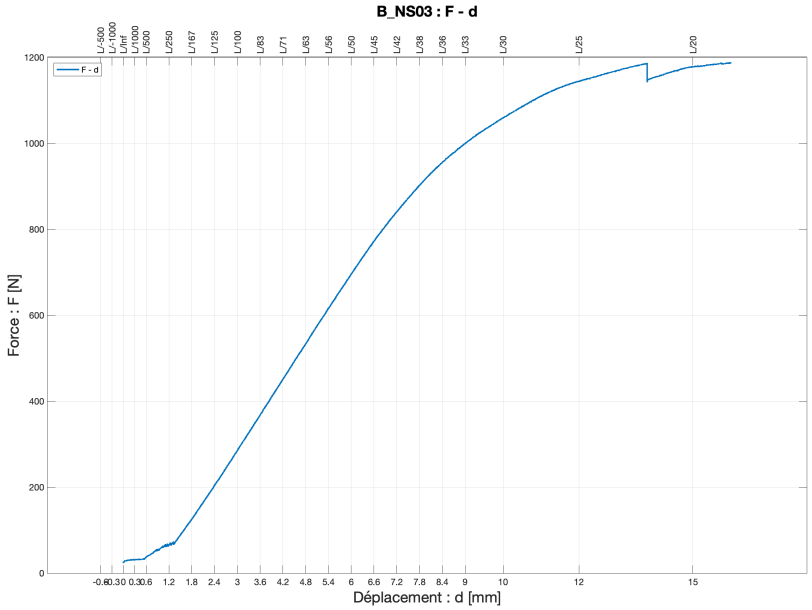


FIGURE M.138 – Comportement global de l'éprouvette NS03 de la batterie 2

Éprouvette NS04

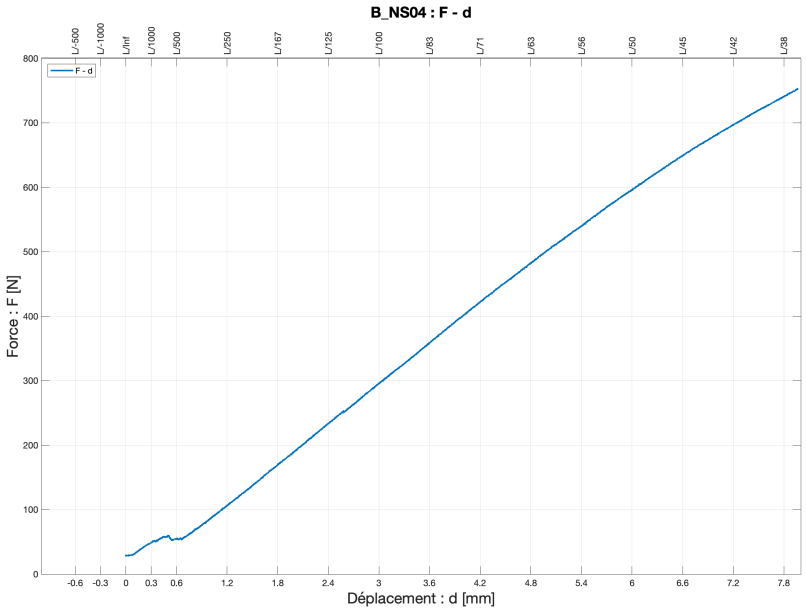


FIGURE M.139 – Comportement global de l'éprouvette NS04 de la batterie 2

Éprouvette NS05

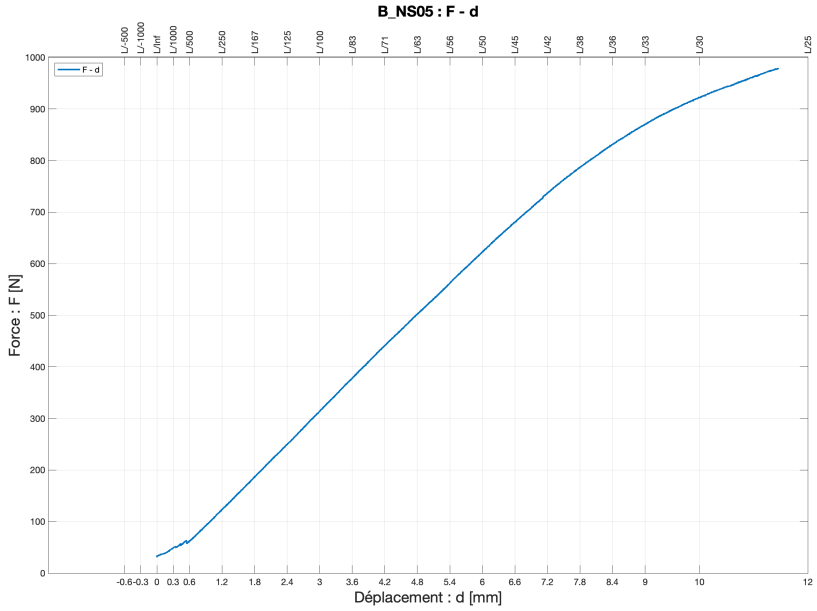


Figure M.140 – Comportement global de l'éprouvette NS05 de la batterie 2

Éprouvette NS06

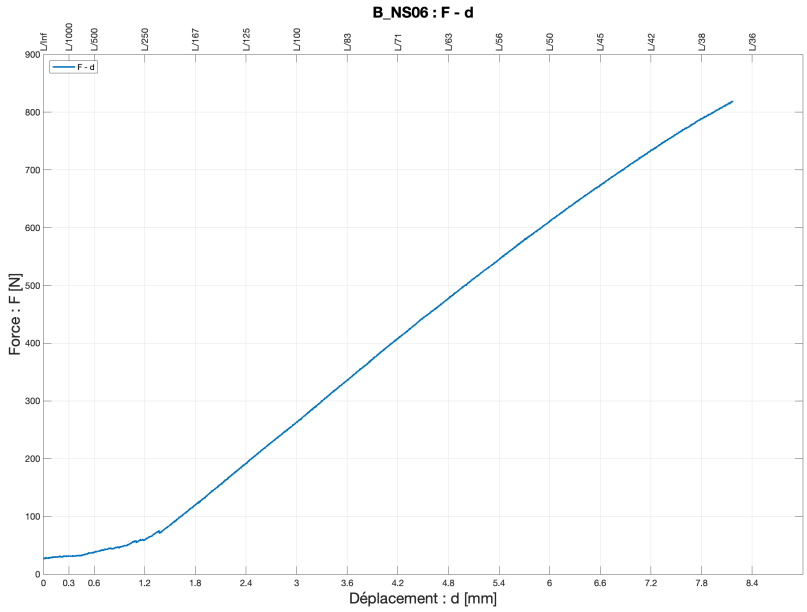


Figure M.141 – Comportement global de l'éprouvette NS06 de la batterie 2

Éprouvette NS07

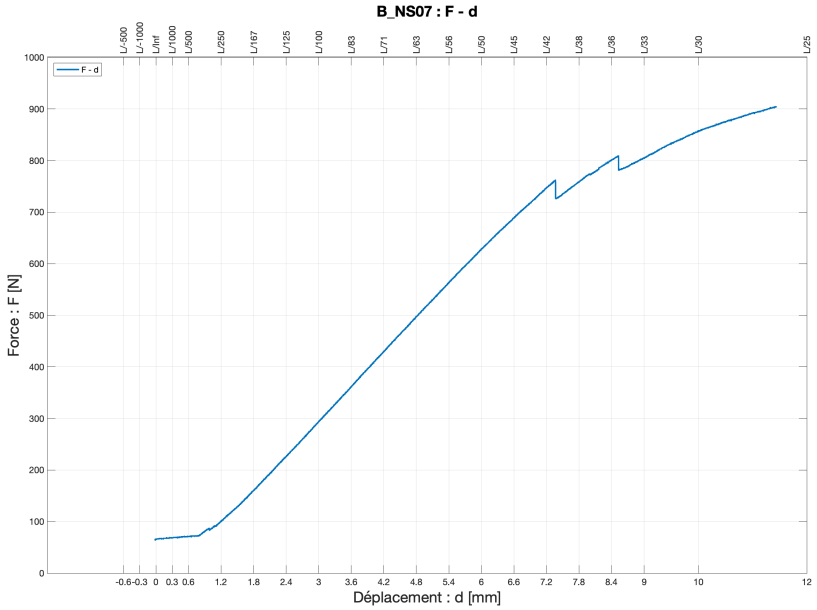


FIGURE M.142 – Comportement global de l'éprouvette NS07 de la batterie 2

Éprouvette NS08

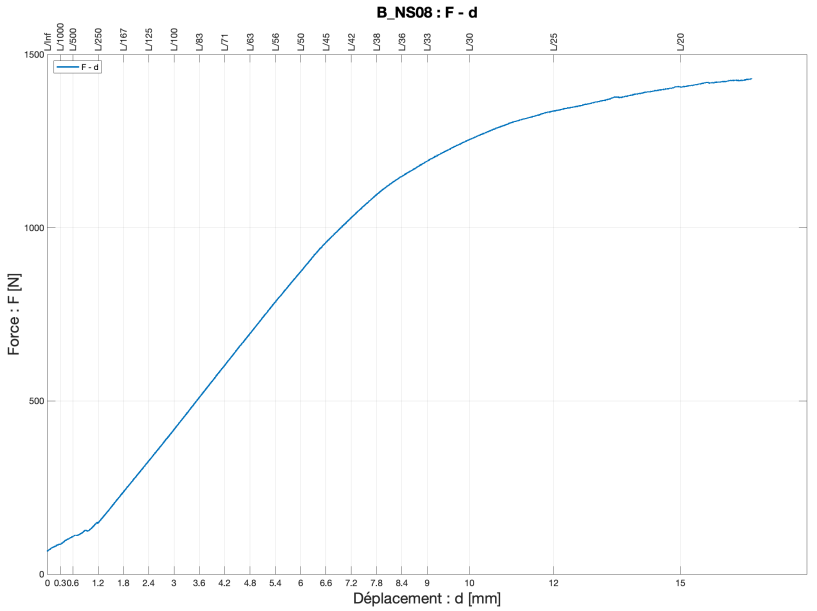


FIGURE M.143 – Comportement global de l'éprouvette NS08 de la batterie 2

Éprouvette NS09

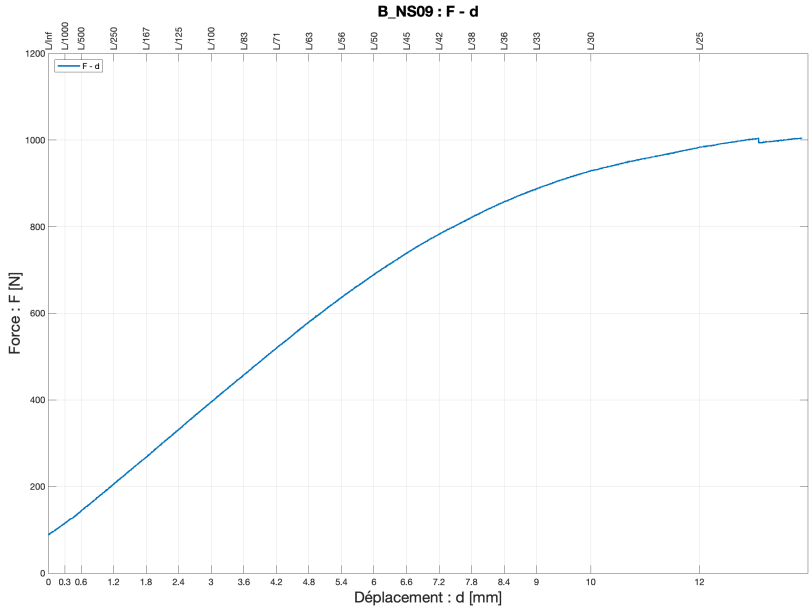


Figure M.144 – Comportement global de l'éprouvette NS09 de la batterie 2

Éprouvette NS10

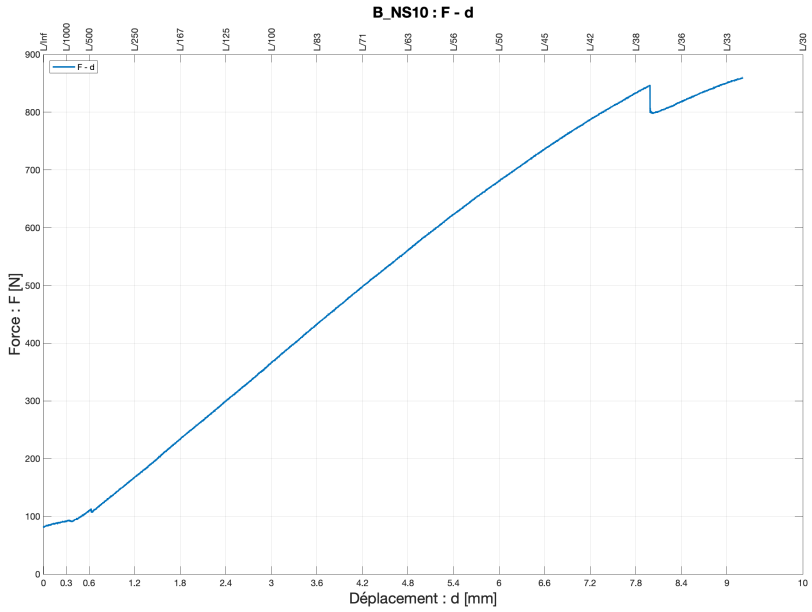


Figure M.145 – Comportement global de l'éprouvette NS10 de la batterie 2

Éprouvette NS11

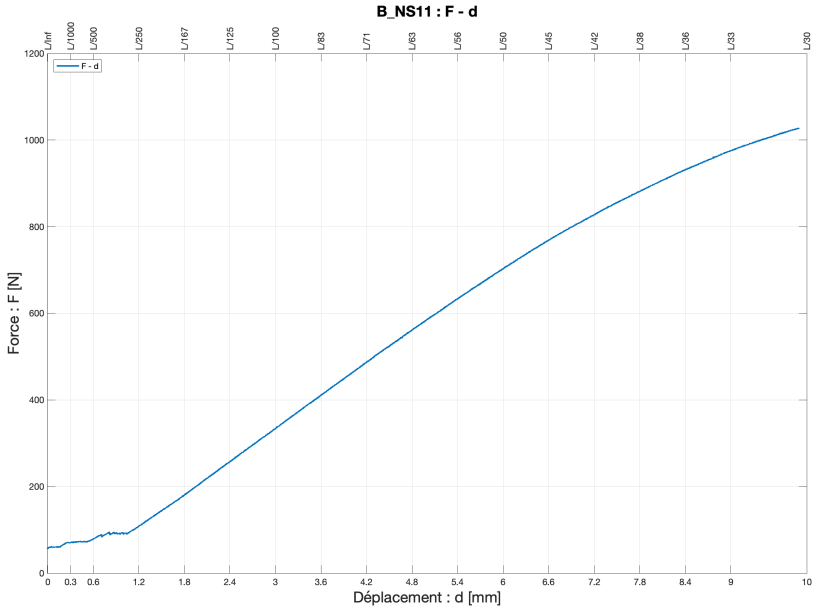


FIGURE M.146 – Comportement global de l'éprouvette NS11 de la batterie 2

Éprouvette NS12

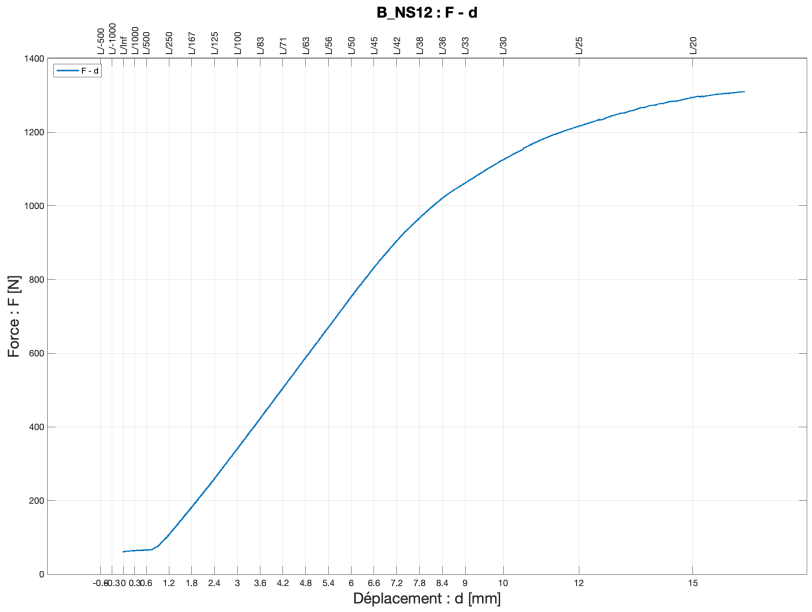


FIGURE M.147 – Comportement global de l'éprouvette NS12 de la batterie 2

Éprouvette NS13

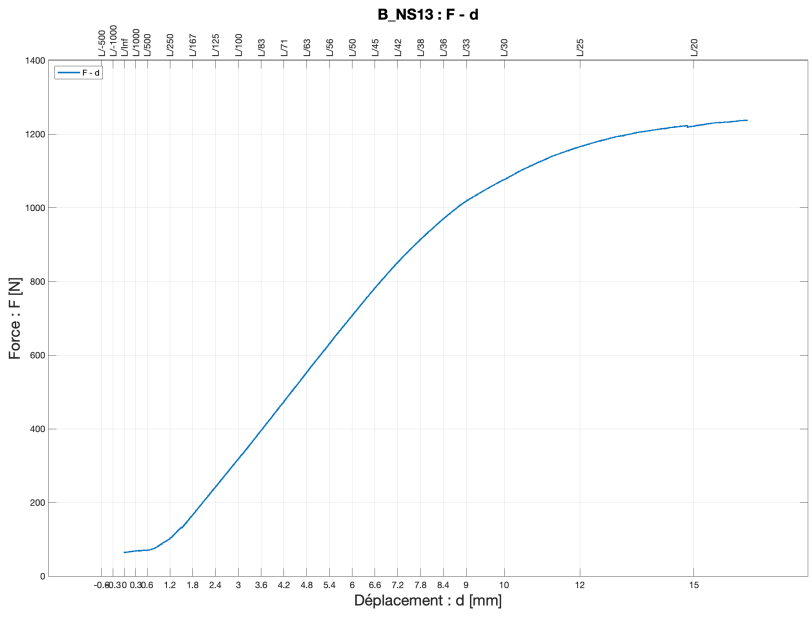


Figure M.148 – Comportement global de l'éprouvette NS13 de la batterie 2

M.3 Batterie 3 : Délai entre deux cycles

Éprouvette C_A2_dt000

Global

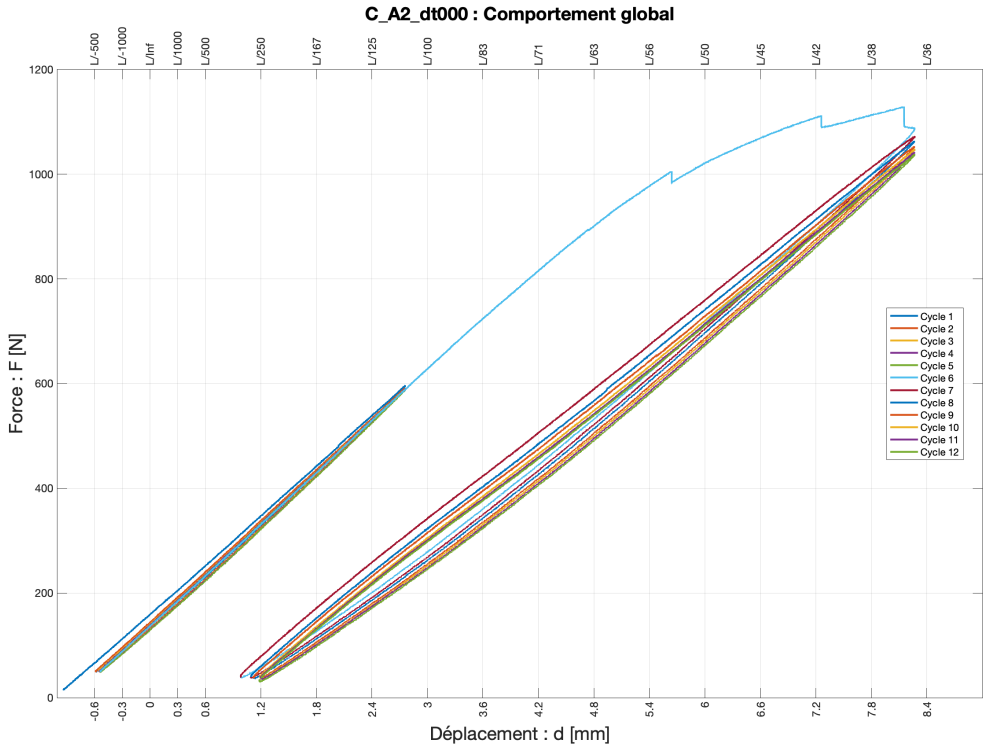


FIGURE M.149 – Comportement global de l'éprouvette C_A2_dt000 de la batterie 3

Déplacement résiduel

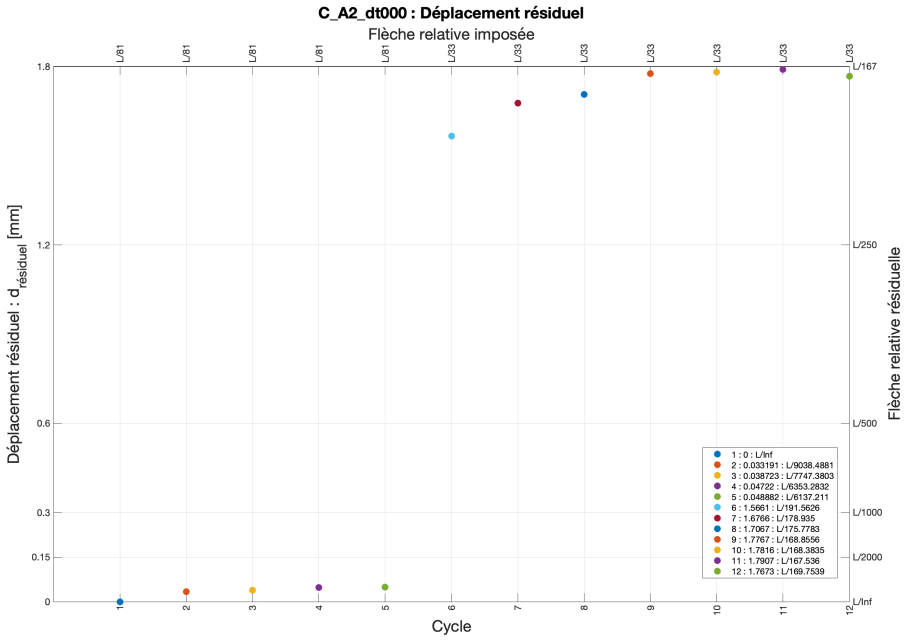


Figure M.150 – Déplacement résiduel de l'éprouvette C_A2_dt000 de la batterie 3

Force maximale

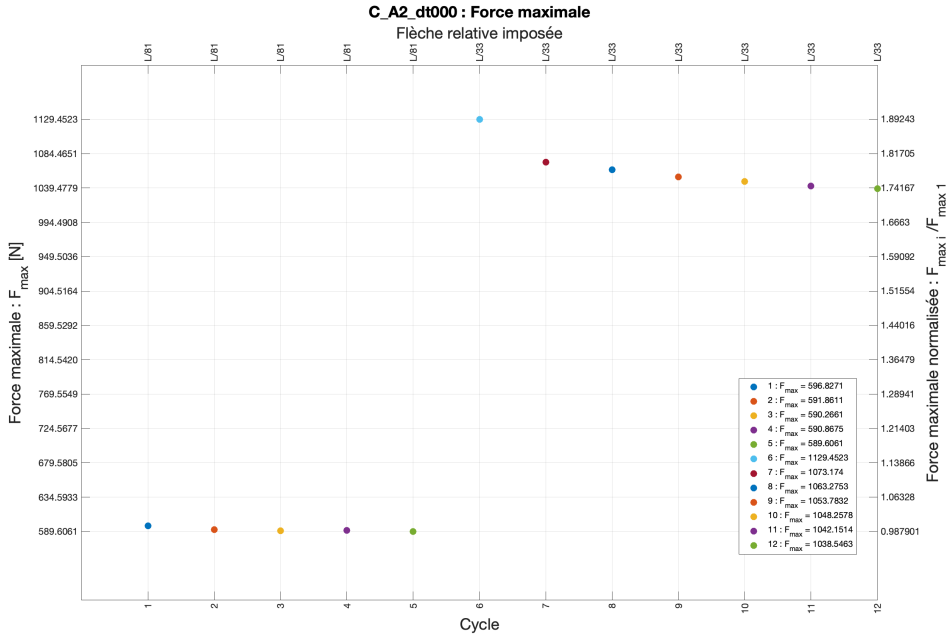


Figure M.151 – Force maximale de l'éprouvette C_A2_dt000 de la batterie 3

Module de Young

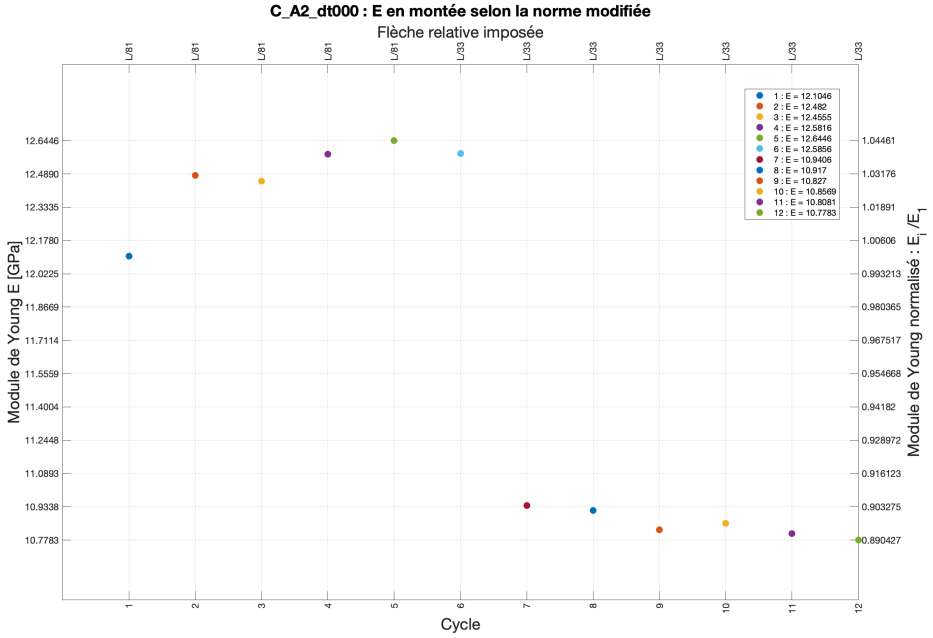


FIGURE M.152 – Module de Young en montée de l'éprouvette C_A2_dt000 de la batterie 3

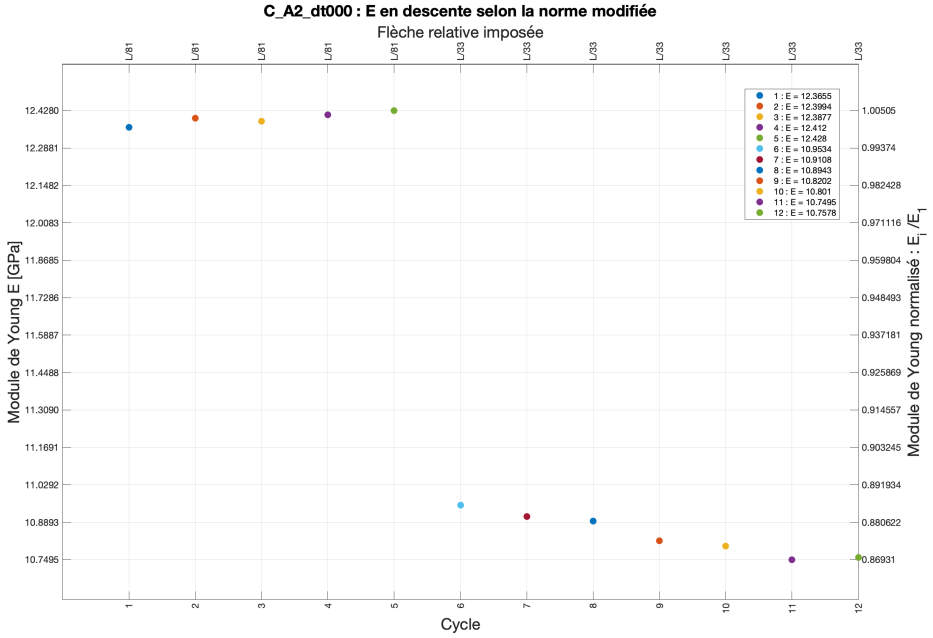


FIGURE M.153 – Module de Young en descente de l'éprouvette C_A2_dt000 de la batterie 3

Rigidité flexionnelle

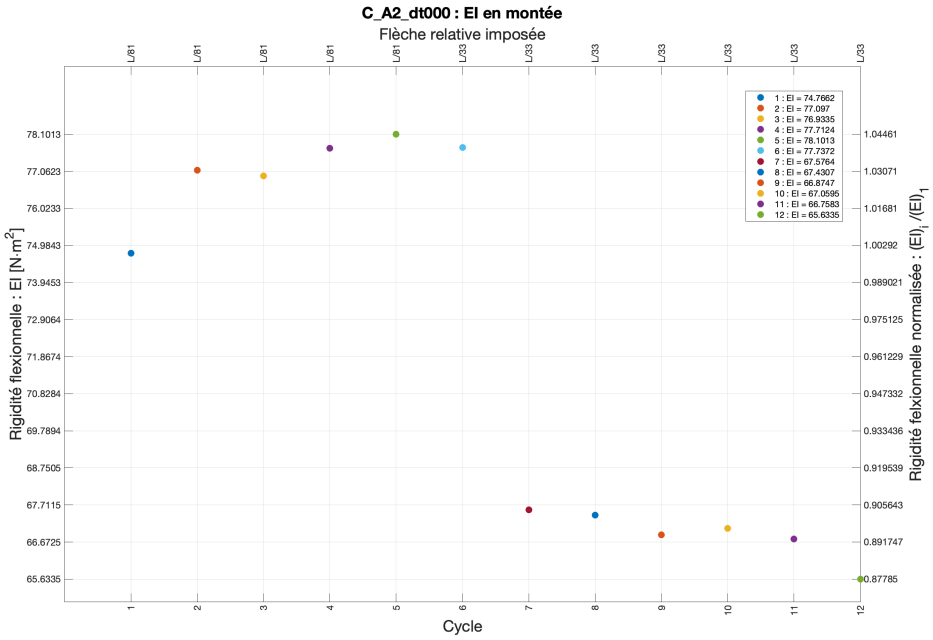


Figure M.154 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette C_A2_dt000 de la batterie 3

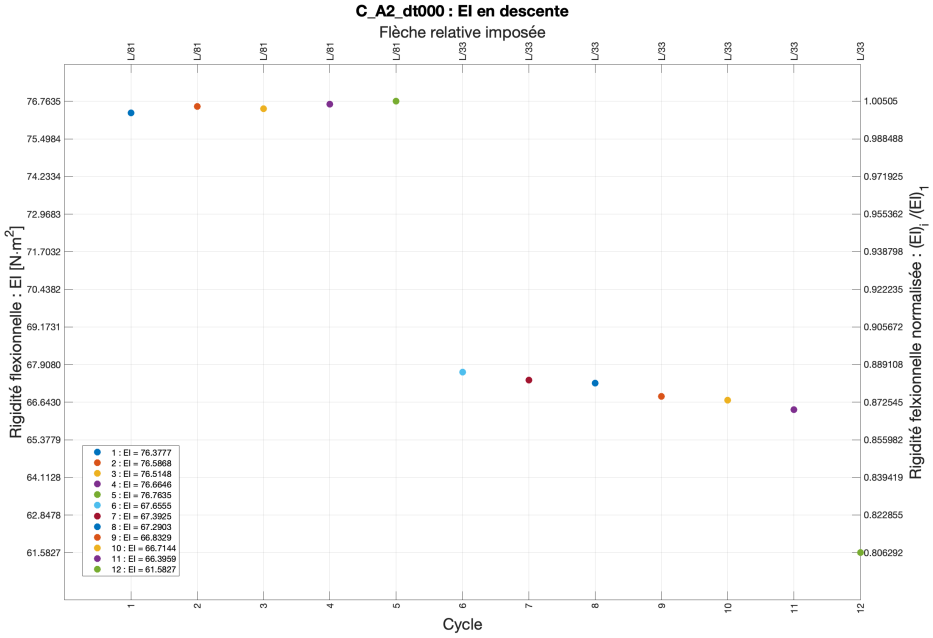


Figure M.155 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette C_A2_dt000 de la batterie 3

Fonction S

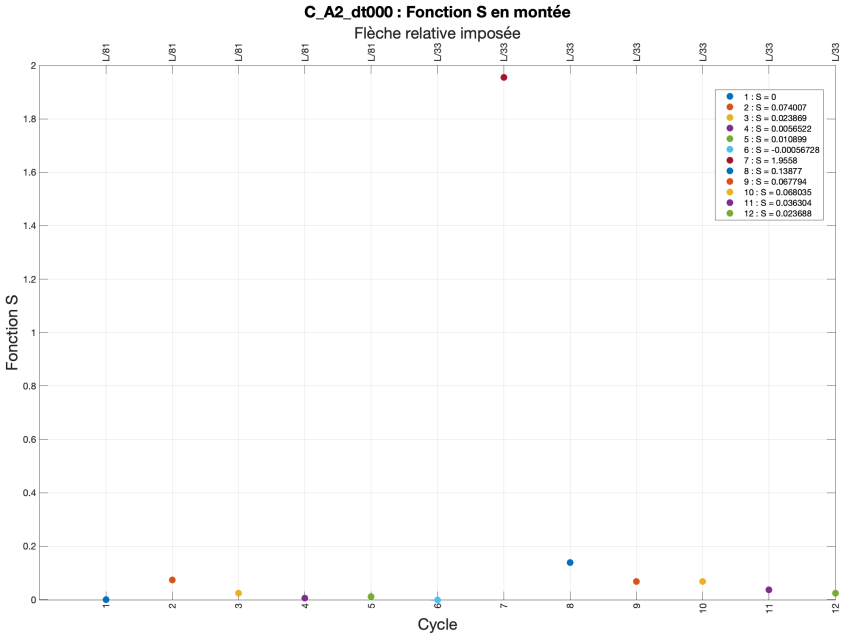


FIGURE M.156 – Fonction S en montée de l'éprouvette C_A2_dt000 de la batterie 3

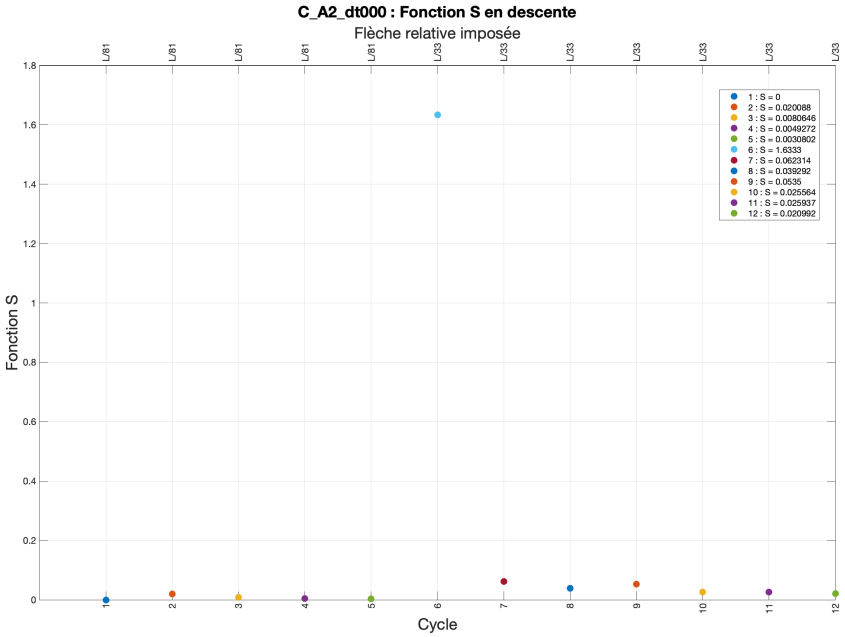


FIGURE M.157 – Fonction S en descente de l'éprouvette C_A2_dt000 de la batterie 3

Chargement statique *a posteriori*

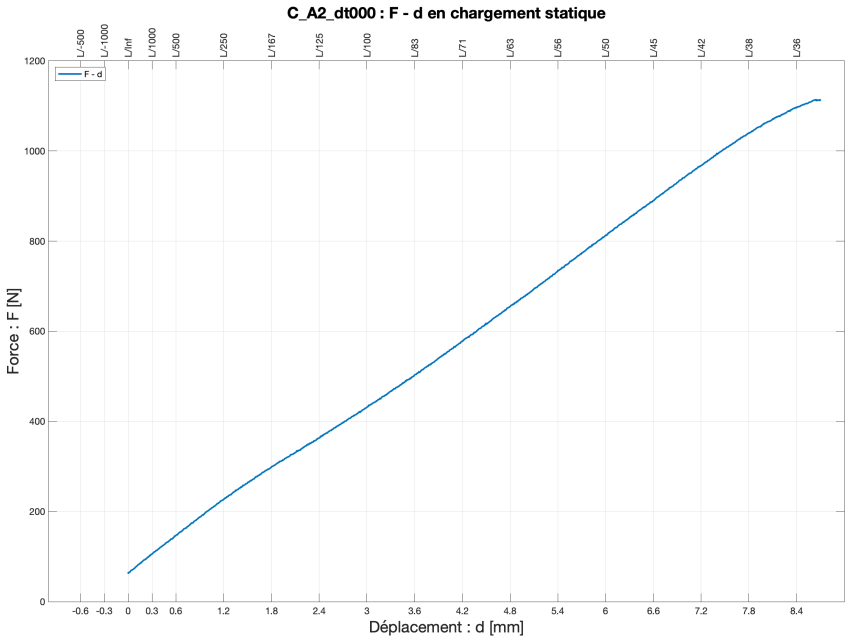


Figure M.158 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette C_A2_dt000 de la batterie 3

Éprouvette C_A2_dt300

Global

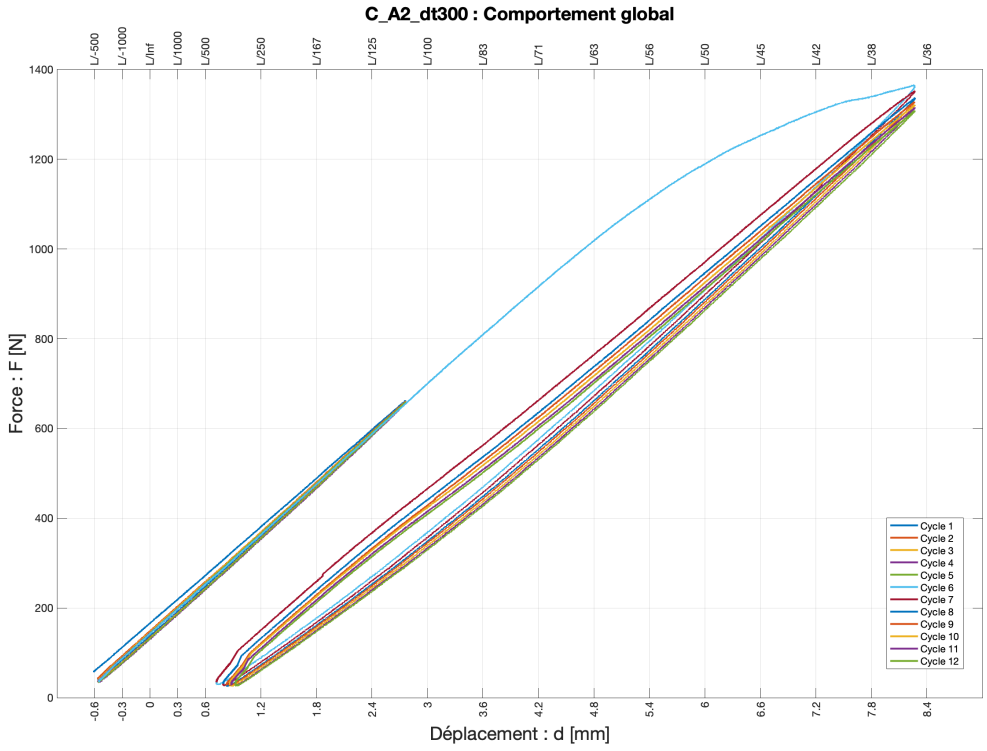


FIGURE M.159 – Comportement global de l'éprouvette C_A2_dt300 de la batterie 3

Déplacement résiduel

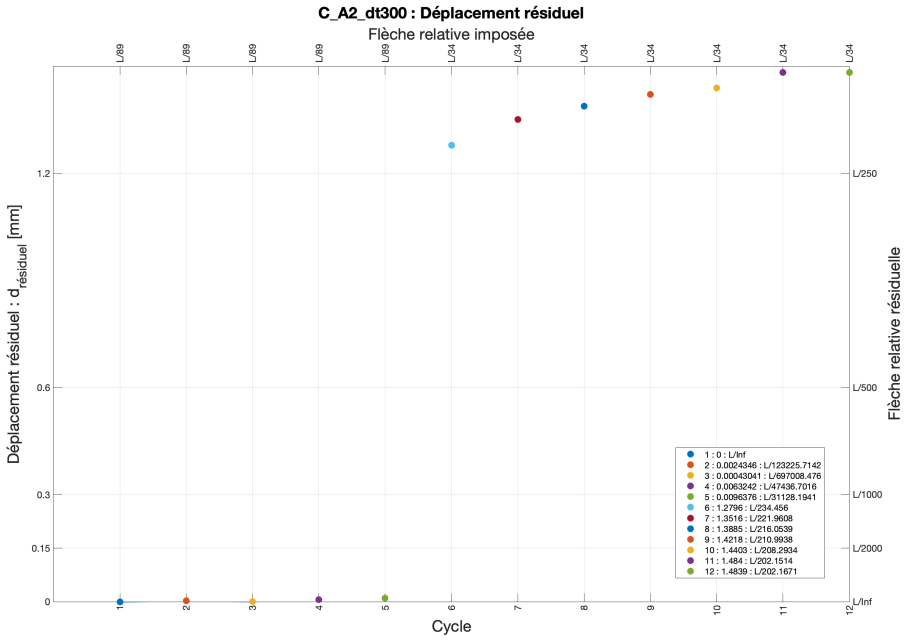


Figure M.160 – Déplacement résiduel de l'éprouvette C_A2_dt300 de la batterie 3

Force maximale

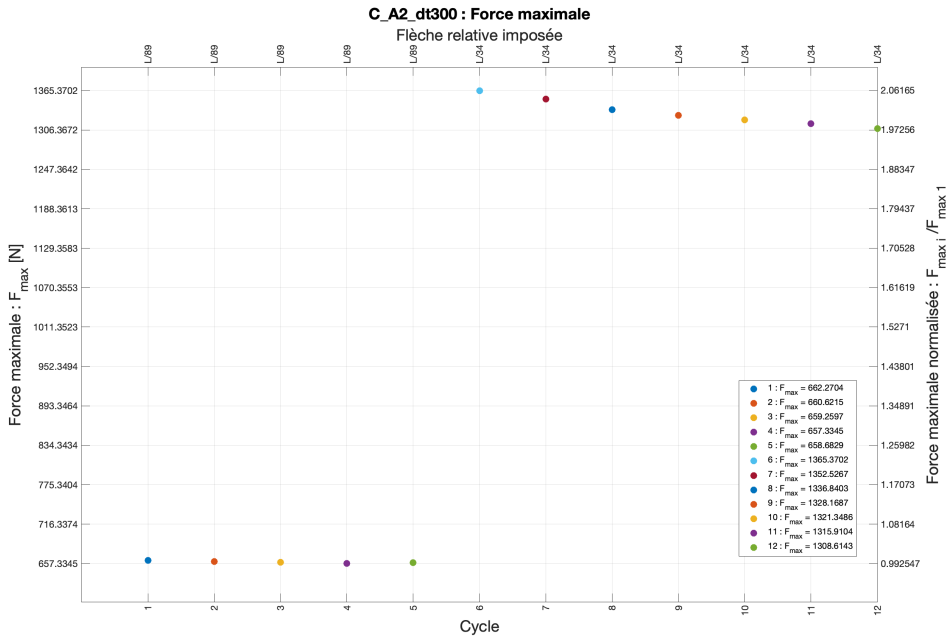


Figure M.161 – Force maximale de l'éprouvette C_A2_dt300 de la batterie 3

Module de Young

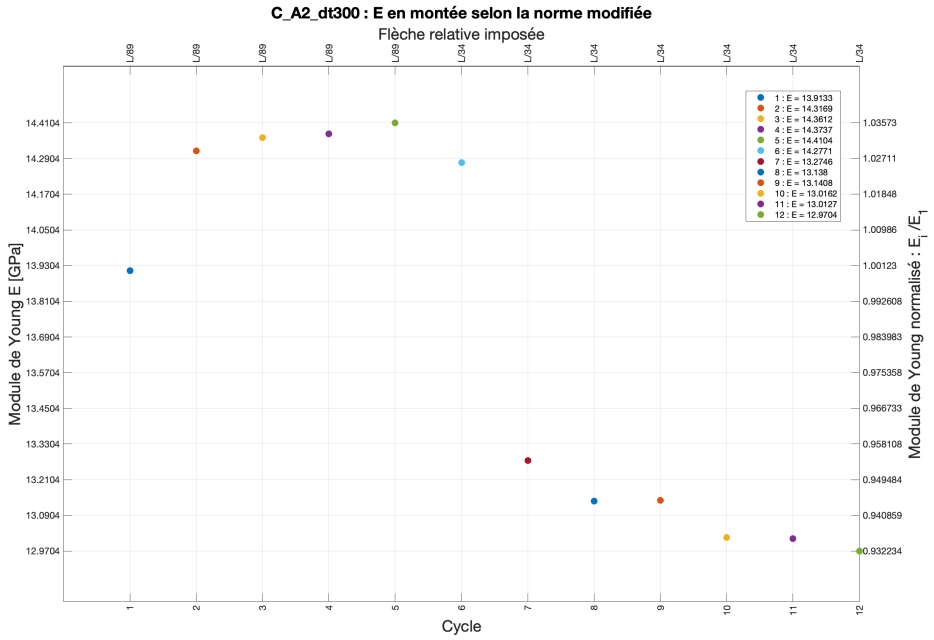


FIGURE M.162 – Module de Young en montée de l'éprouvette C_A2_dt300 de la batterie 3

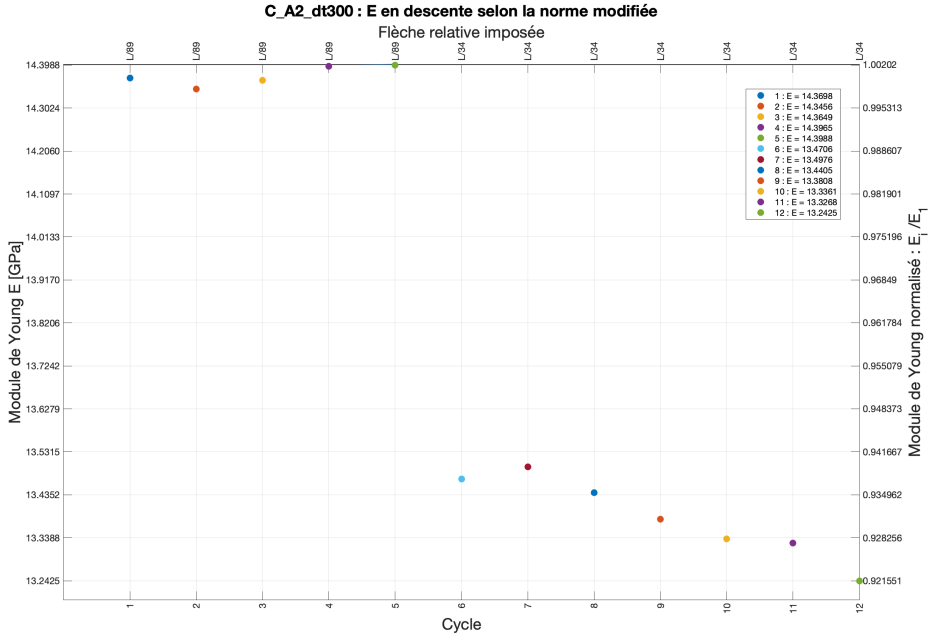


FIGURE M.163 – Module de Young en descente de l'éprouvette C_A2_dt300 de la batterie 3

Rigidité flexionnelle

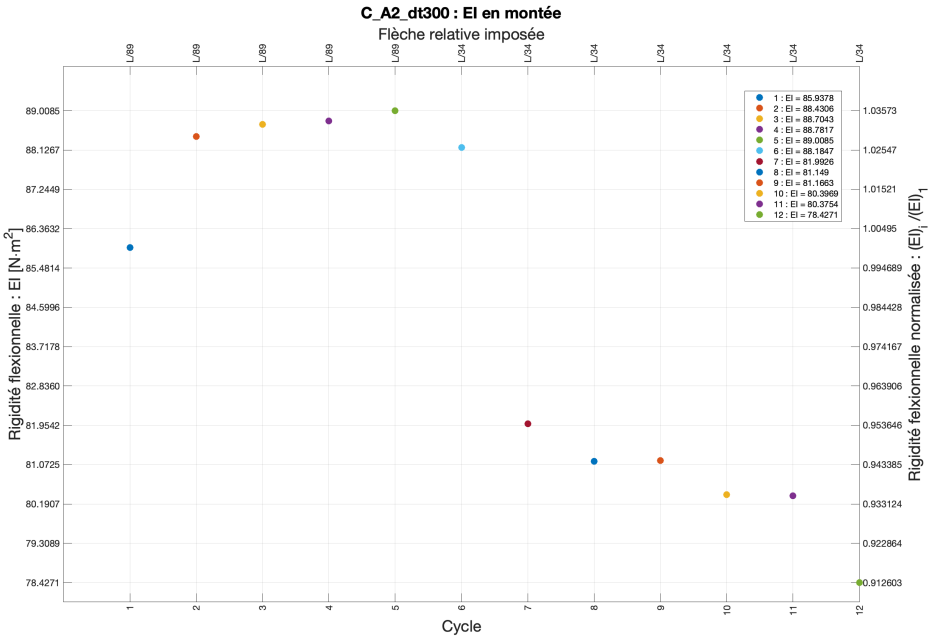


Figure M.164 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette C_A2_dt300 de la batterie 3

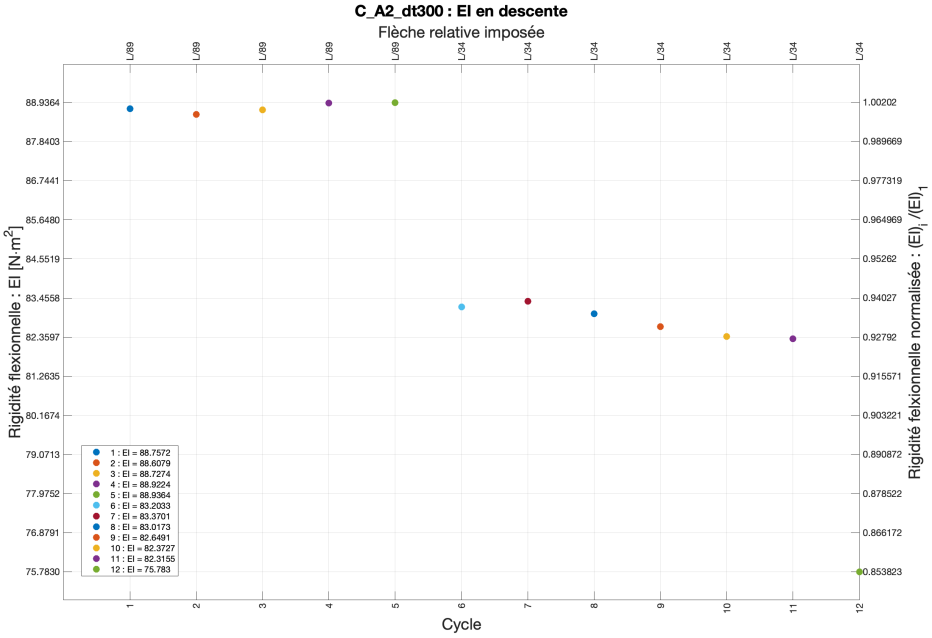


Figure M.165 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette C_A2_dt300 de la batterie 3

Fonction S

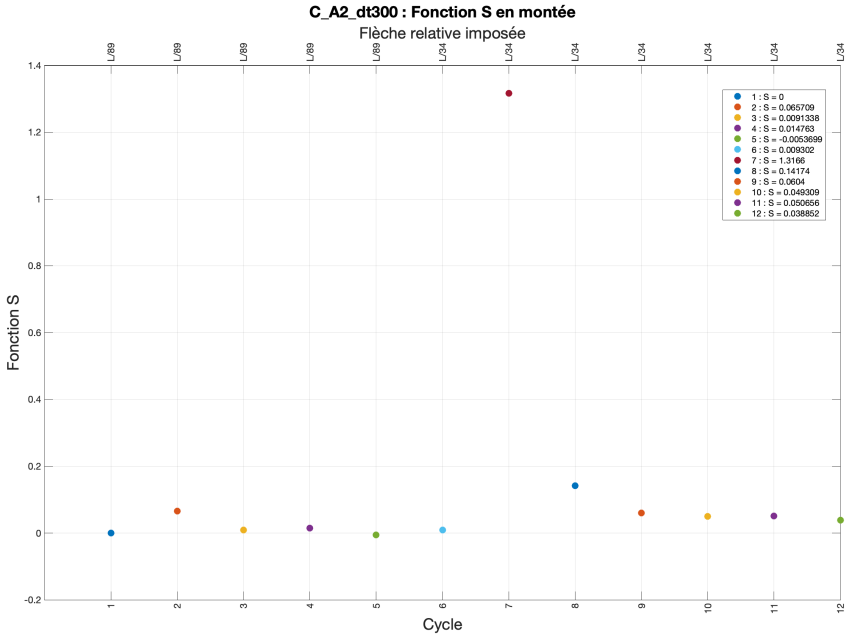


FIGURE M.166 – Fonction S en montée de l'éprouvette C_A2_dt300 de la batterie 3

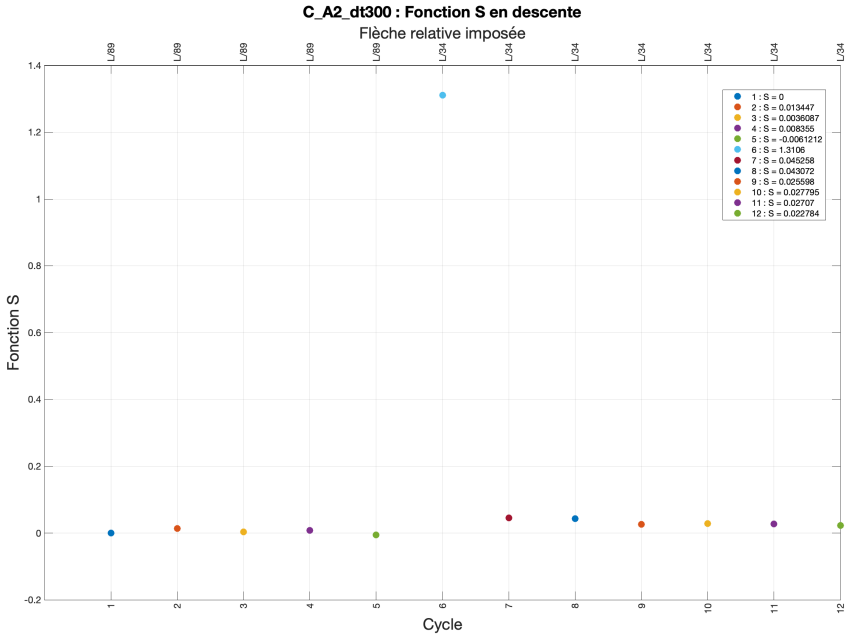


FIGURE M.167 – Fonction S en descente de l'éprouvette C_A2_dt300 de la batterie 3

Chargement statique *a posteriori*

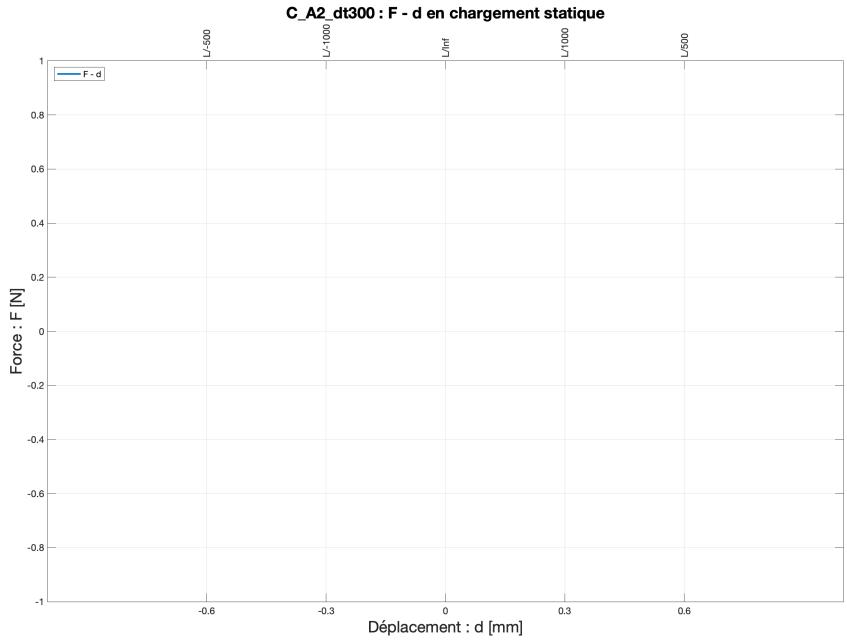


Figure M.168 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette C_A2_dt300 de la batterie 3

Éprouvette C_C3_dt000

Global

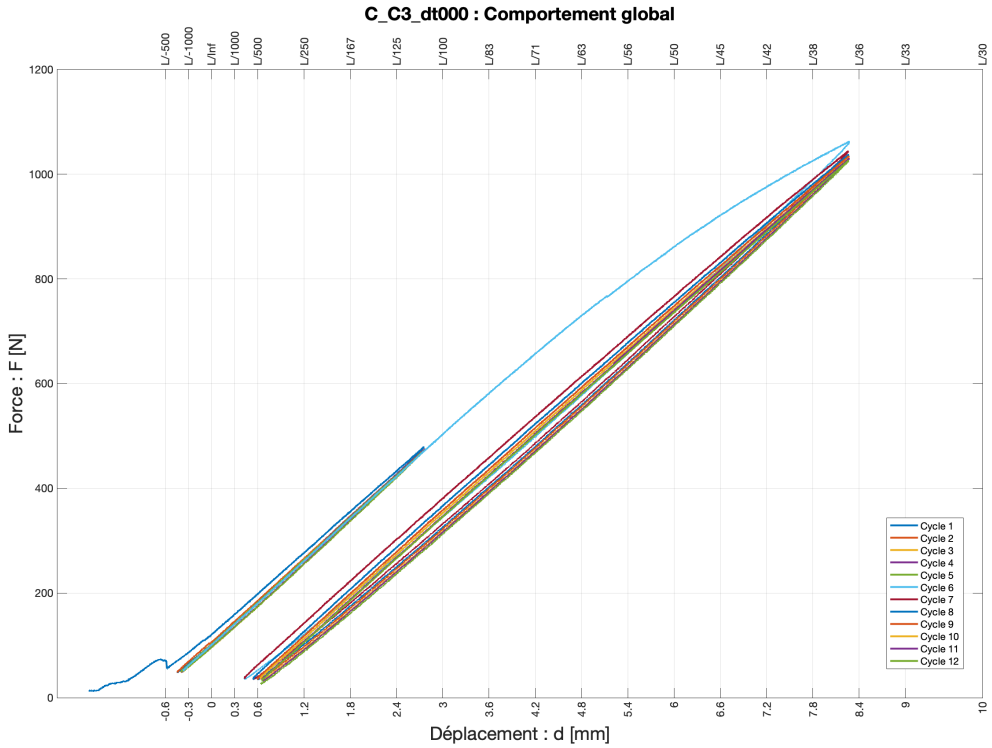


FIGURE M.169 – Comportement global de l'éprouvette C_C3_dt000 de la batterie 3

Déplacement résiduel

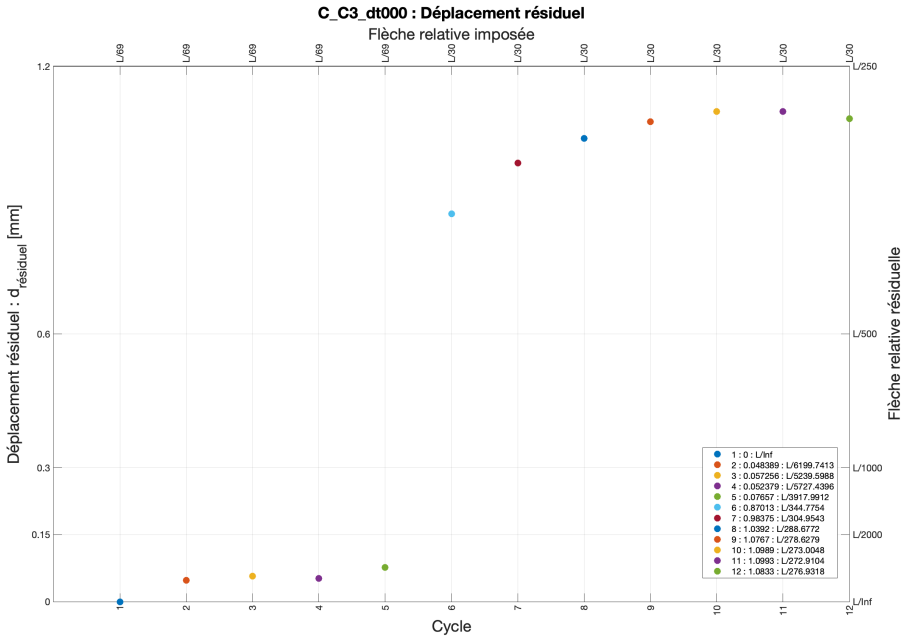


Figure M.170 – Déplacement résiduel de l'éprouvette C_C3_dt000 de la batterie 3

Force maximale

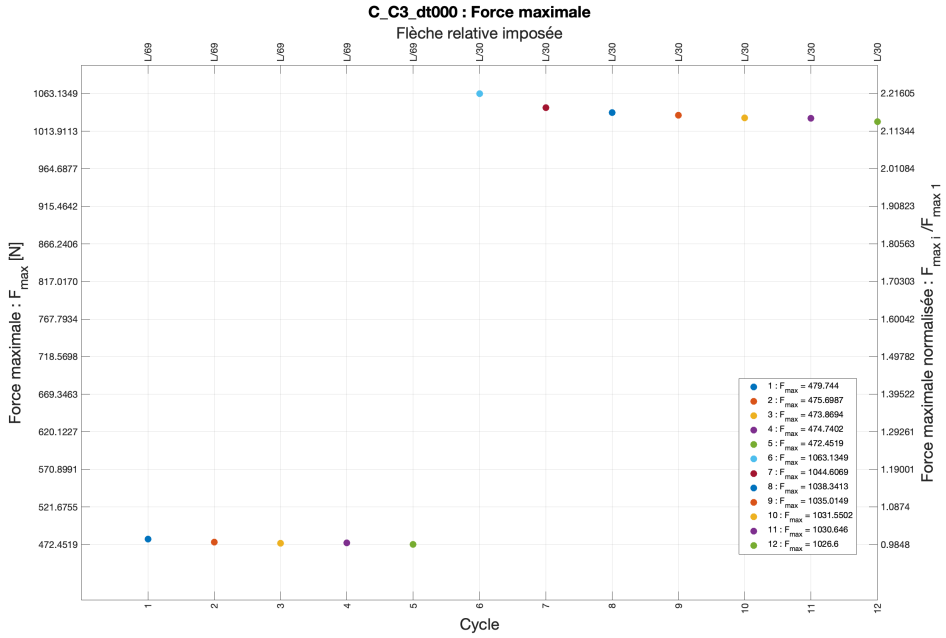


Figure M.171 – Force maximale de l'éprouvette C_C3_dt000 de la batterie 3

Module de Young

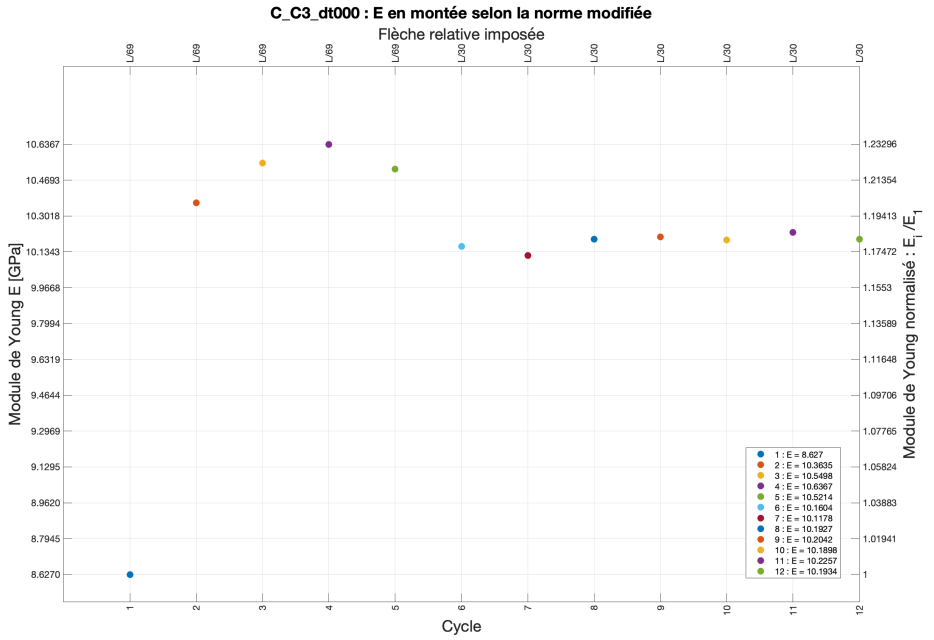


FIGURE M.172 – Module de Young en montée de l'éprouvette C_C3_dt000 de la batterie 3

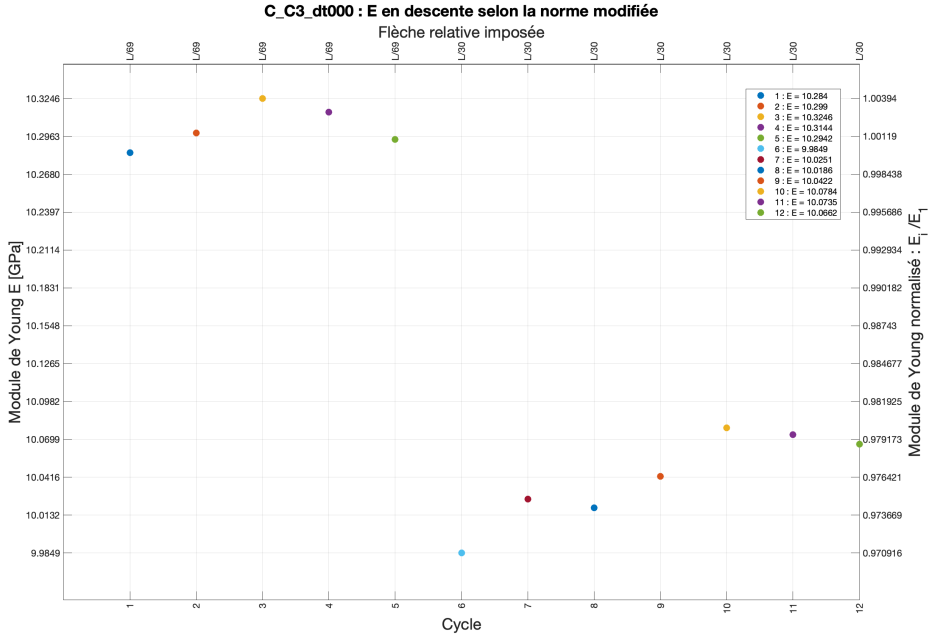


FIGURE M.173 – Module de Young en descente de l'éprouvette C_C3_dt000 de la batterie 3

Rigidité flexionnelle

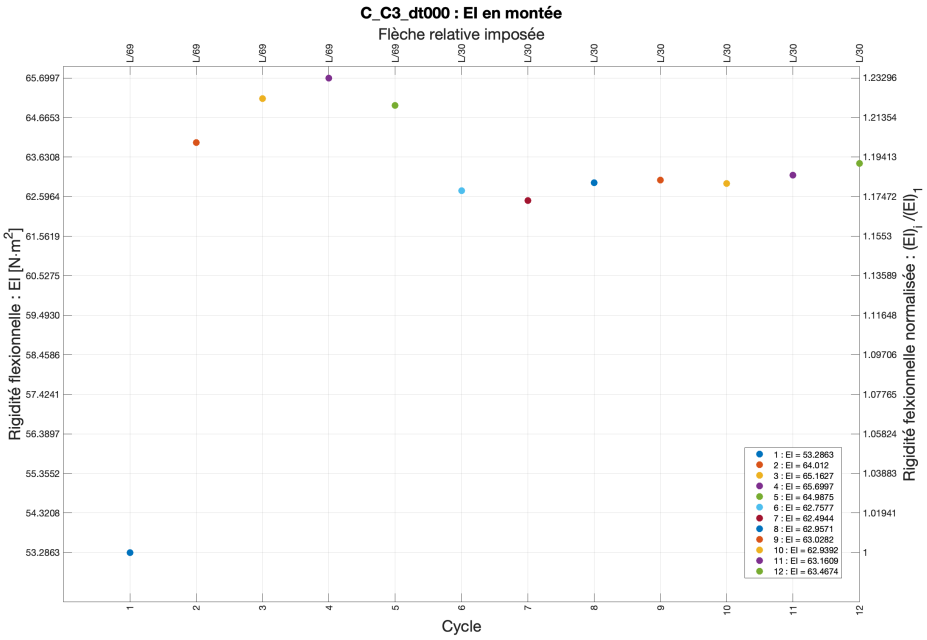


Figure M.174 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette C_C3_dt000 de la batterie 3

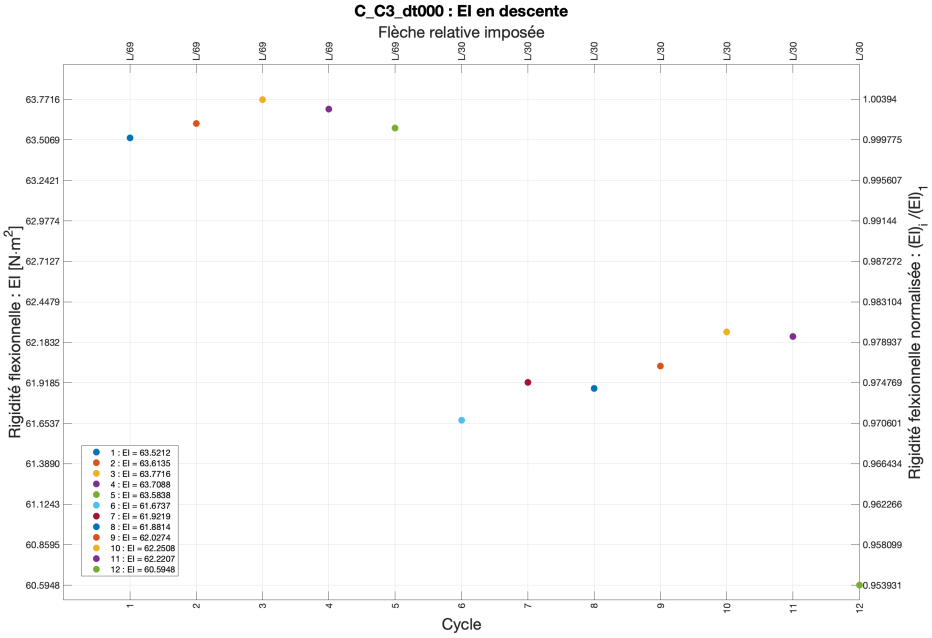


Figure M.175 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette C_C3_dt000 de la batterie 3

Fonction S

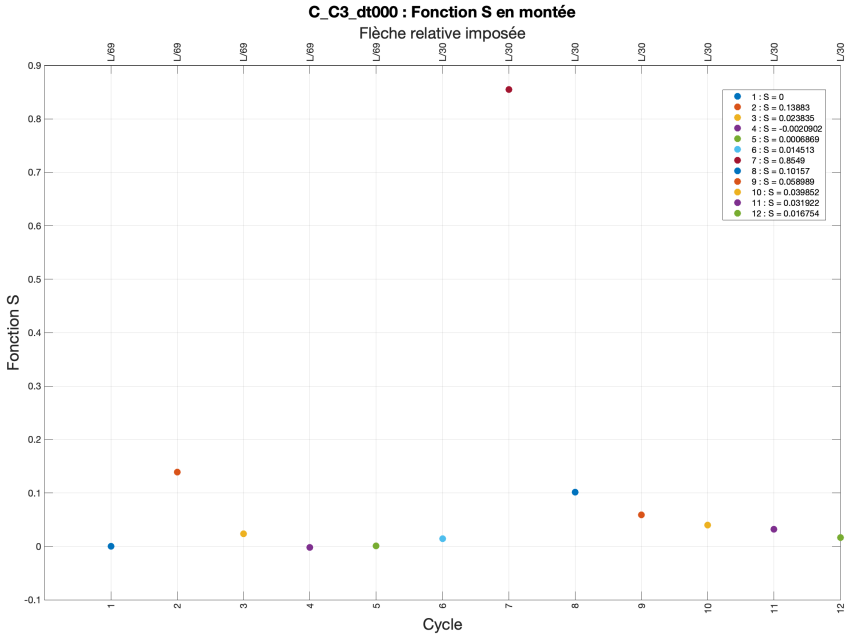


FIGURE M.176 – Fonction S en montée de l'éprouvette C_C3_dt000 de la batterie 3

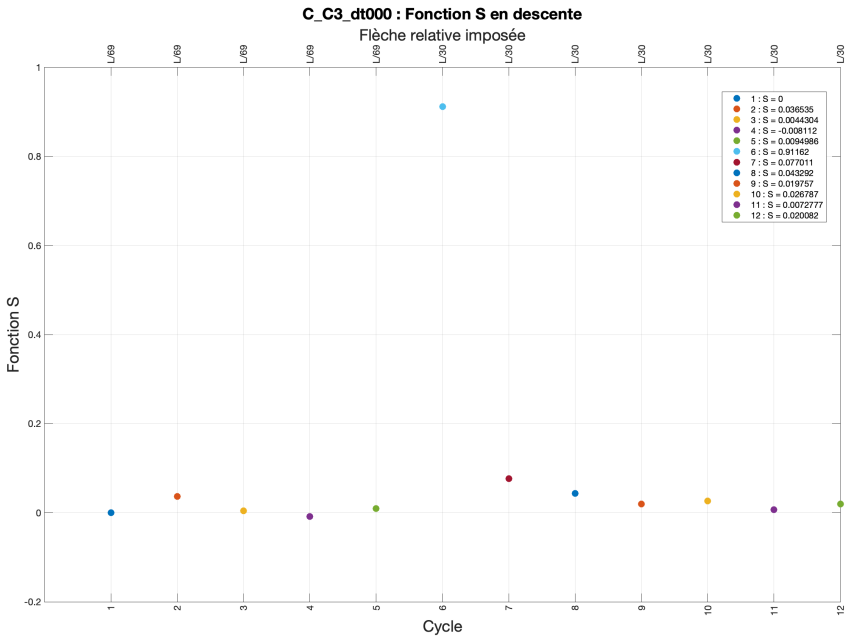


FIGURE M.177 – Fonction S en descente de l'éprouvette C_C3_dt000 de la batterie 3

Chargement statique *a posteriori*

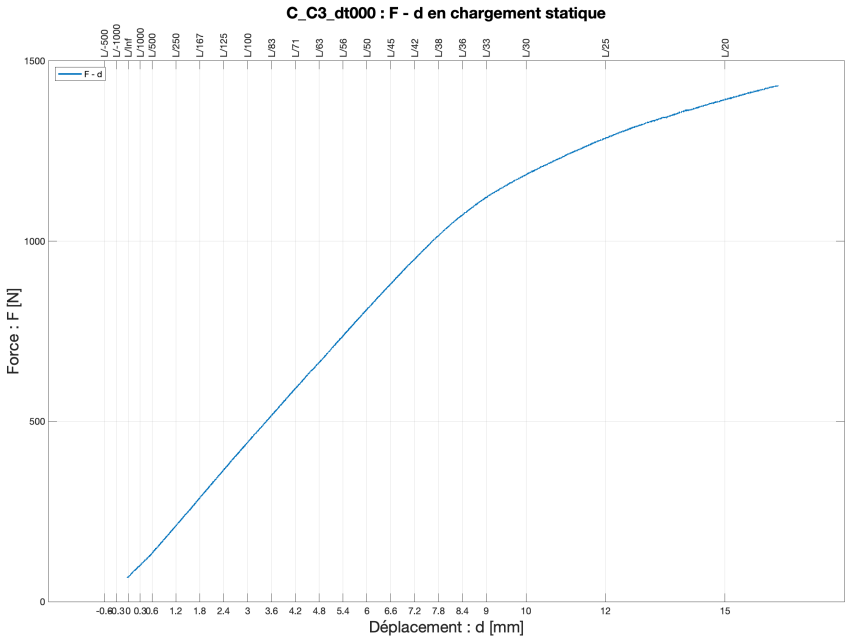


Figure M.178 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette C_C3_dt000 de la batterie 3

Éprouvette C_C3_dt300

Global

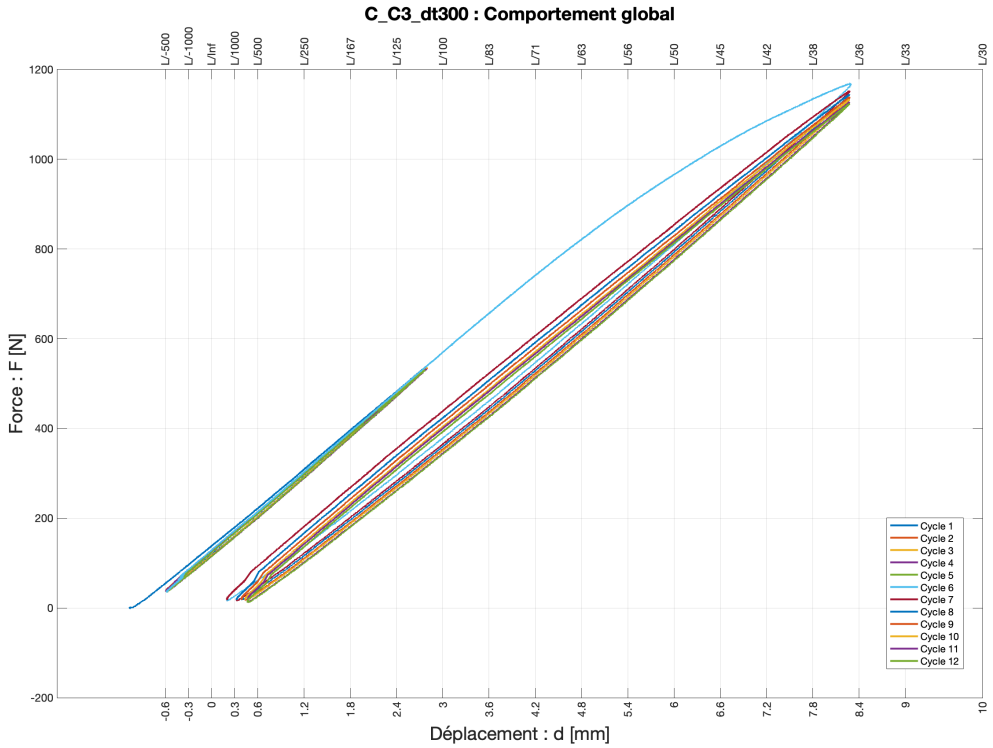


FIGURE M.179 – Comportement global de l'éprouvette C_C3_dt300 de la batterie 3

Déplacement résiduel

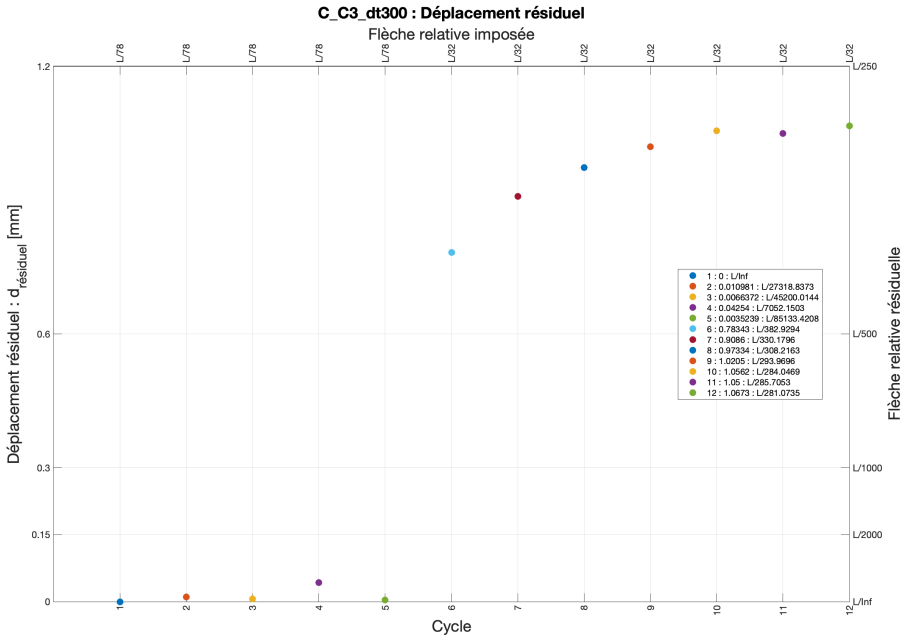


Figure M.180 – Déplacement résiduel de l'éprouvette C_C3_dt300 de la batterie 3

Force maximale

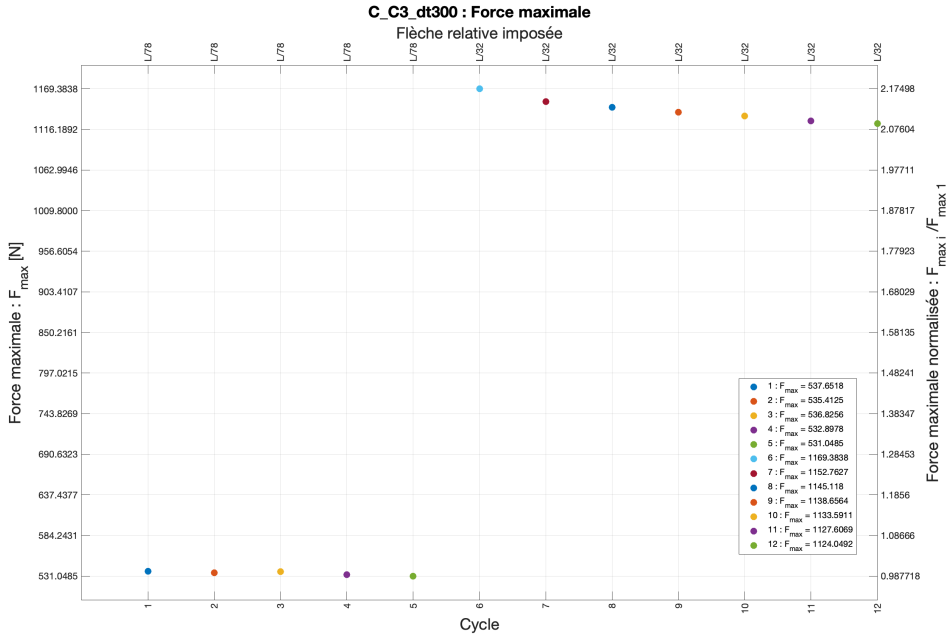


Figure M.181 – Force maximale de l'éprouvette C_C3_dt300 de la batterie 3

Module de Young

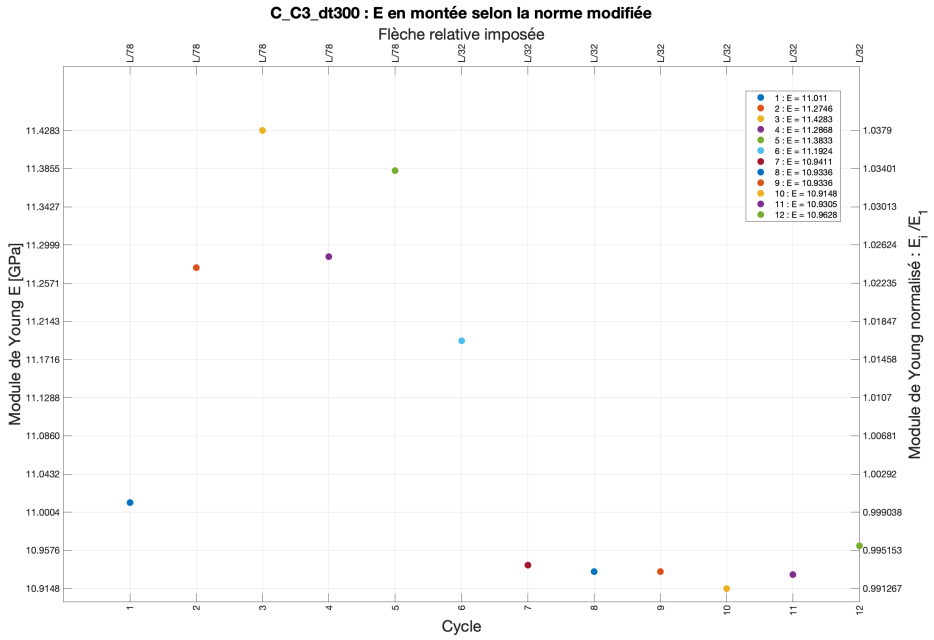


FIGURE M.182 – Module de Young en montée de l'éprouvette C_C3_dt300 de la batterie 3

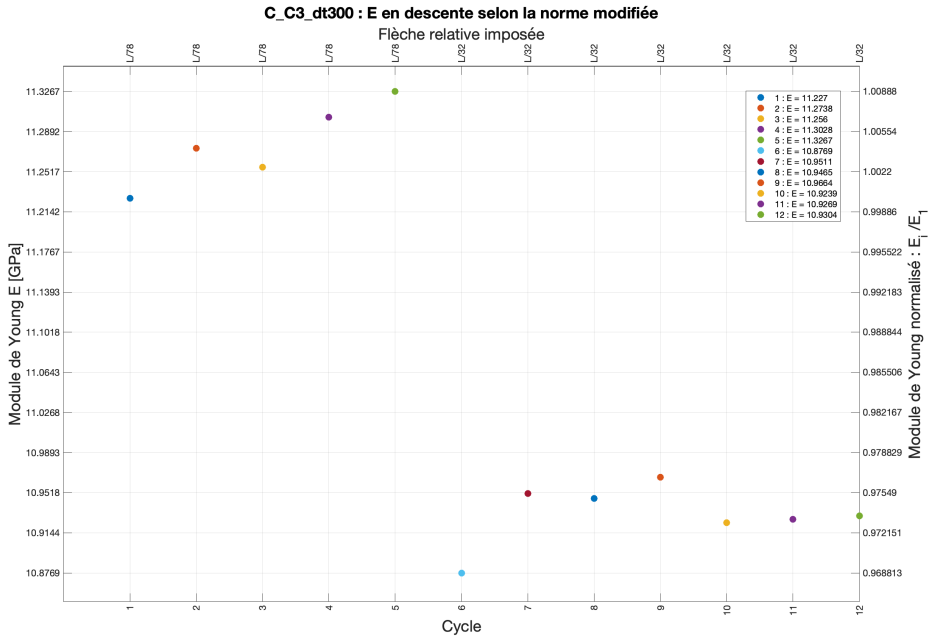


FIGURE M.183 – Module de Young en descente de l'éprouvette C_C3_dt300 de la batterie 3

Rigidité flexionnelle

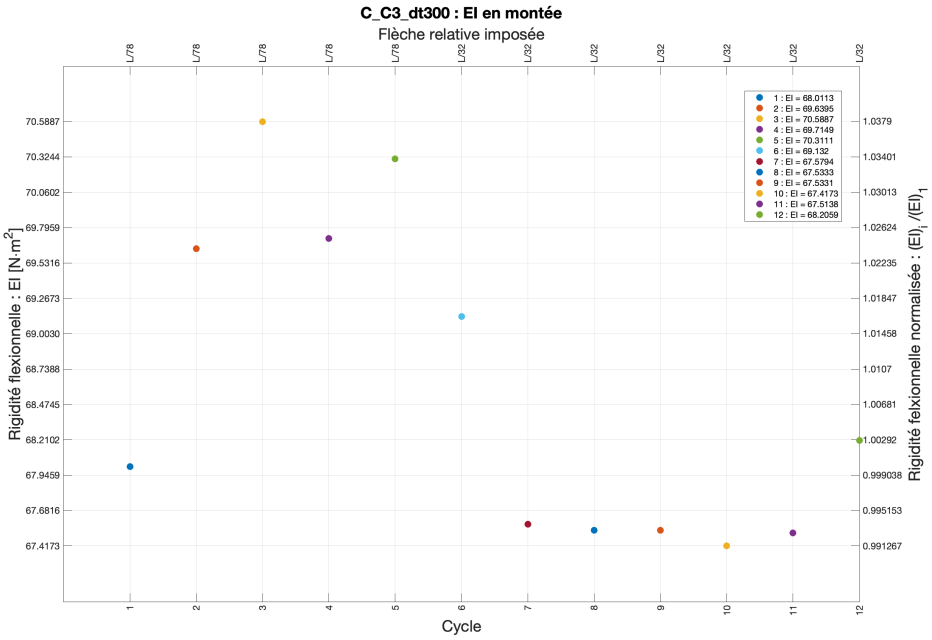


Figure M.184 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette C_C3_dt300 de la batterie 3

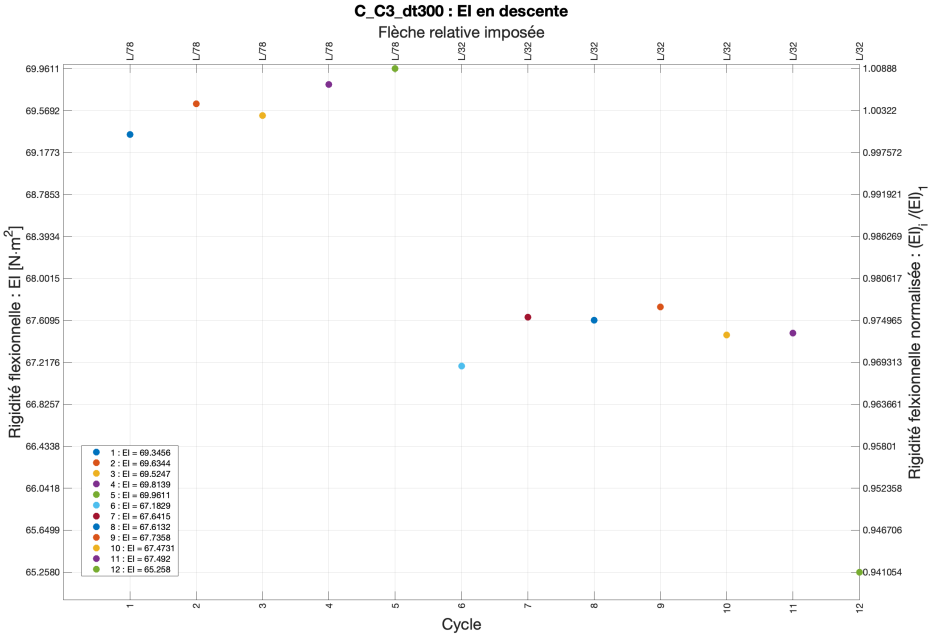


Figure M.185 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette C_C3_dt300 de la batterie 3

Fonction S

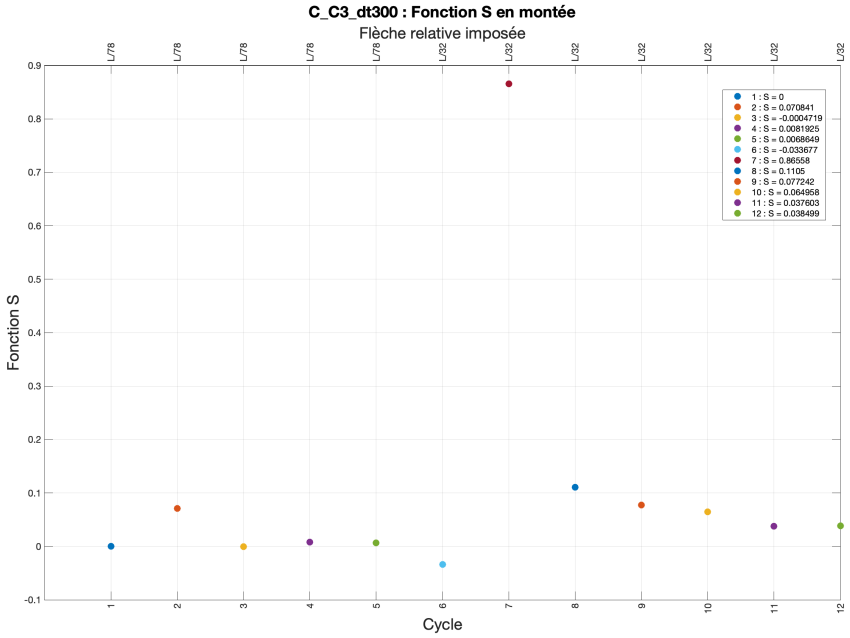


FIGURE M.186 – Fonction S en montée de l'éprouvette C_C3_dt300 de la batterie 3

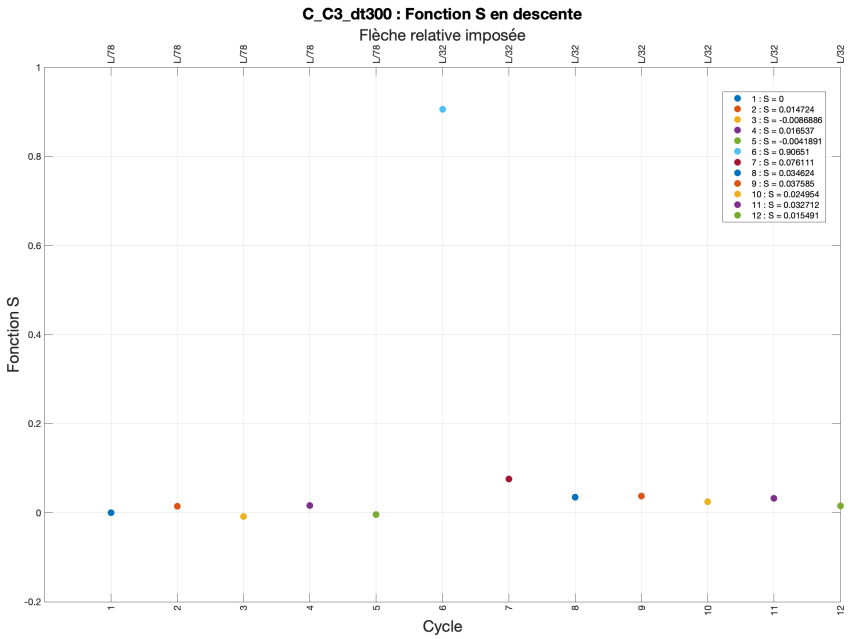


FIGURE M.187 – Fonction S en descente de l'éprouvette C_C3_dt300 de la batterie 3

Chargement statique *a posteriori*

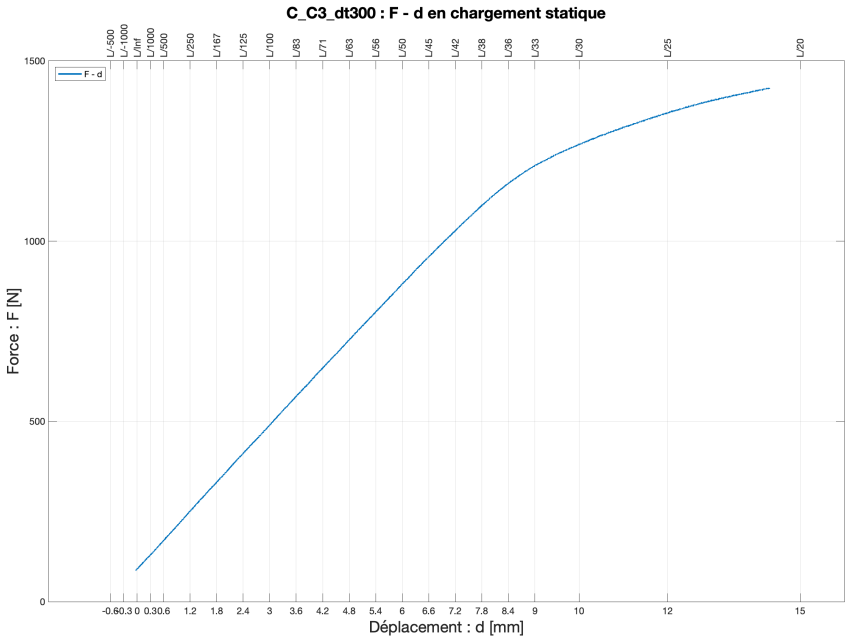


Figure M.188 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette C_C3_dt300 de la batterie 3

Éprouvette C_C5_dt000

Global

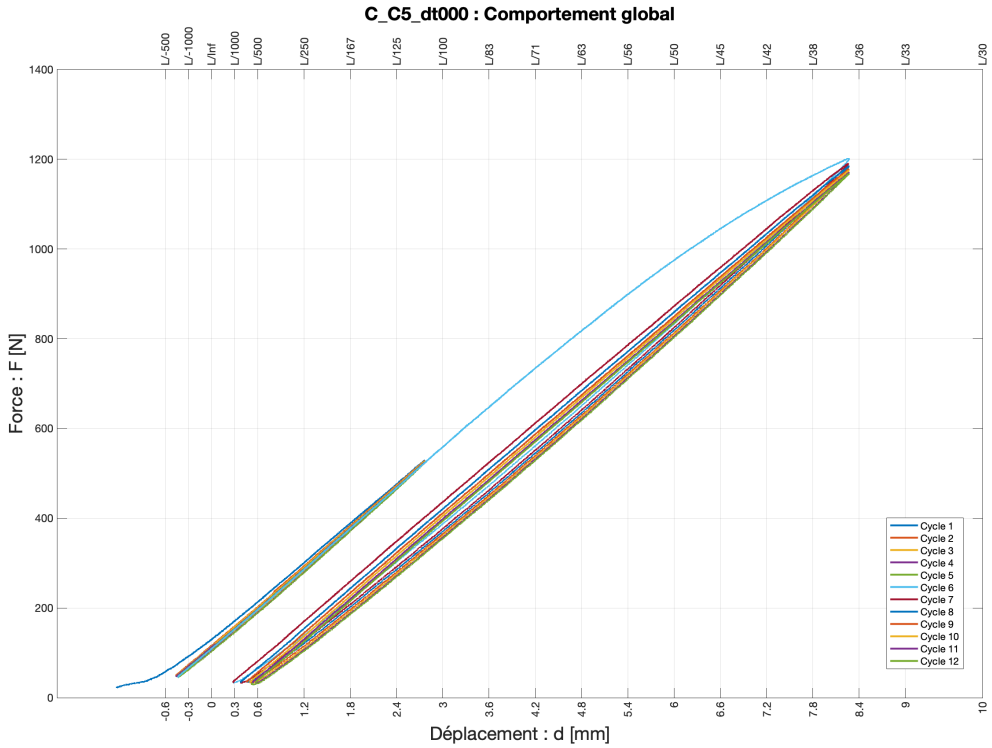


FIGURE M.189 – Comportement global de l'éprouvette C_C5_dt000 de la batterie 3

Déplacement résiduel

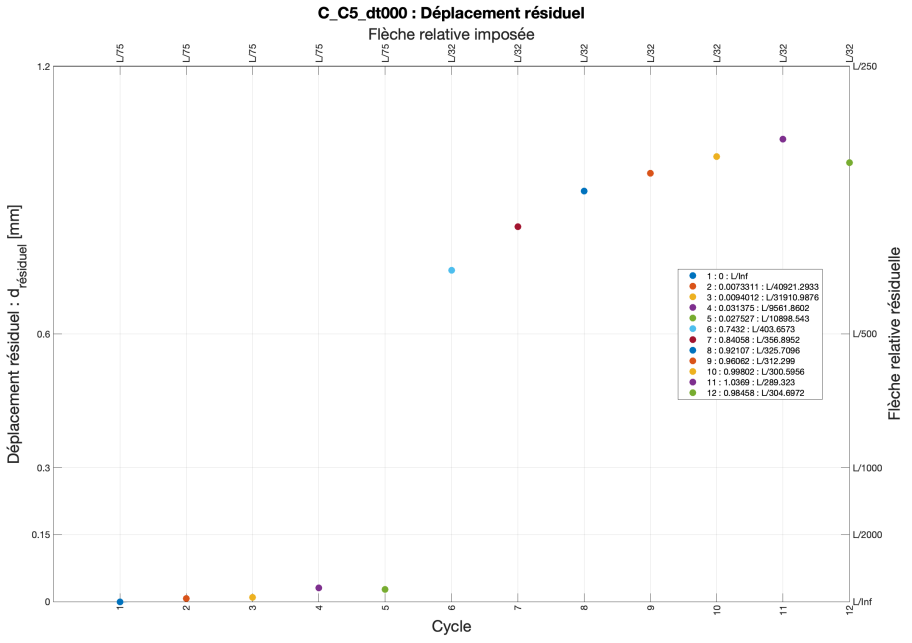


Figure M.190 – Déplacement résiduel de l'éprouvette C_C5_dt000 de la batterie 3

Force maximale

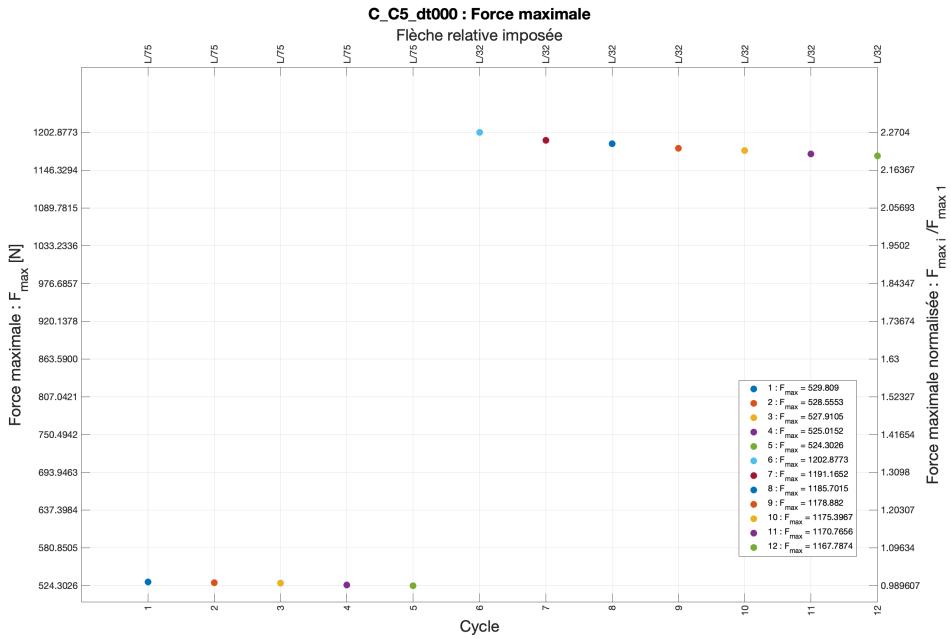


Figure M.191 – Force maximale de l'éprouvette C_C5_dt000 de la batterie 3

Module de Young

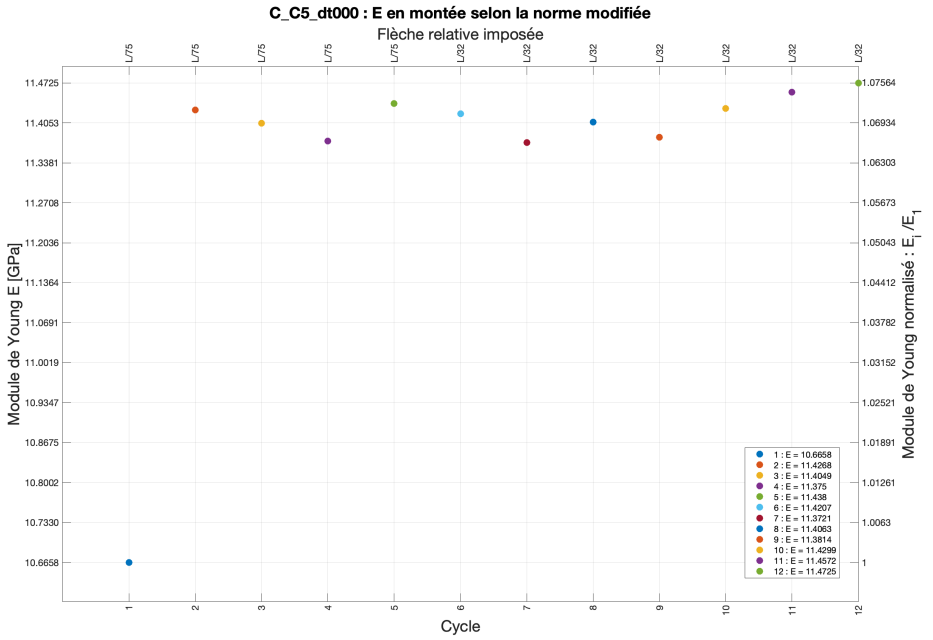


FIGURE M.192 – Module de Young en montée de l'éprouvette C_C5_dt000 de la batterie 3

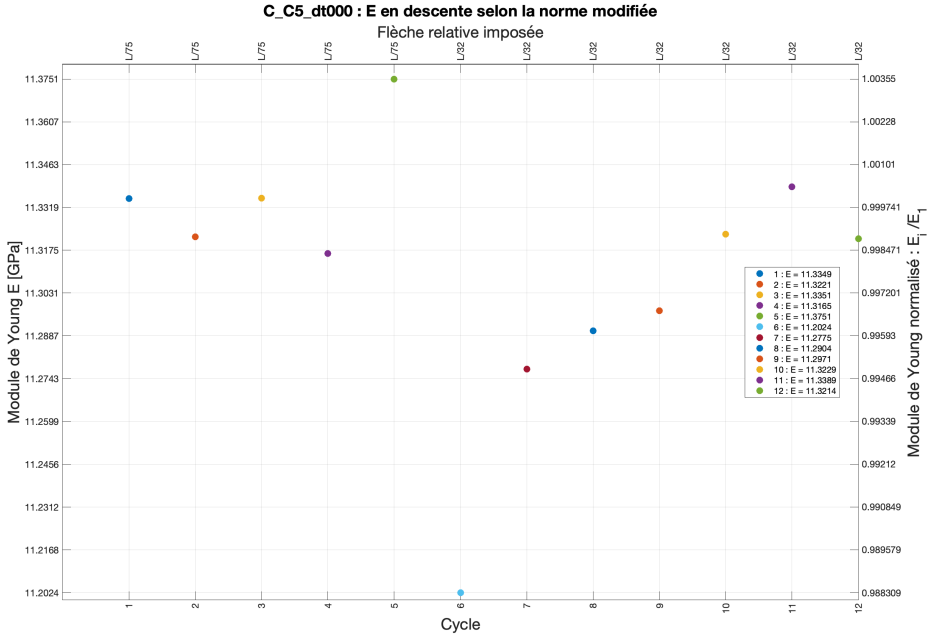


FIGURE M.193 – Module de Young en descente de l'éprouvette C_C5_dt000 de la batterie 3

Rigidité flexionnelle

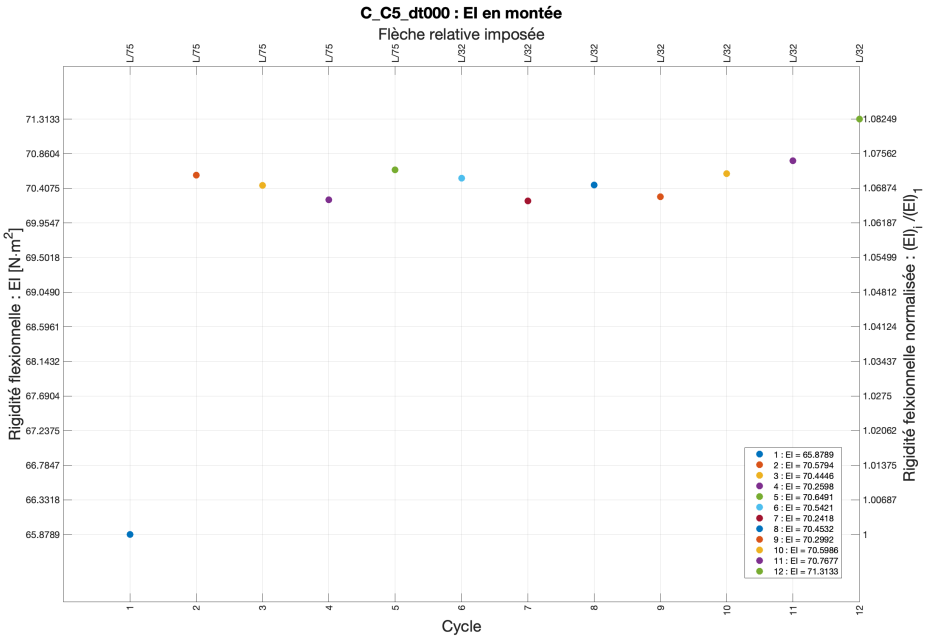


Figure M.194 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette C_C5_dt000 de la batterie 3

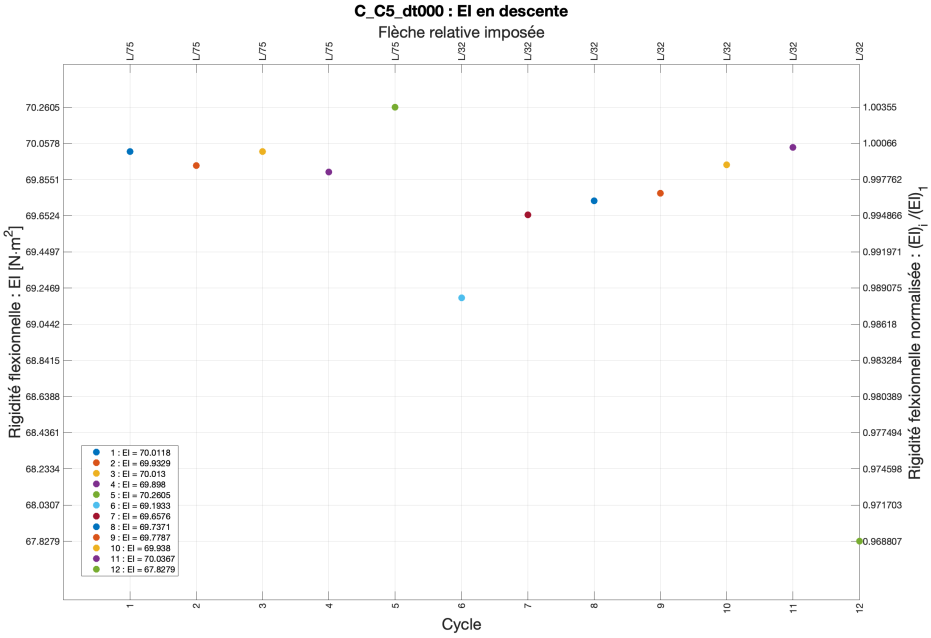


Figure M.195 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette C_C5_dt000 de la batterie 3

Fonction S

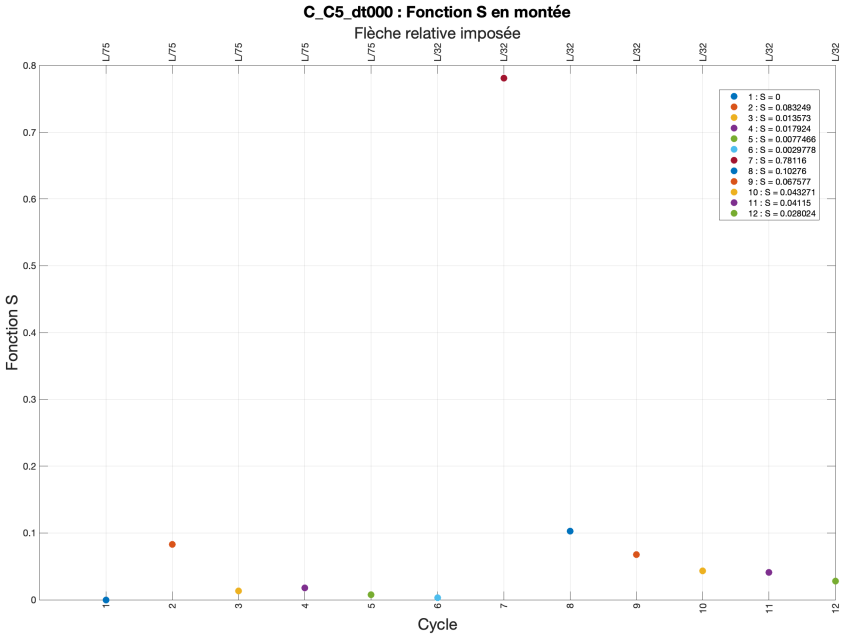


FIGURE M.196 – Fonction S en montée de l'éprouvette C_C5_dt000 de la batterie 3

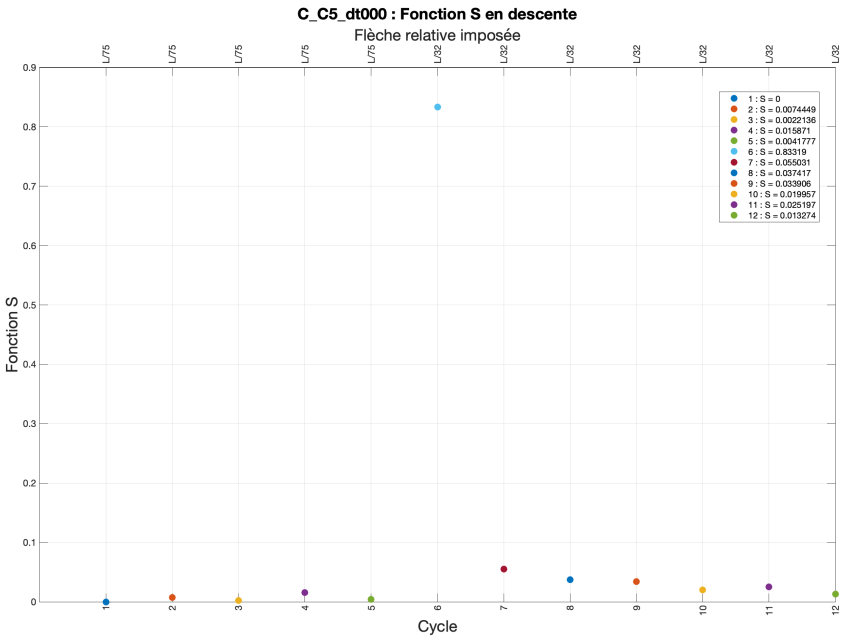


FIGURE M.197 – Fonction S en descente de l'éprouvette C_C5_dt000 de la batterie 3

Chargement statique *a posteriori*

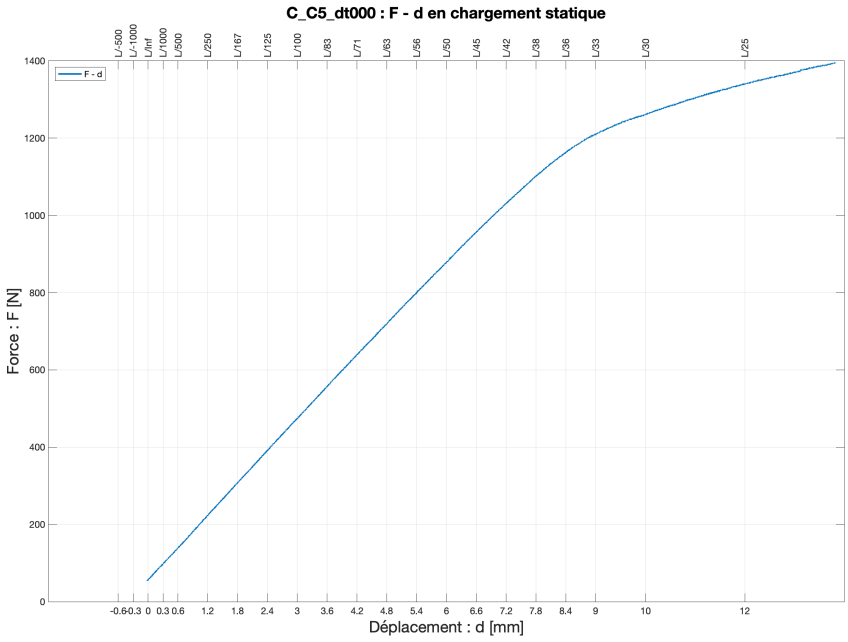


Figure M.198 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette C_C5_dt000 de la batterie 3

Éprouvette C_C5_dt300

Global

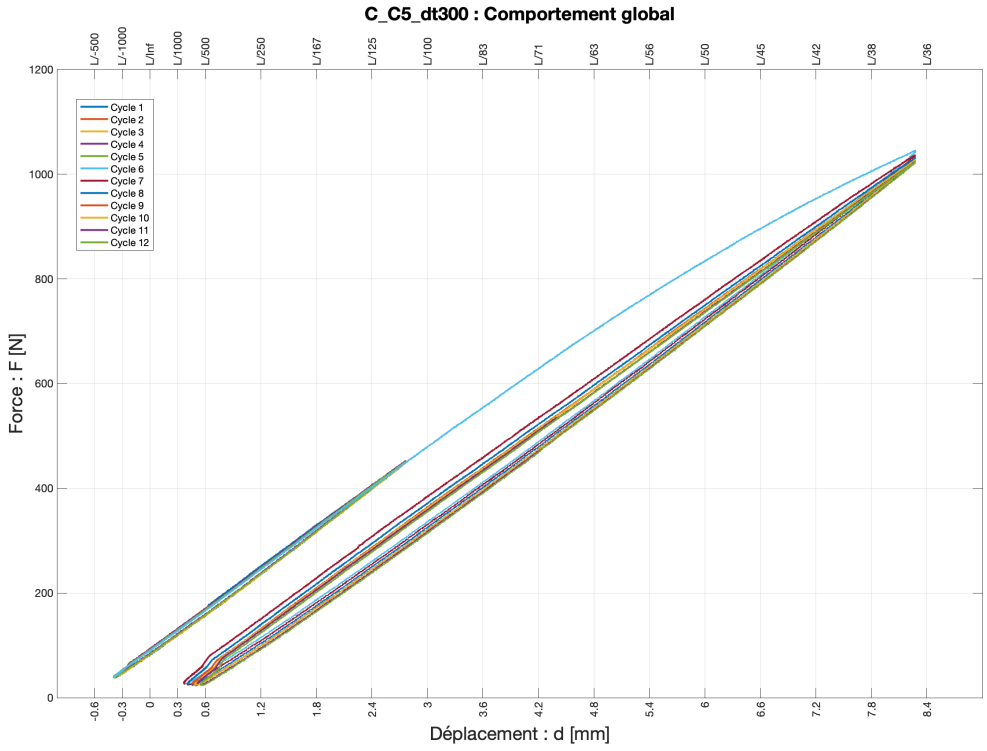


FIGURE M.199 – Comportement global de l'éprouvette C_C5_dt300 de la batterie 3

Déplacement résiduel

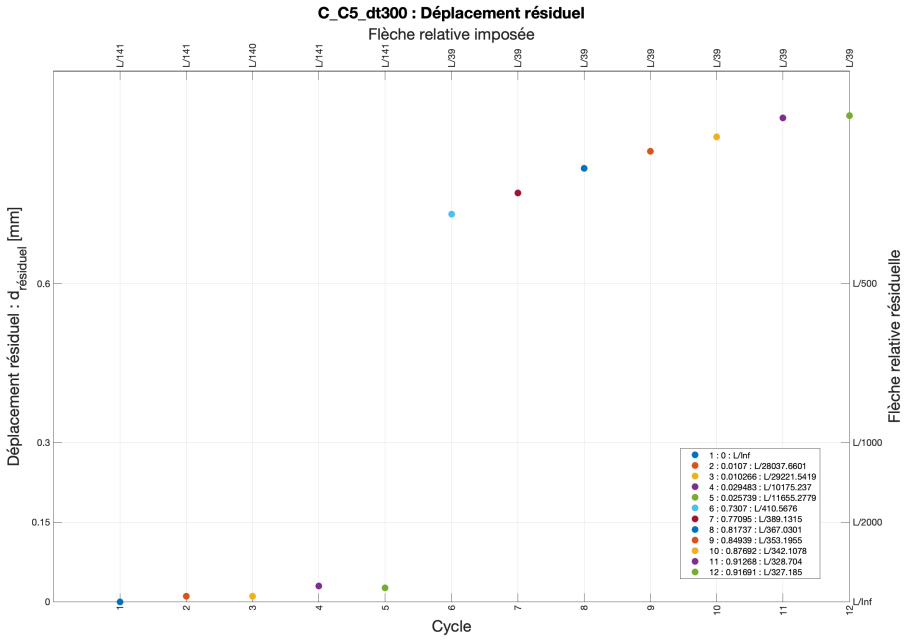


FIGURE M.200 – Déplacement résiduel de l'éprouvette C_C5_dt300 de la batterie 3

Force maximale

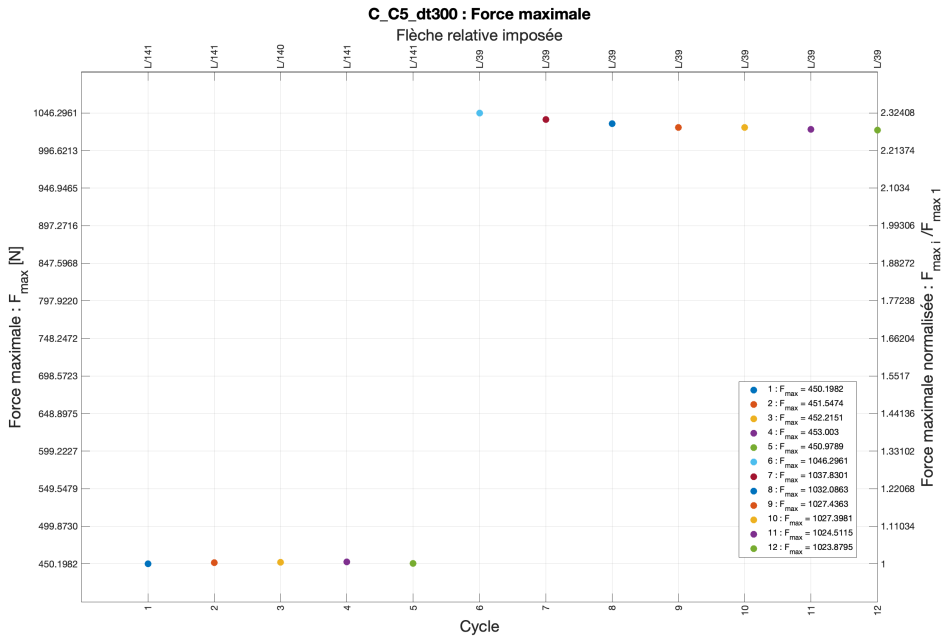


FIGURE M.201 – Force maximale de l'éprouvette C_C5_dt300 de la batterie 3

Module de Young

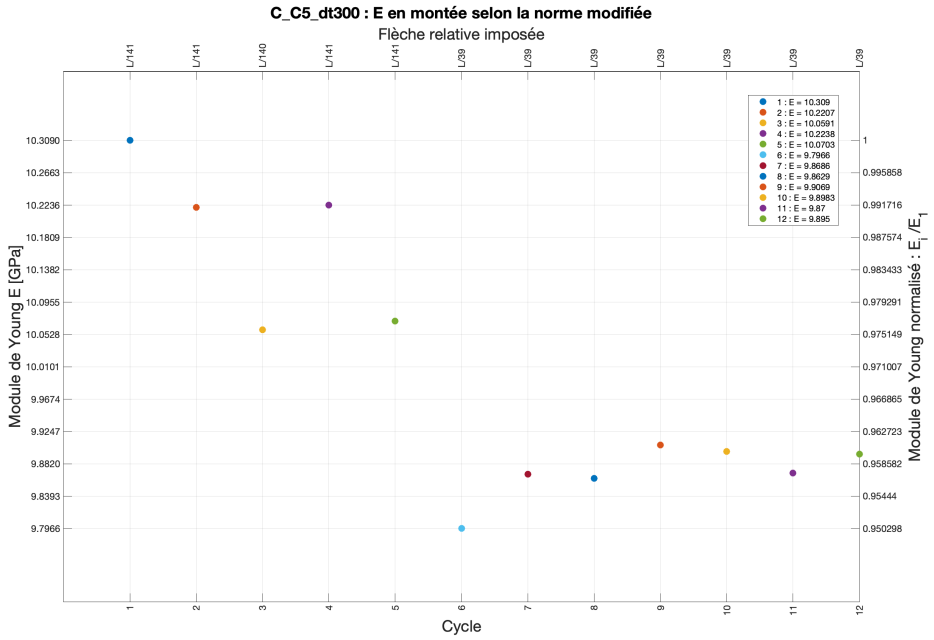


FIGURE M.202 – Module de Young en montée de l'éprouvette C_C5_dt300 de la batterie 3

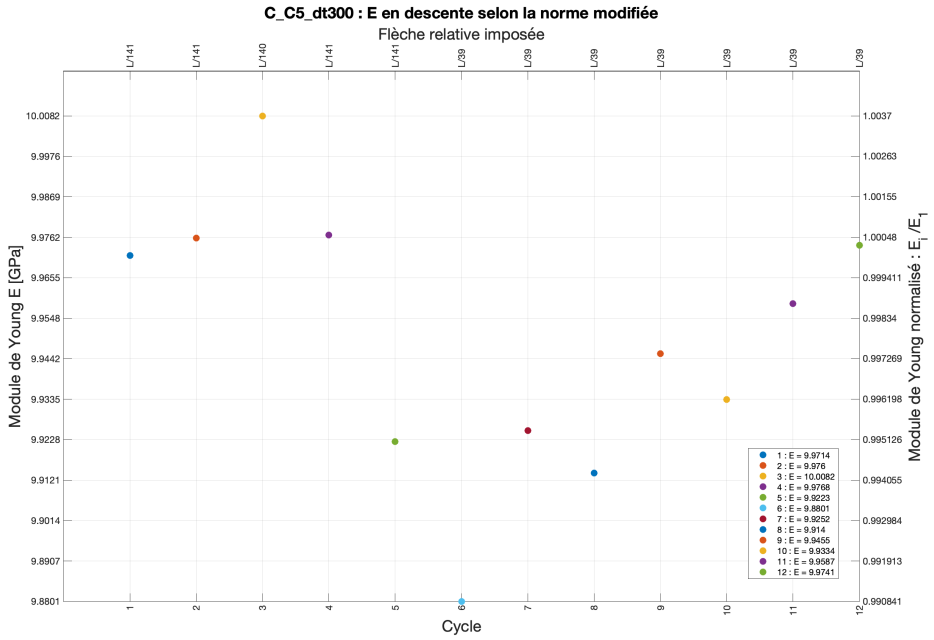


FIGURE M.203 – Module de Young en descente de l'éprouvette C_C5_dt300 de la batterie 3

Rigidité flexionnelle

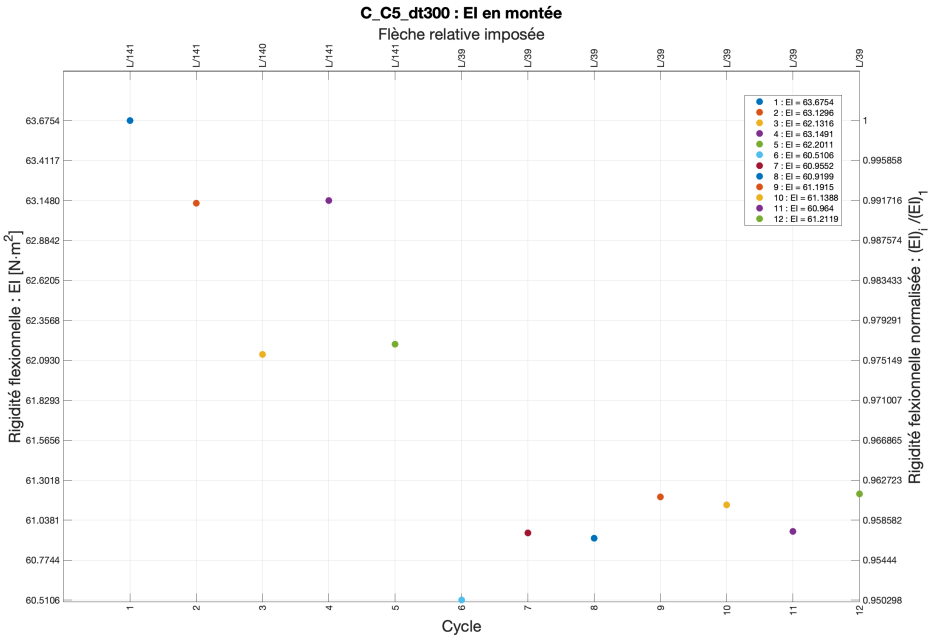


Figure M.204 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette C_C5_dt300 de la batterie 3

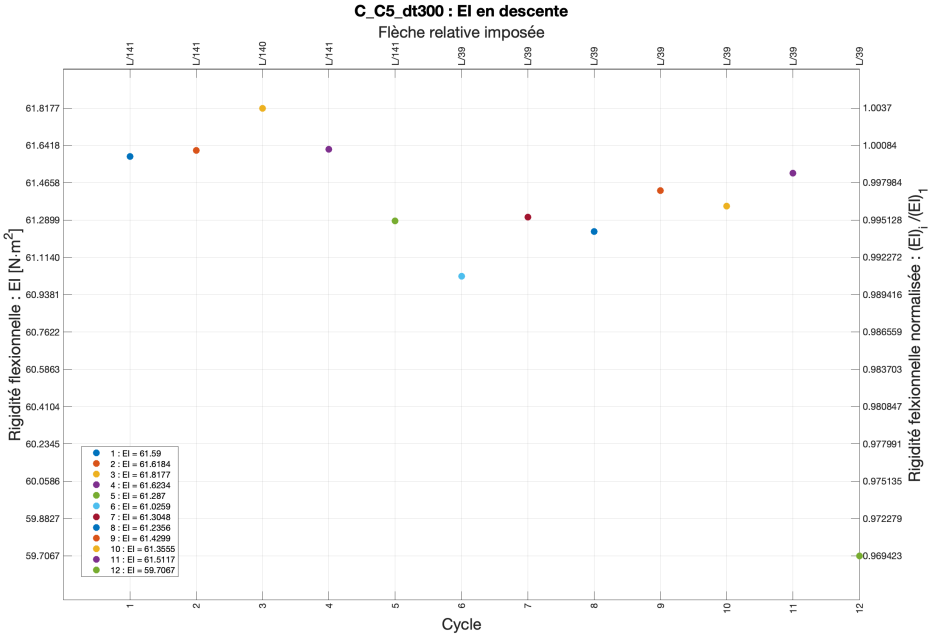


Figure M.205 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette C_C5_dt300 de la batterie 3

Fonction S

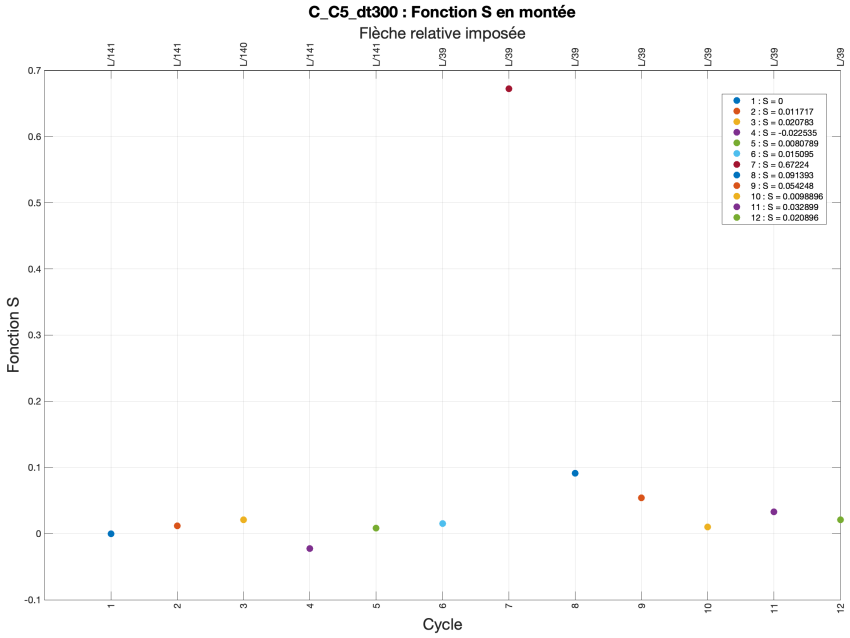


FIGURE M.206 – Fonction S en montée de l'éprouvette C_C5_dt300 de la batterie 3

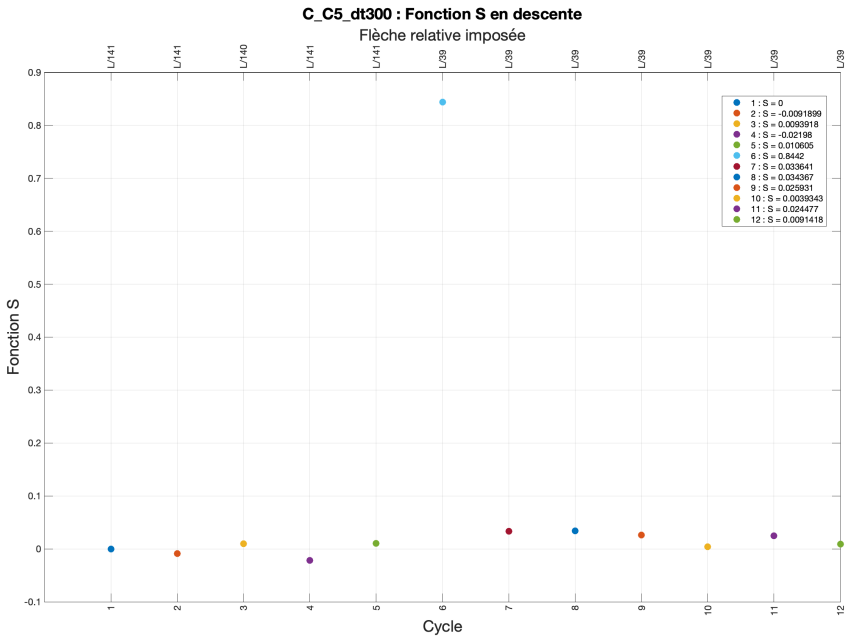


FIGURE M.207 – Fonction S en descente de l'éprouvette C_C5_dt300 de la batterie 3

Chargement statique *a posteriori*

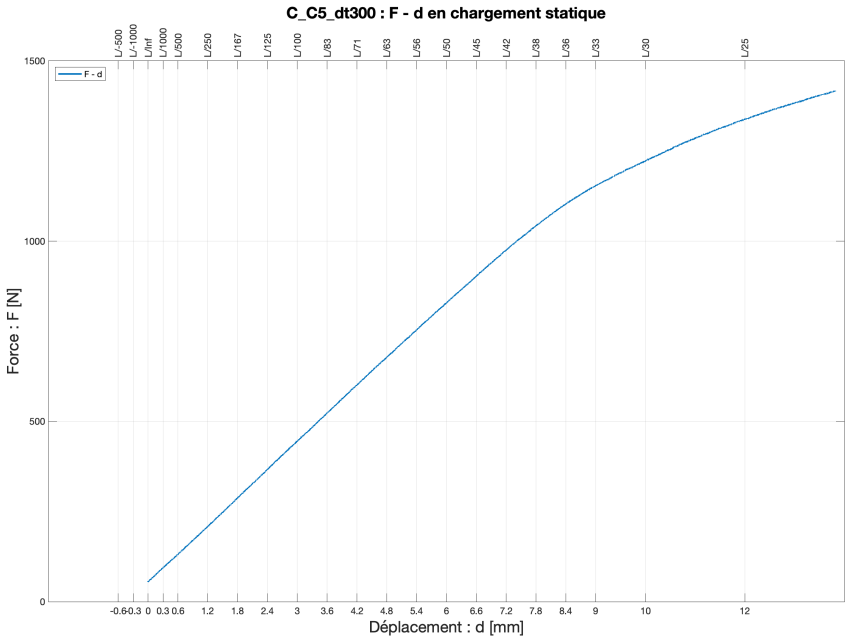


Figure M.208 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette C_C5_dt300 de la batterie 3

Éprouvette C_D2_dt000

Global

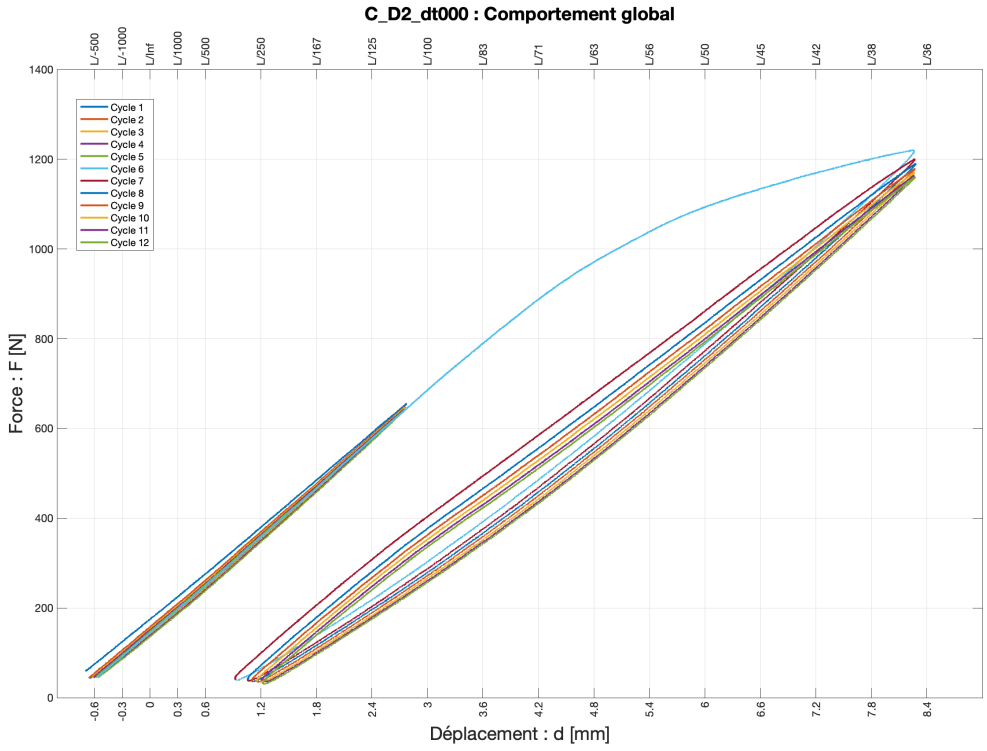


FIGURE M.209 – Comportement global de l'éprouvette C_D2_dt000 de la batterie 3

Déplacement résiduel

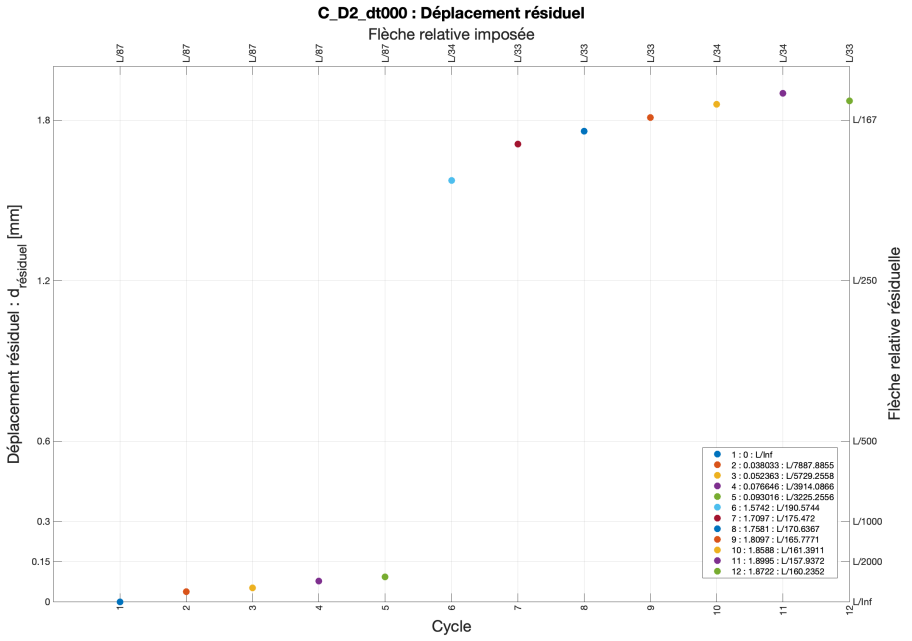


Figure M.210 – Déplacement résiduel de l'éprouvette C_D2_dt000 de la batterie 3

Force maximale

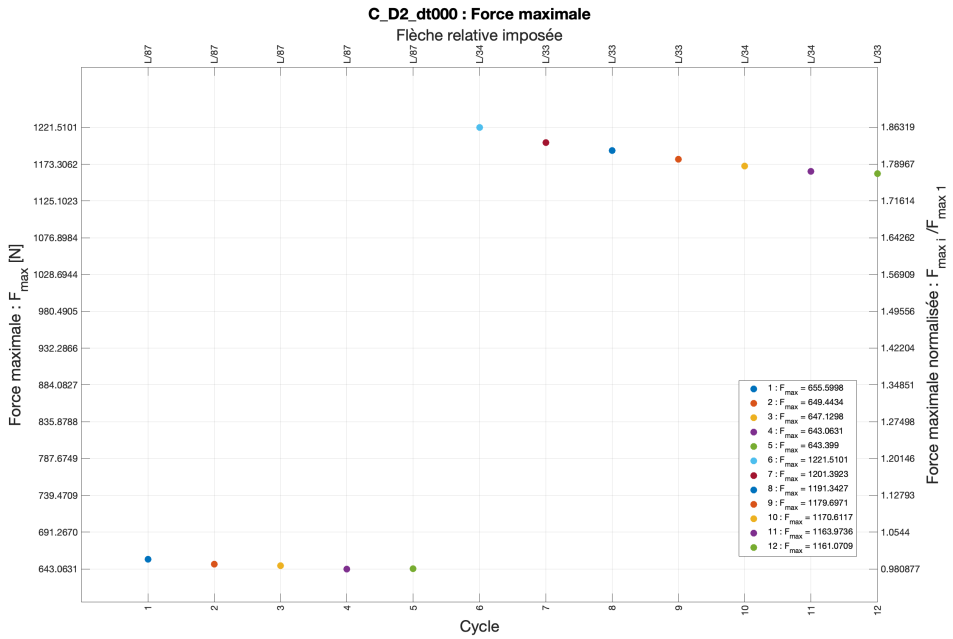


Figure M.211 – Force maximale de l'éprouvette C_D2_dt000 de la batterie 3

Module de Young

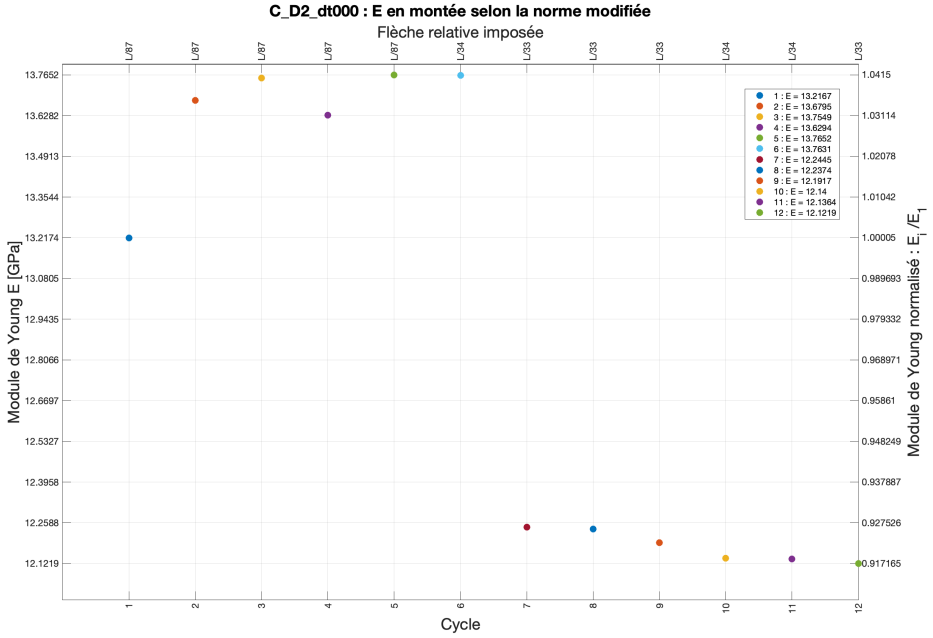


FIGURE M.212 – Module de Young en montée de l'éprouvette C_D2_dt000 de la batterie 3

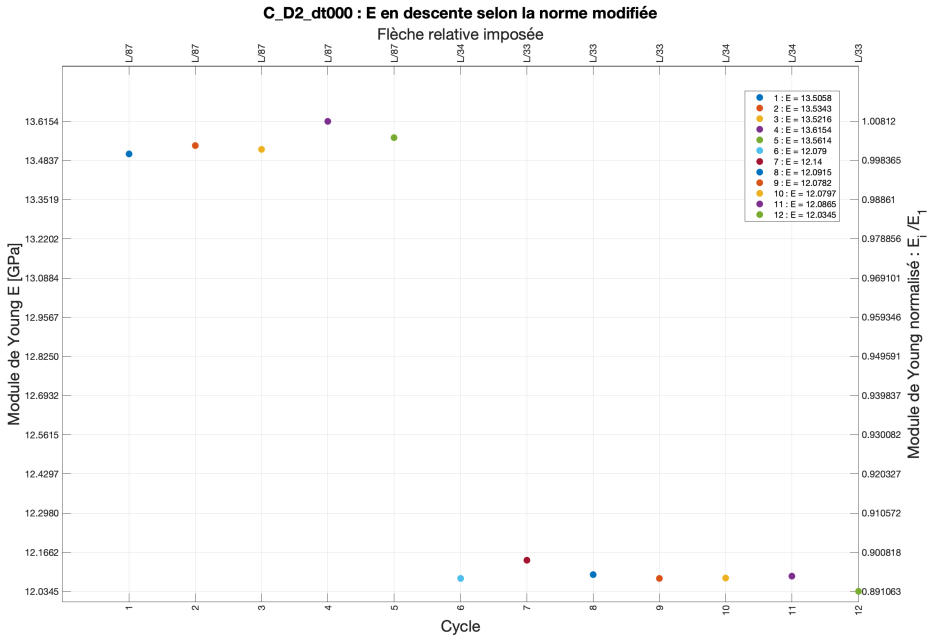


FIGURE M.213 – Module de Young en descente de l'éprouvette C_D2_dt000 de la batterie 3

Rigidité flexionnelle

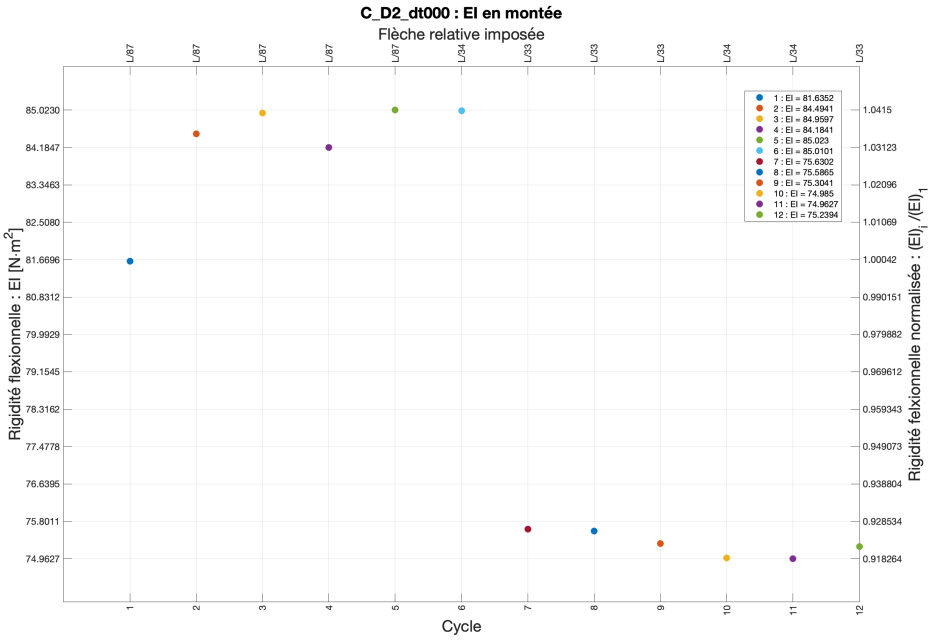


Figure M.214 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette C_D2_dt000 de la batterie 3

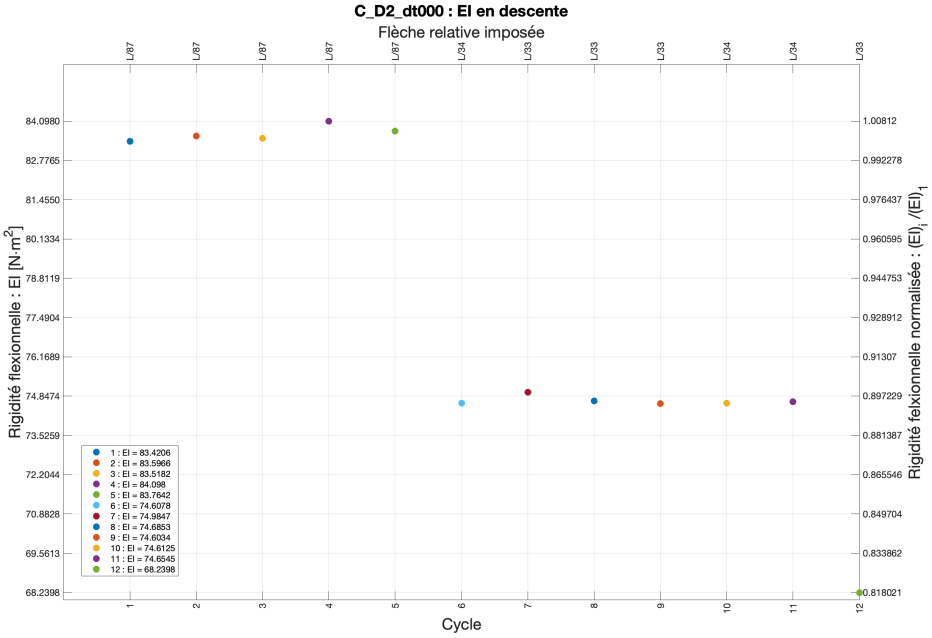


Figure M.215 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette C_D2_dt000 de la batterie 3

Fonction S

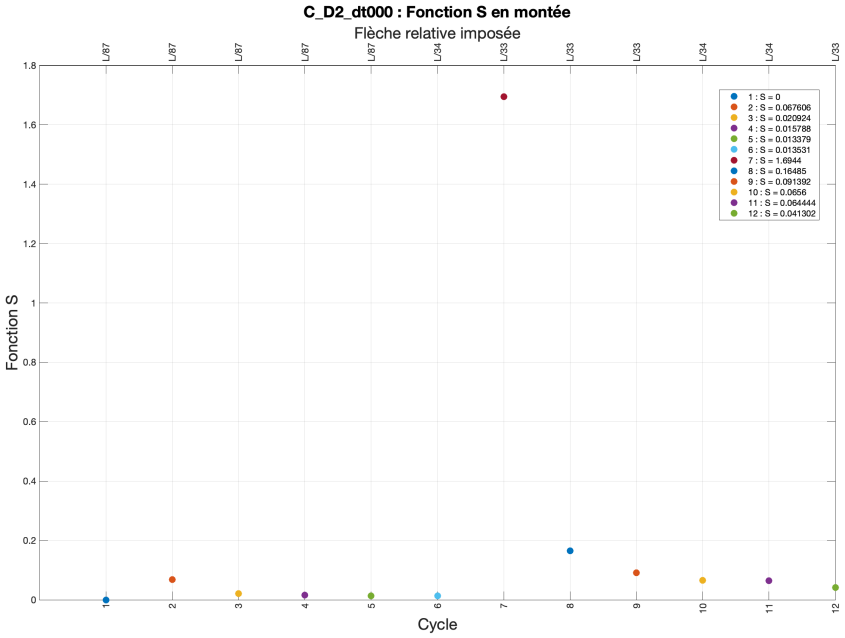


FIGURE M.216 – Fonction S en montée de l'éprouvette C_D2_dt000 de la batterie 3

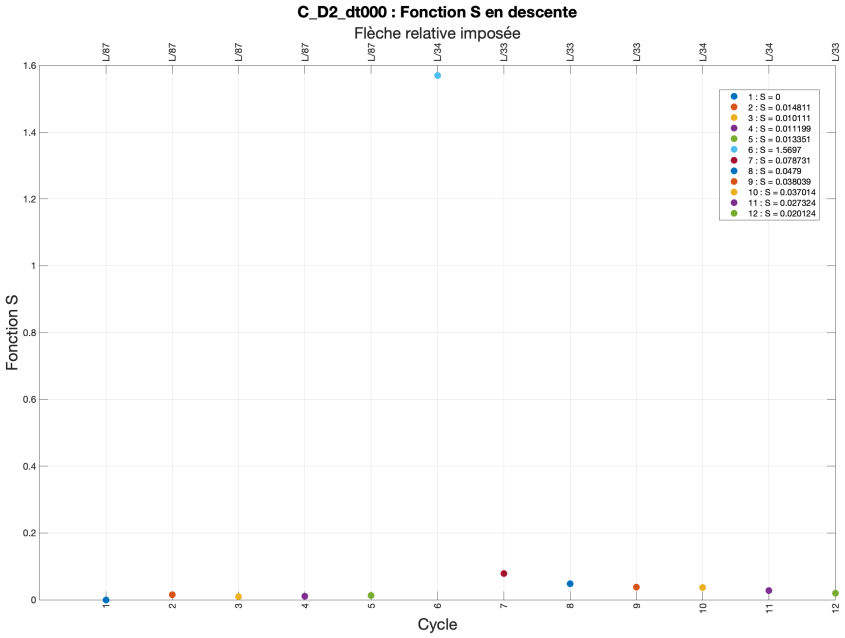


FIGURE M.217 – Fonction S en descente de l'éprouvette C_D2_dt000 de la batterie 3

Chargement statique *a posteriori*

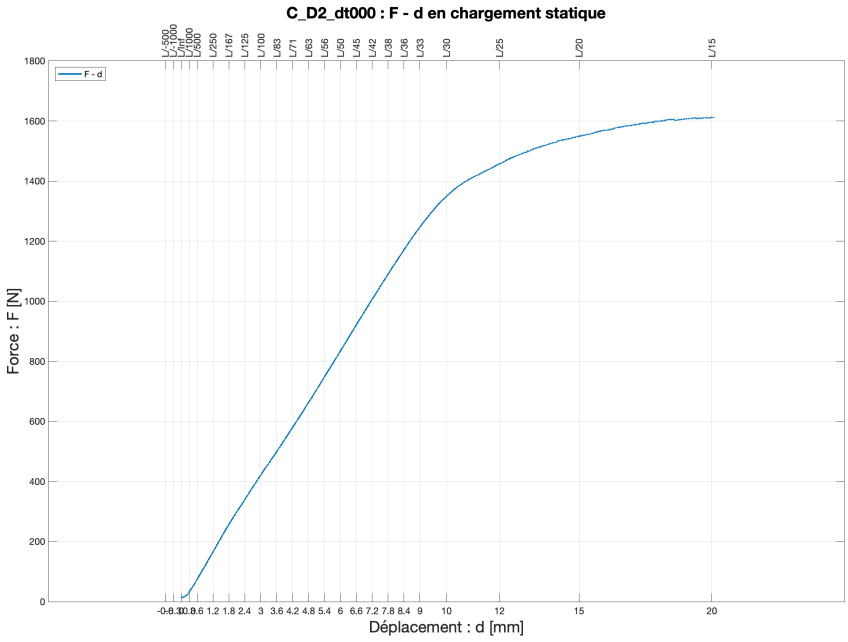


Figure M.218 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette C_D2_dt000 de la batterie 3

Éprouvette C_D2_dt300

Global

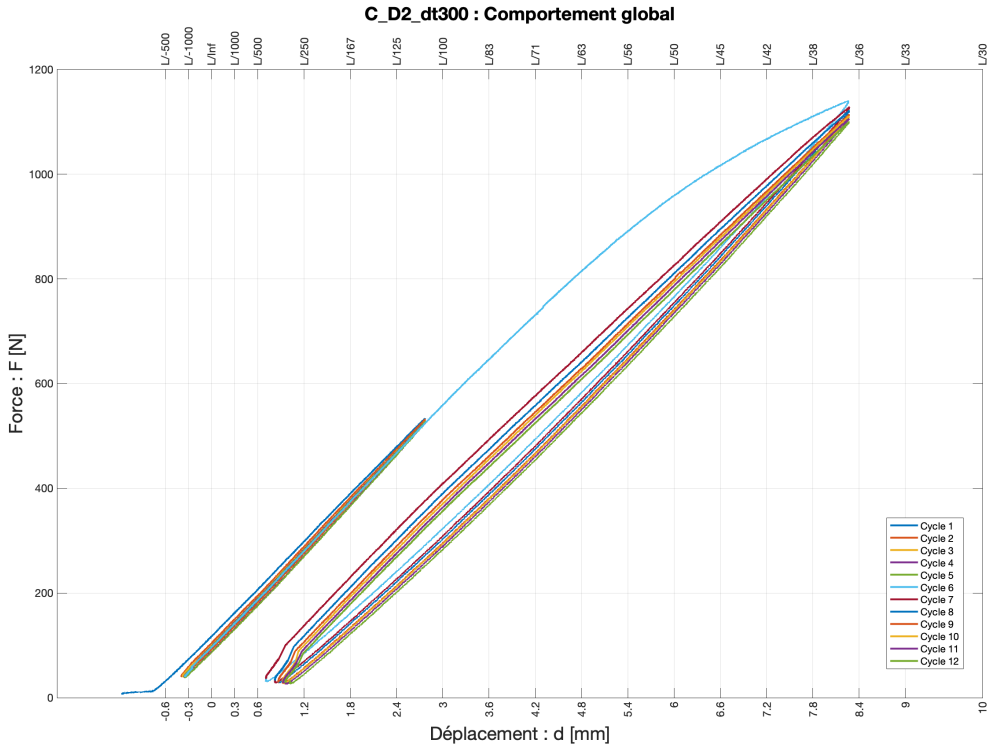


FIGURE M.219 – Comportement global de l'éprouvette C_D2_dt300 de la batterie 3

Déplacement résiduel

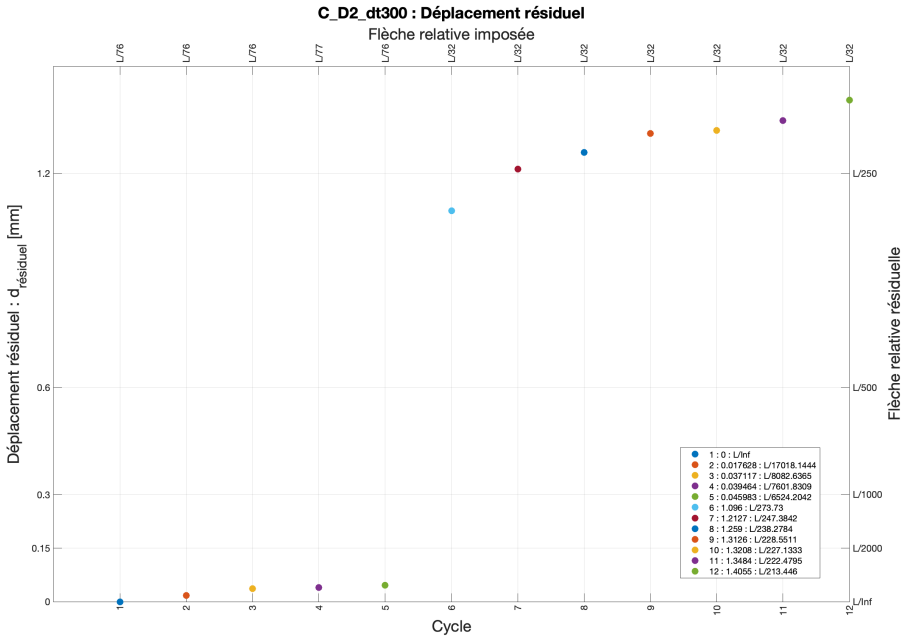


Figure M.220 – Déplacement résiduel de l'éprouvette C_D2_dt300 de la batterie 3

Force maximale

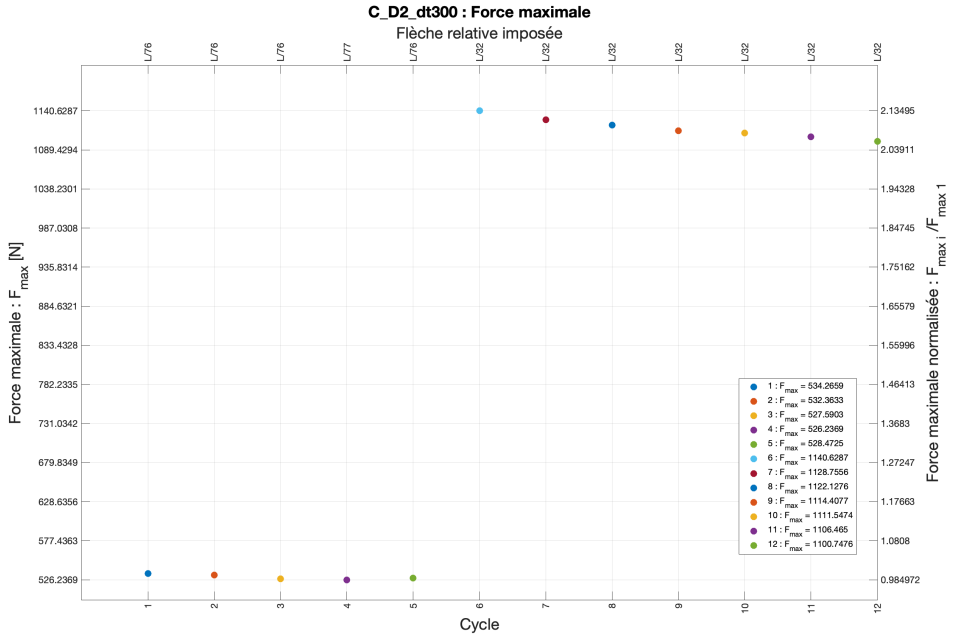


Figure M.221 – Force maximale de l'éprouvette C_D2_dt300 de la batterie 3

Module de Young

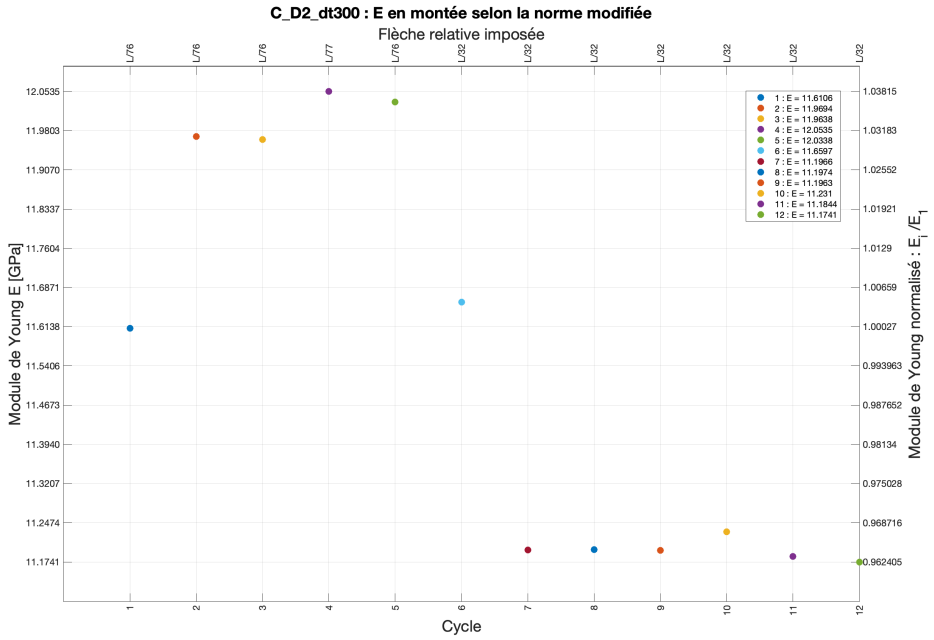


FIGURE M.222 – Module de Young en montée de l'éprouvette C_D2_dt300 de la batterie 3

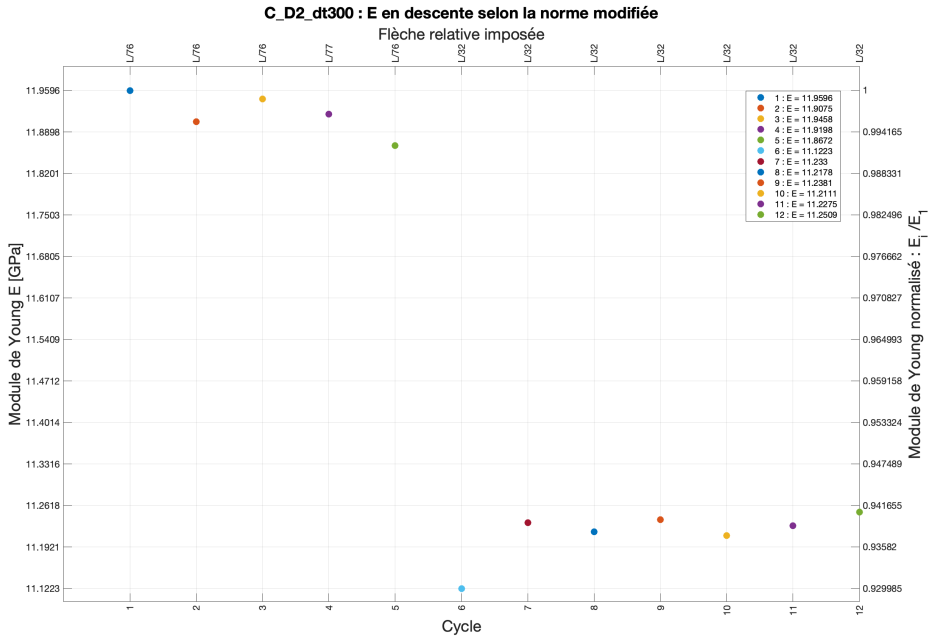


FIGURE M.223 – Module de Young en descente de l'éprouvette C_D2_dt300 de la batterie 3

Rigidité flexionnelle

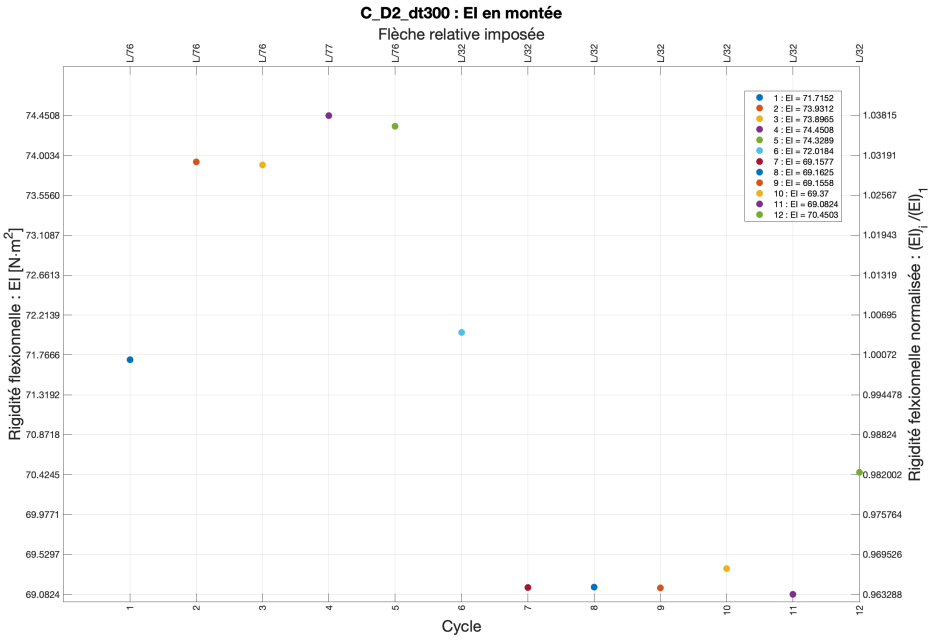


Figure M.224 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette C_D2_dt300 de la batterie 3

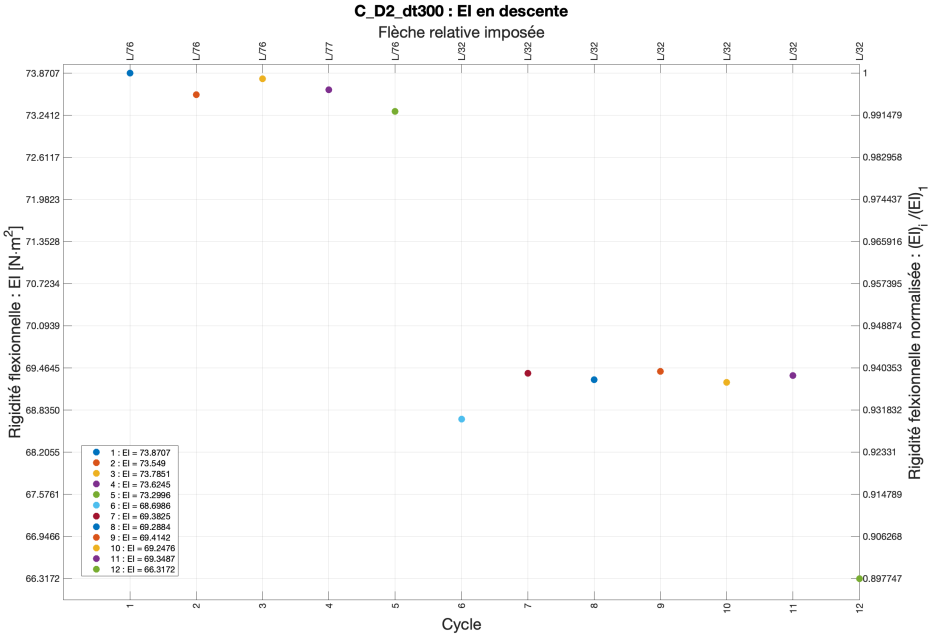


Figure M.225 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette C_D2_dt300 de la batterie 3

Fonction S

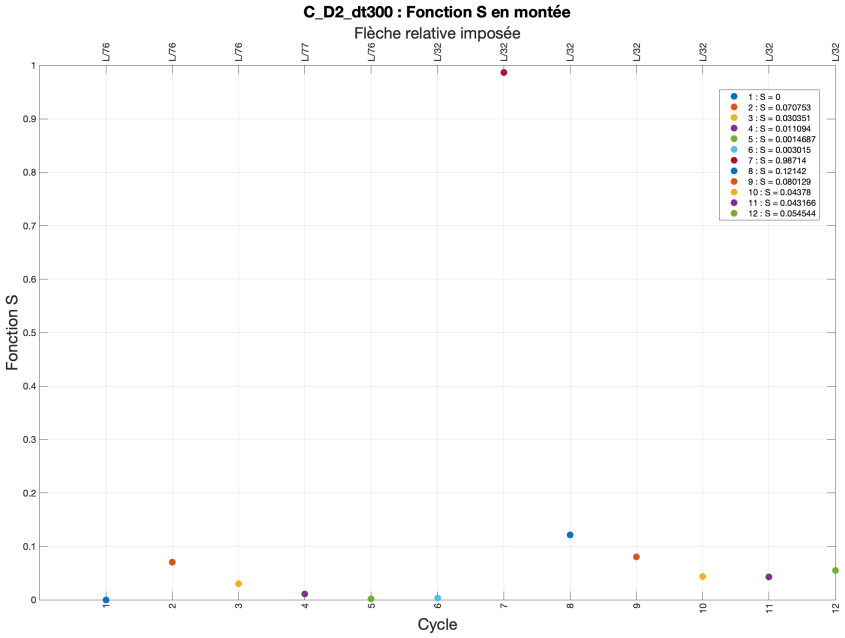


FIGURE M.226 – Fonction S en montée de l'éprouvette C_D2_dt300 de la batterie 3

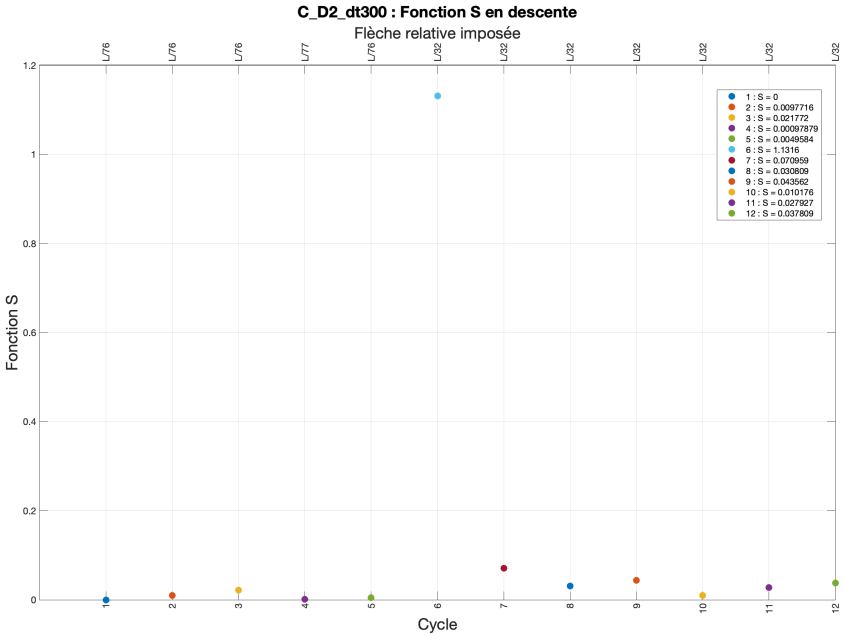


FIGURE M.227 – Fonction S en descente de l'éprouvette C_D2_dt300 de la batterie 3

Chargement statique *a posteriori*

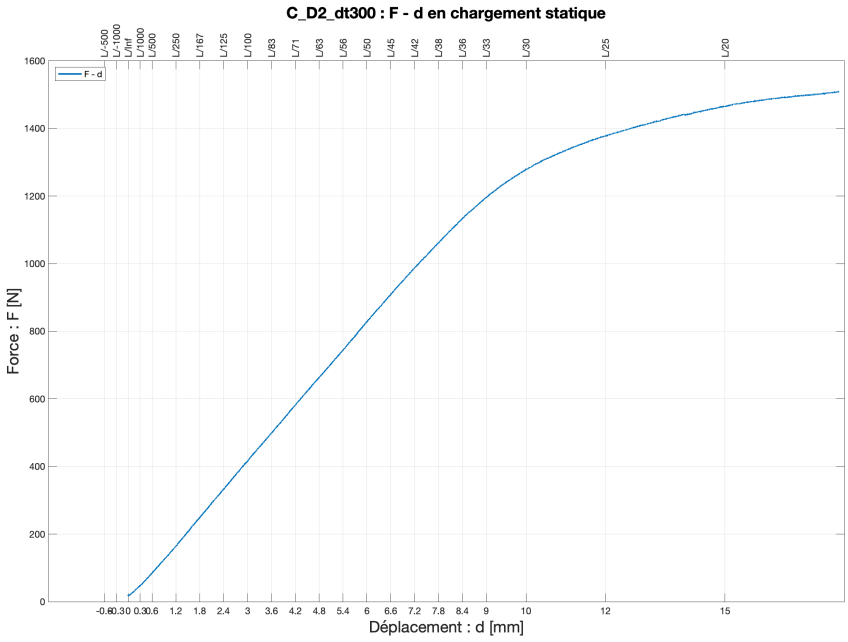


Figure M.228 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette C_D2_dt300 de la batterie 3

Éprouvette C_D5_dt000

Global

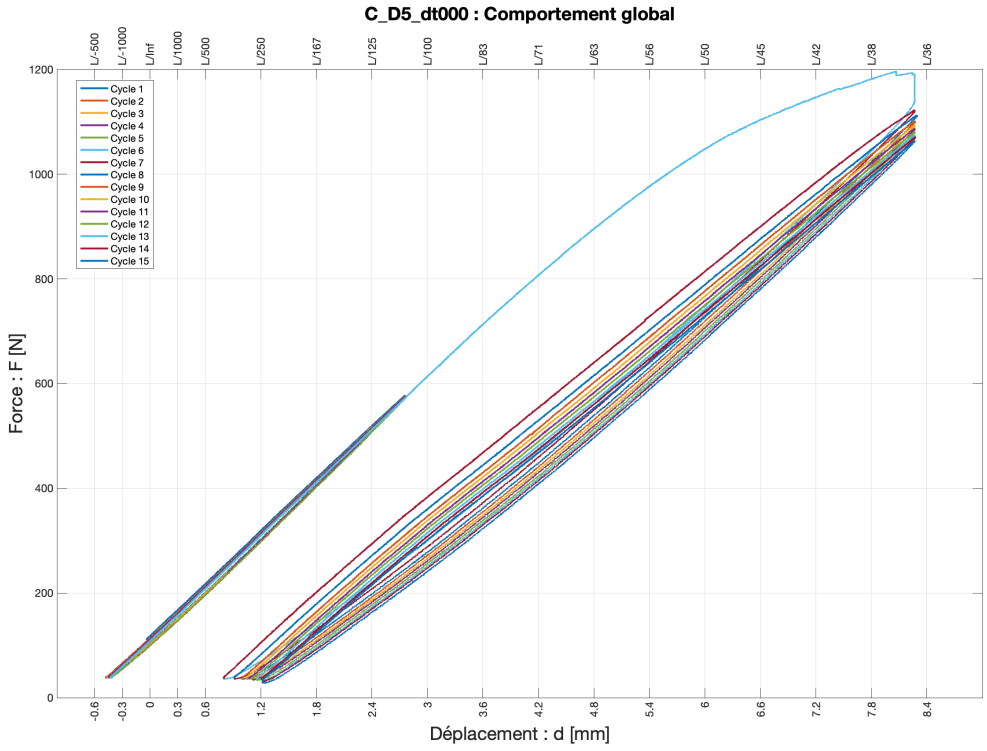


FIGURE M.229 – Comportement global de l'éprouvette C_D5_dt000 de la batterie 3

Déplacement résiduel

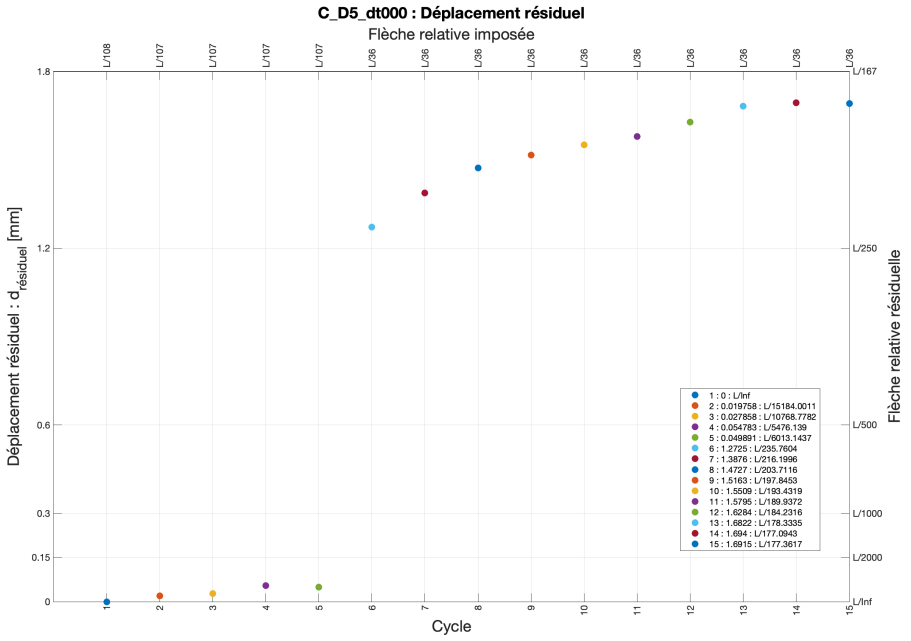


Figure M.230 – Déplacement résiduel de l'éprouvette C_D5_dt000 de la batterie 3

Force maximale

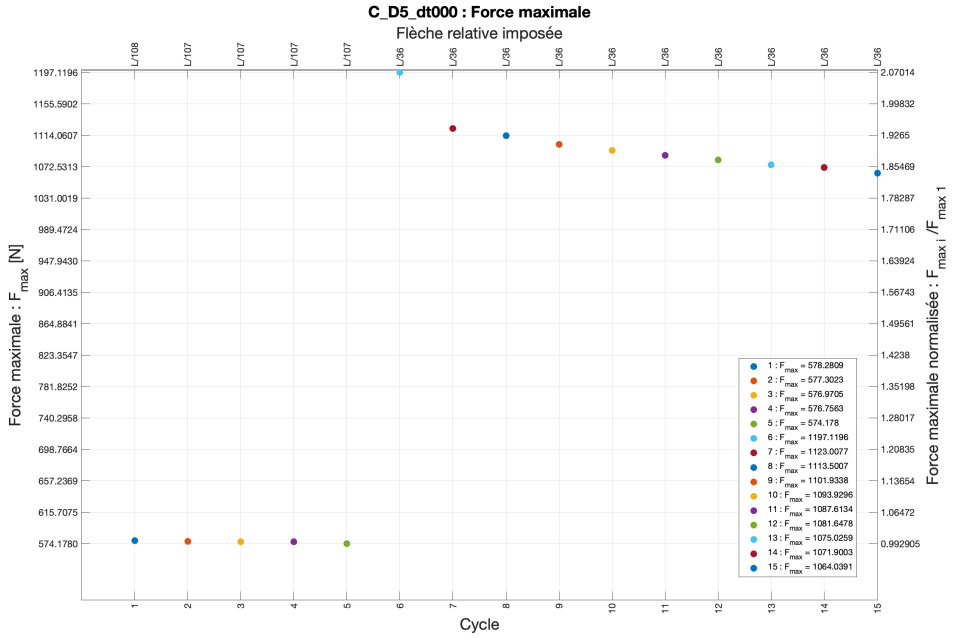


Figure M.231 – Force maximale de l'éprouvette C_D5_dt000 de la batterie 3

Module de Young

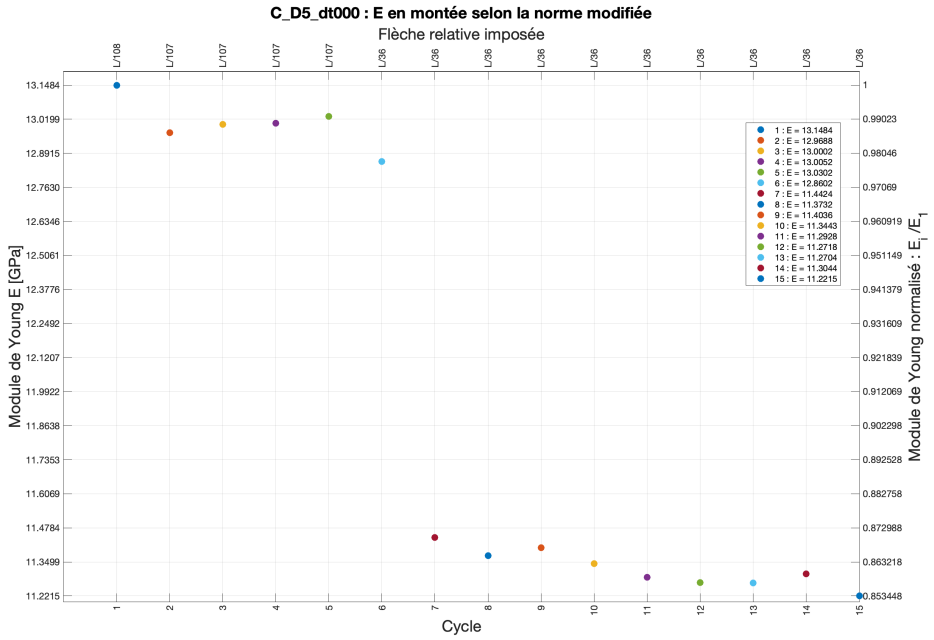


FIGURE M.232 – Module de Young en montée de l'éprouvette C_D5_dt000 de la batterie 3

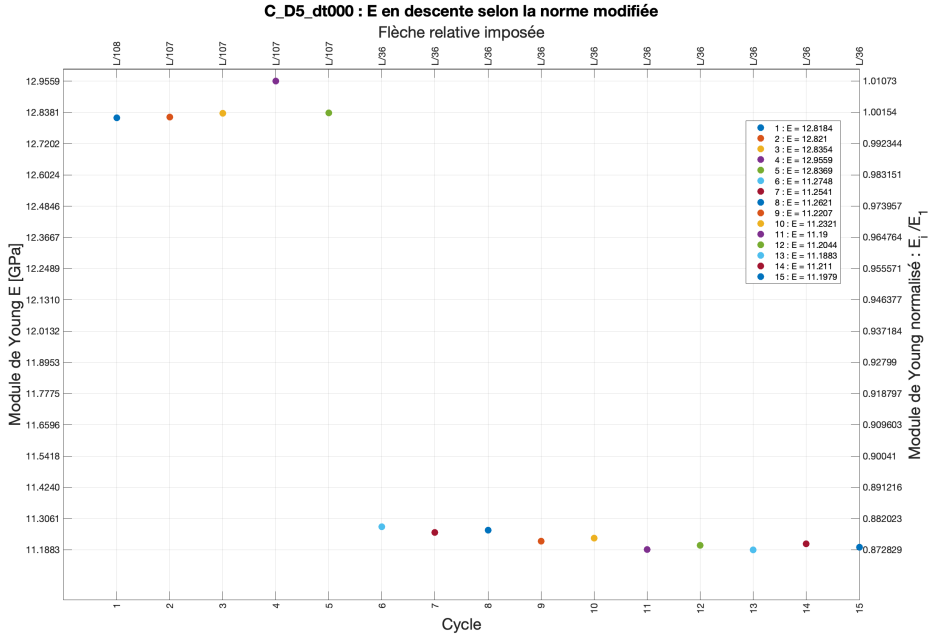


FIGURE M.233 – Module de Young en descente de l'éprouvette C_D5_dt000 de la batterie 3

Rigidité flexionnelle

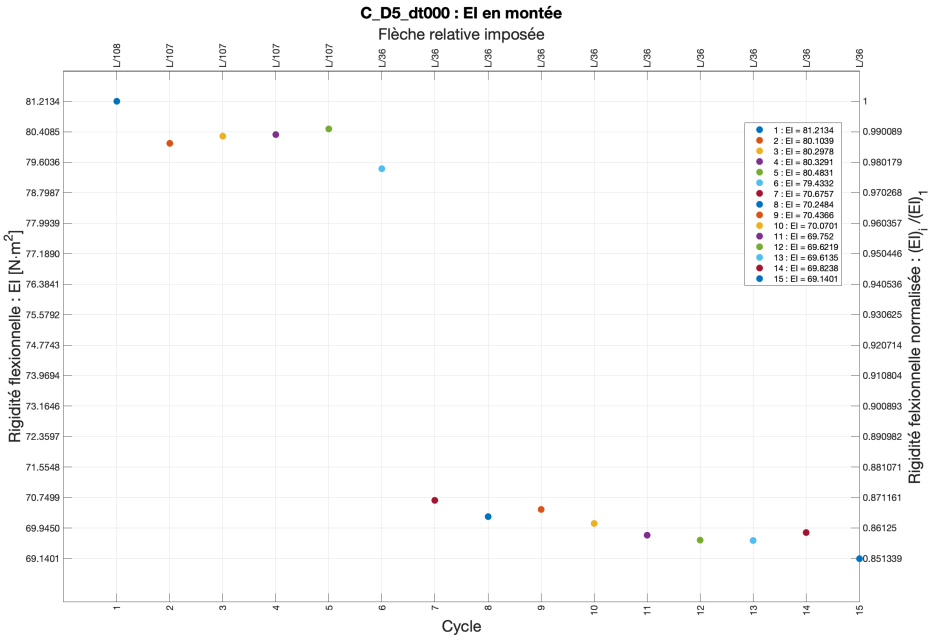


Figure M.234 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette C_D5_dt000 de la batterie 3

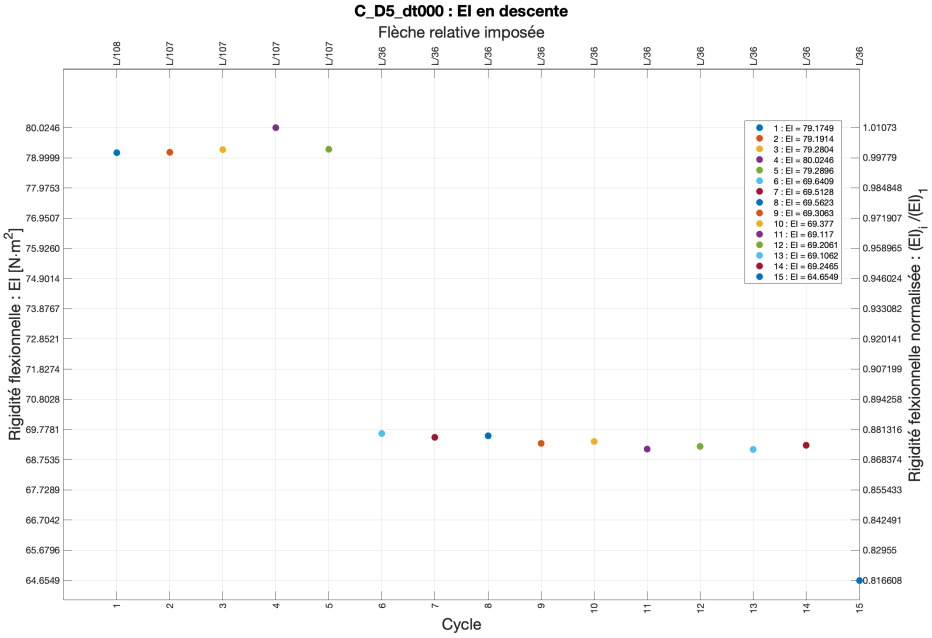


Figure M.235 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette C_D5_dt000 de la batterie 3

Fonction S

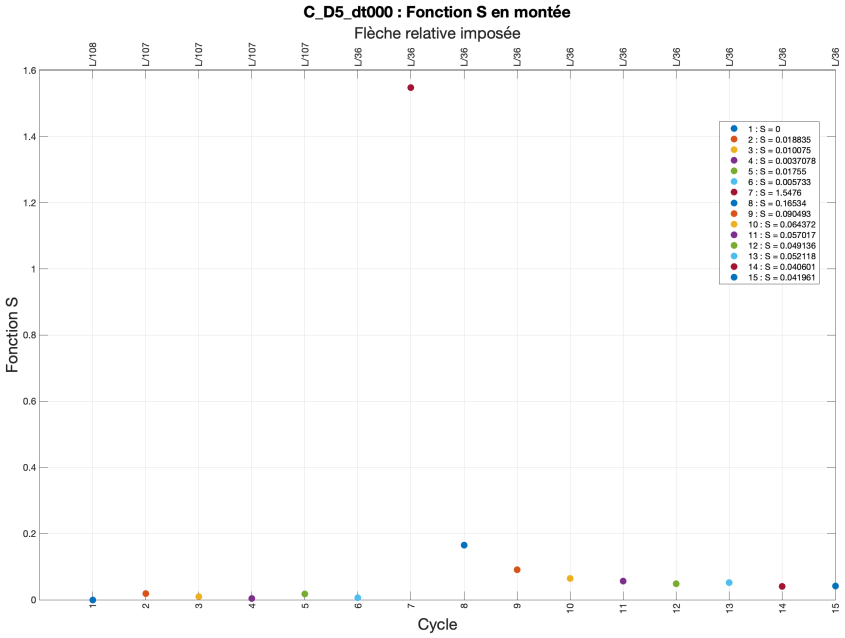


FIGURE M.236 – Fonction S en montée de l'éprouvette C_D5_dt000 de la batterie 3

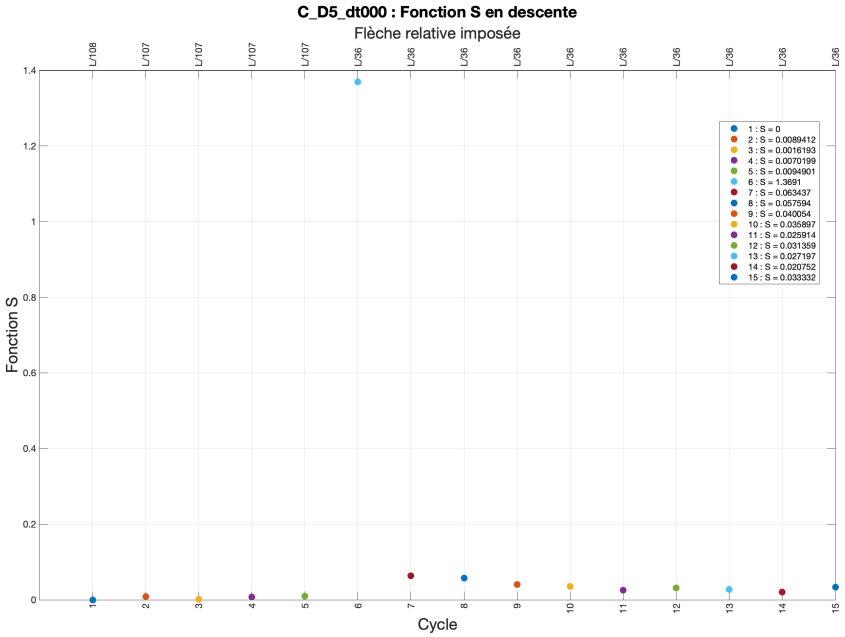


FIGURE M.237 – Fonction S en descente de l'éprouvette C_D5_dt000 de la batterie 3

Chargement statique *a posteriori*

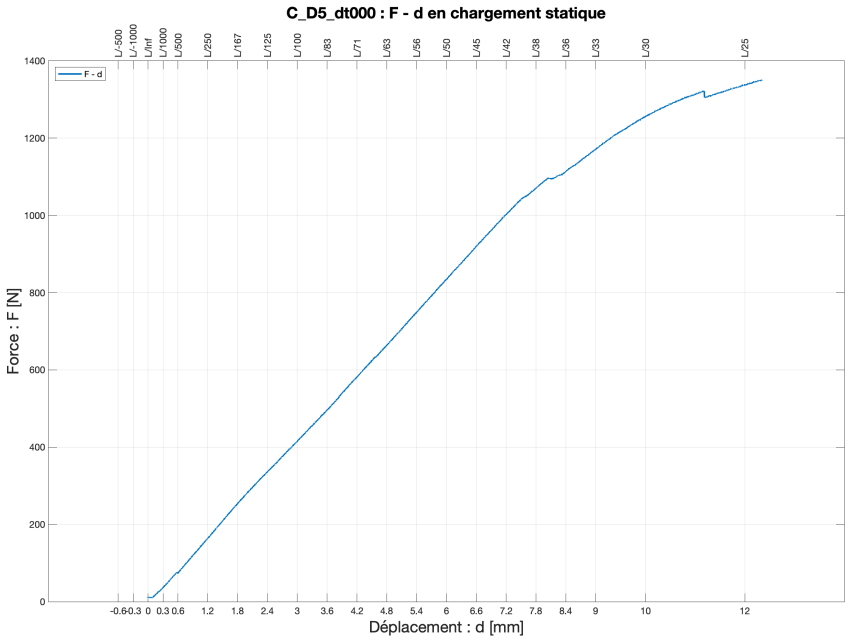


Figure M.238 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette C_D5_dt000 de la batterie 3

Éprouvette C_D5_dt300

Global

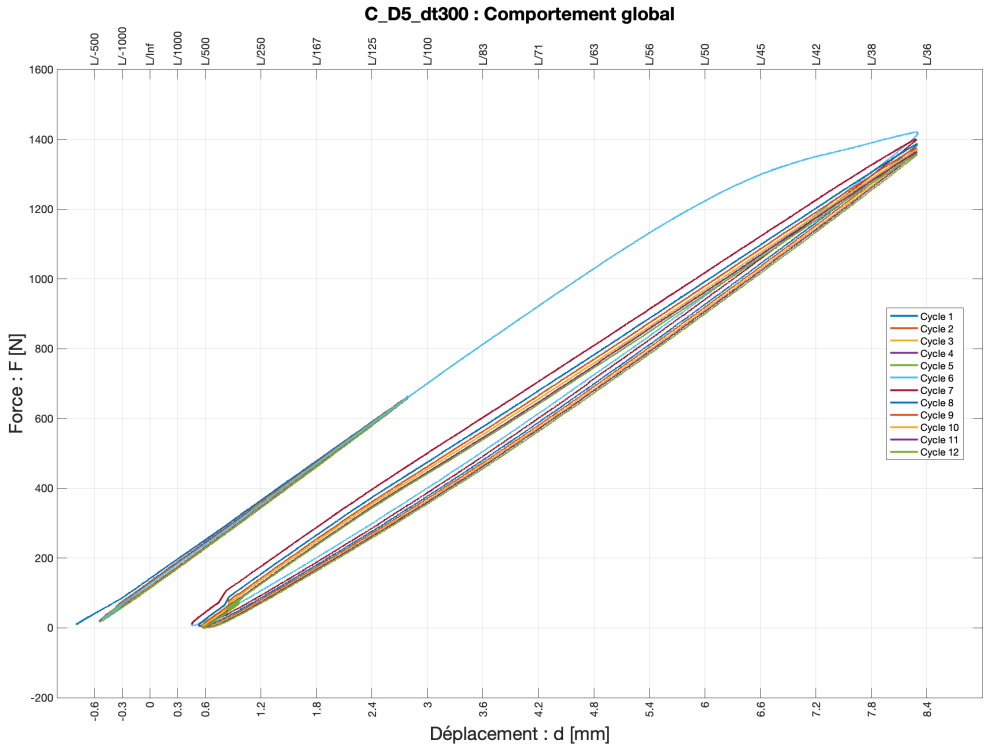


FIGURE M.239 – Comportement global de l'éprouvette C_D5_dt300 de la batterie 3

Déplacement résiduel

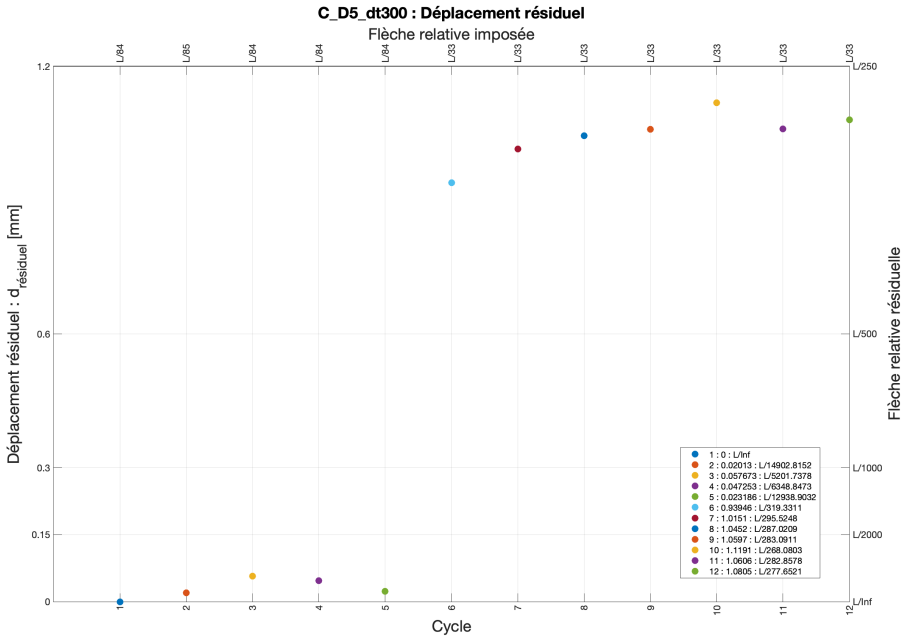


FIGURE M.240 – Déplacement résiduel de l'éprouvette C_D5_dt300 de la batterie 3

Force maximale

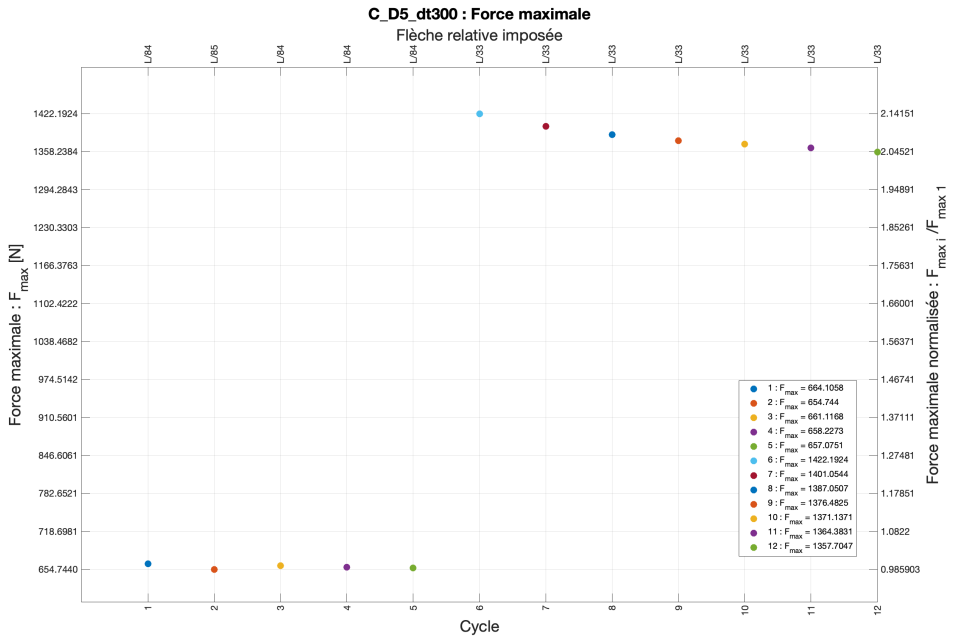


FIGURE M.241 – Force maximale de l'éprouvette C_D5_dt300 de la batterie 3

Module de Young

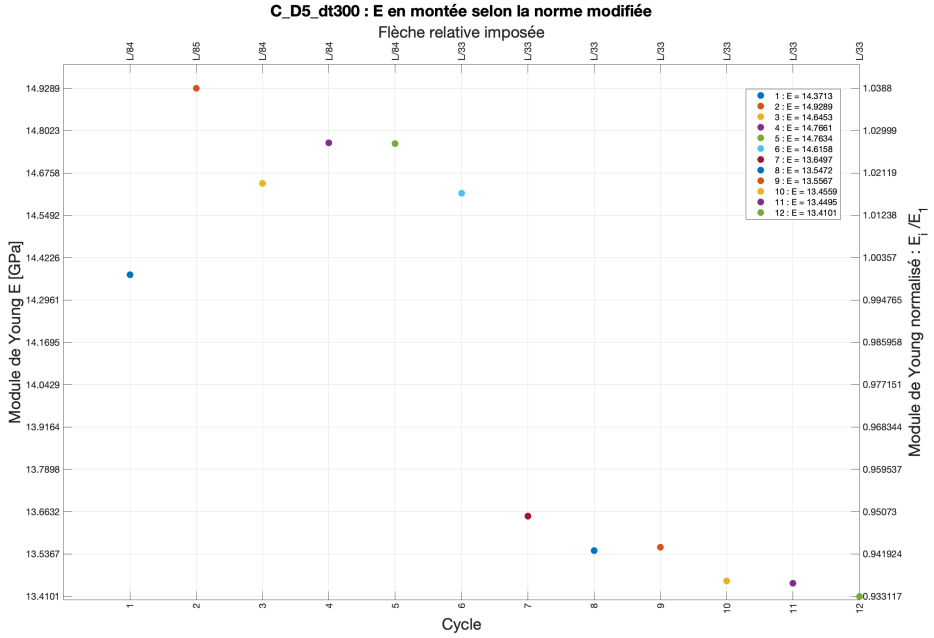


FIGURE M.242 – Module de Young en montée de l'éprouvette C_D5_dt300 de la batterie 3

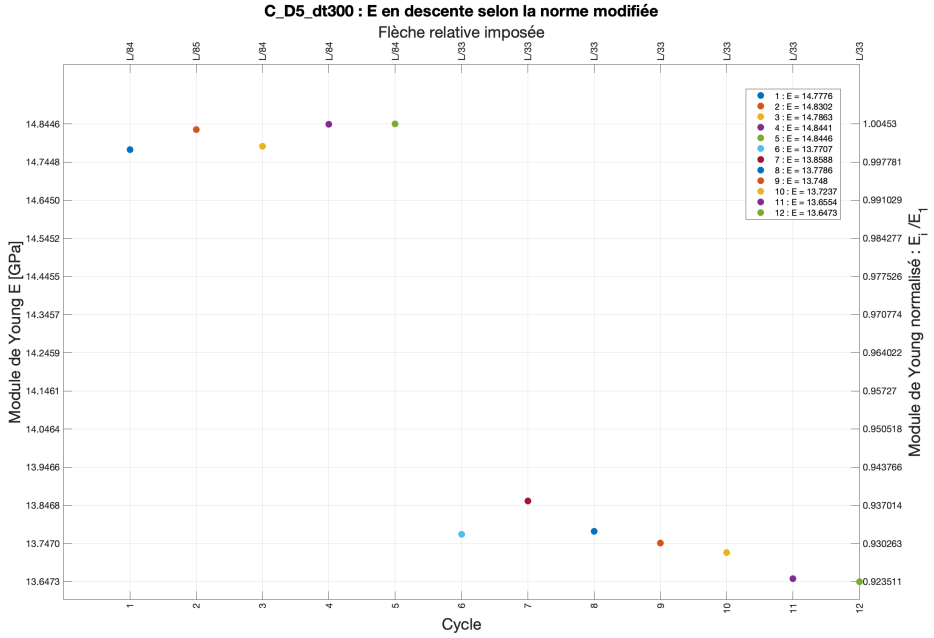


FIGURE M.243 – Module de Young en descente de l'éprouvette C_D5_dt300 de la batterie 3

Rigidité flexionnelle

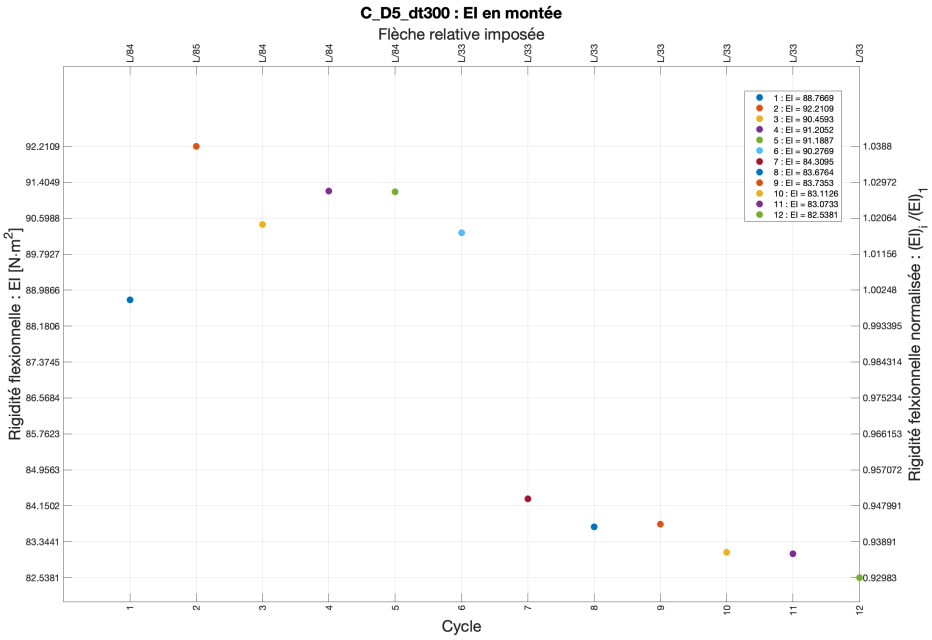


Figure M.244 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette C_D5_dt300 de la batterie 3

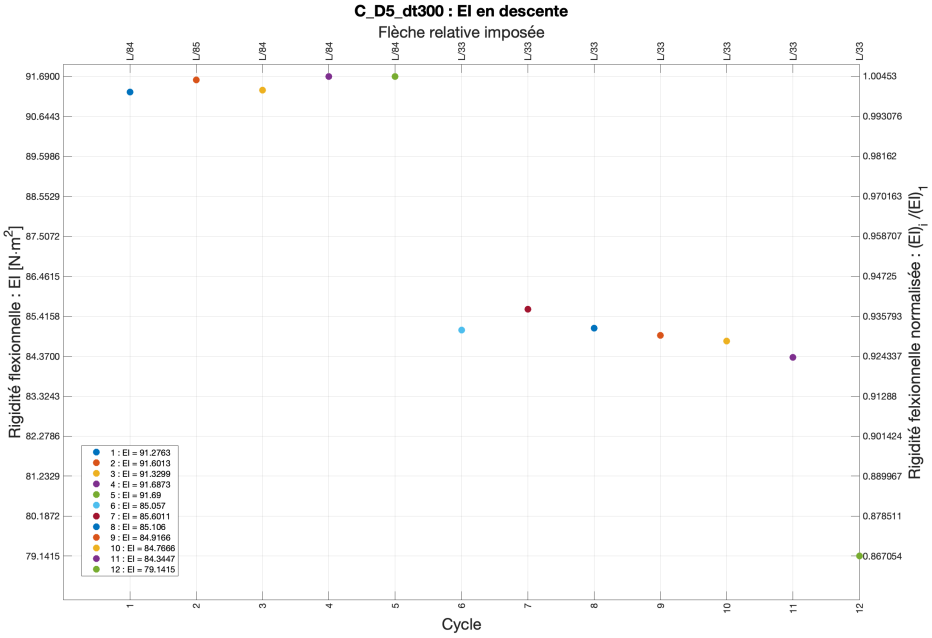


Figure M.245 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette C_D5_dt300 de la batterie 3

Fonction S

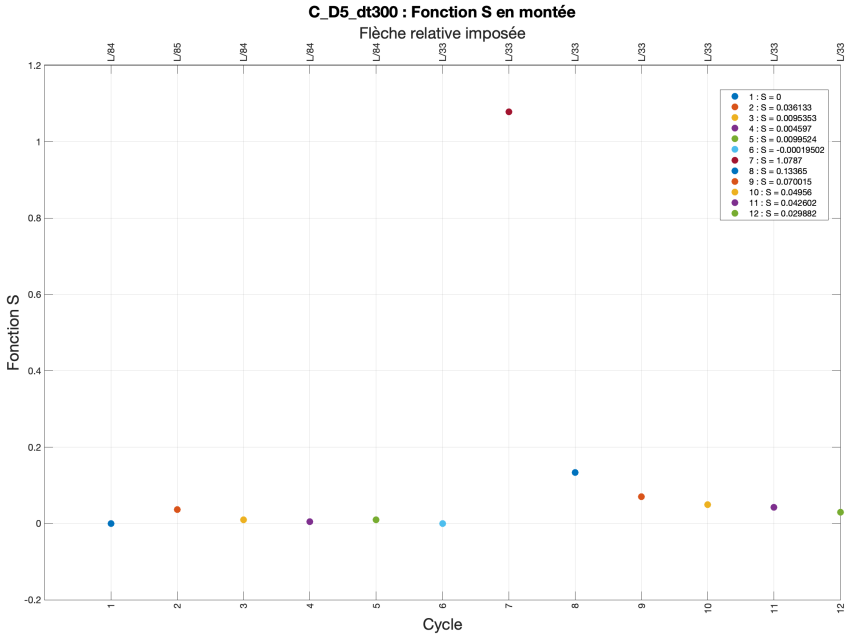


FIGURE M.246 – Fonction S en montée de l'éprouvette C_D5_dt300 de la batterie 3

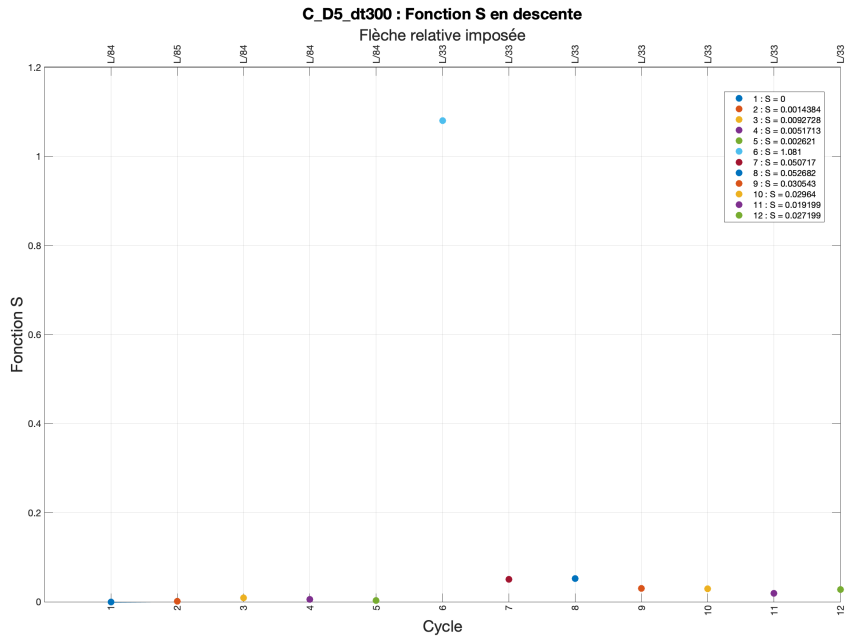


FIGURE M.247 – Fonction S en descente de l'éprouvette C_D5_dt300 de la batterie 3

Chargement statique *a posteriori*

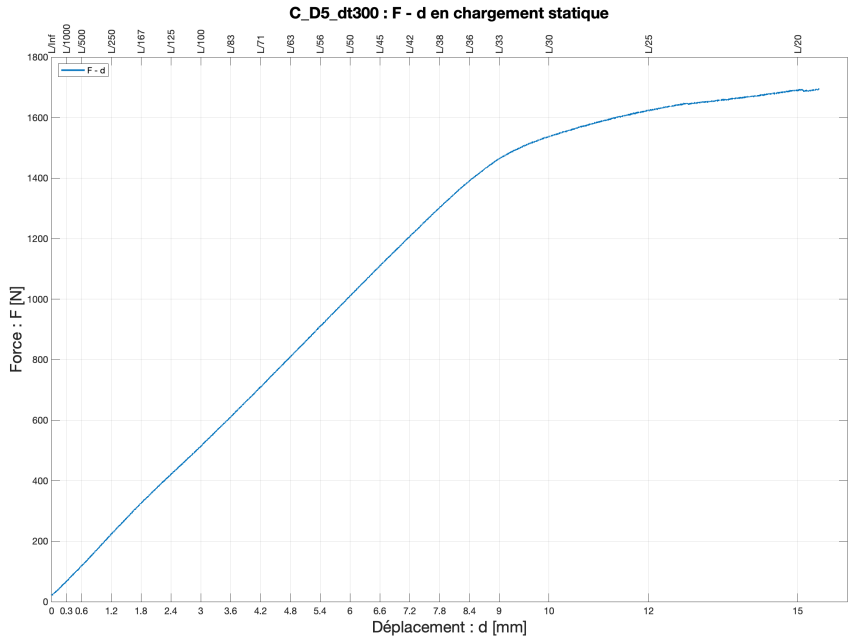


Figure M.248 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette C_D5_dt300 de la batterie 3

M.4 Batterie 4 : Vitesses de chargement et de déchargement

Éprouvette D_C1_0495

Global

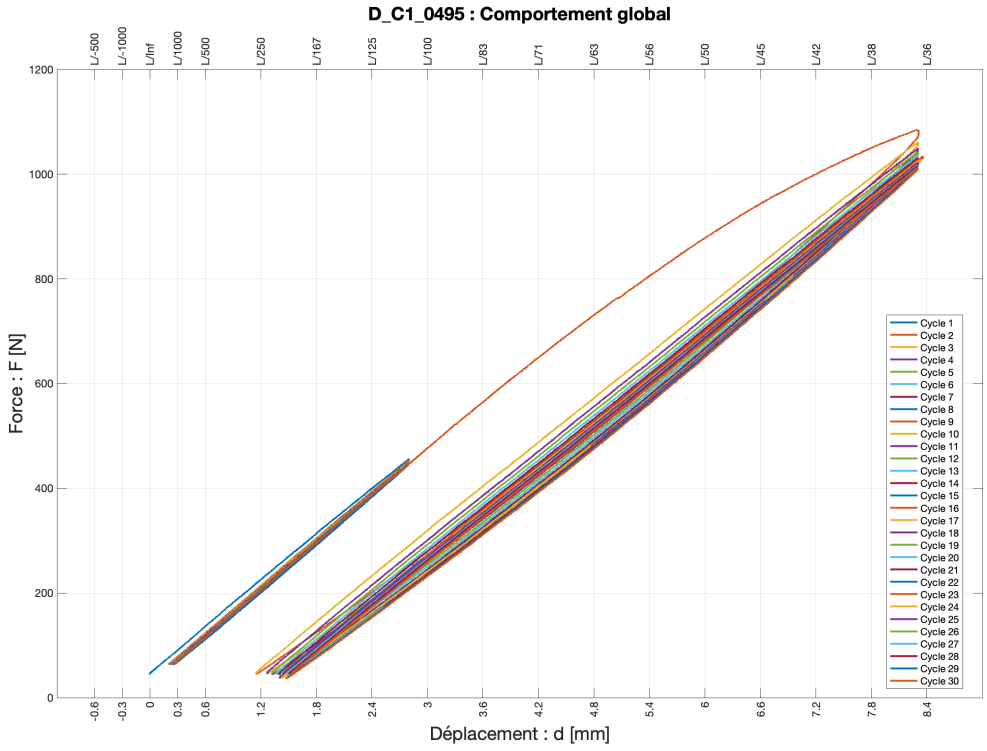


FIGURE M.249 – Comportement global de l'éprouvette D_C1_0495 de la batterie 4

Déplacement résiduel

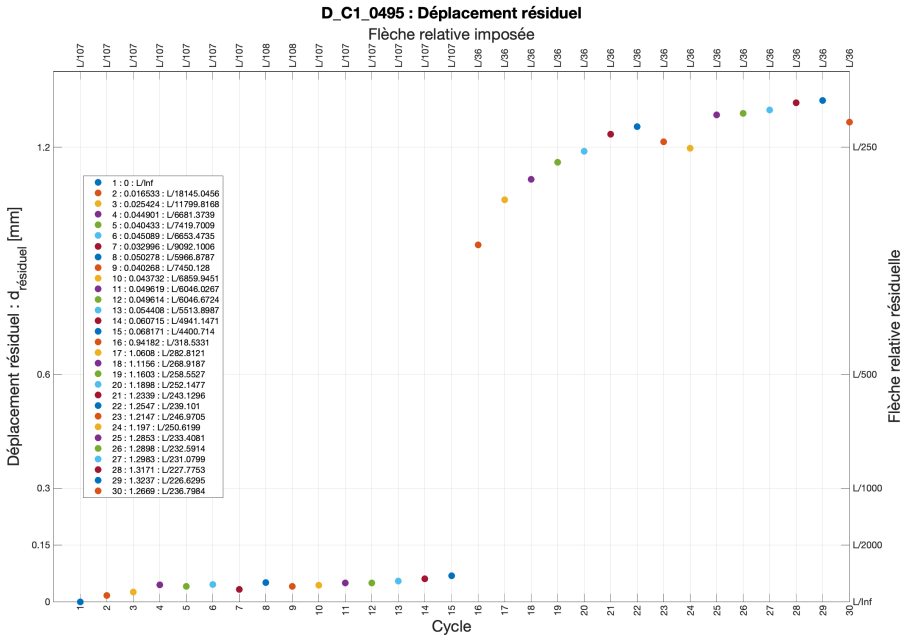


Figure M.250 – Déplacement résiduel de l'éprouvette D_C1_0495 de la batterie 4

Force maximale

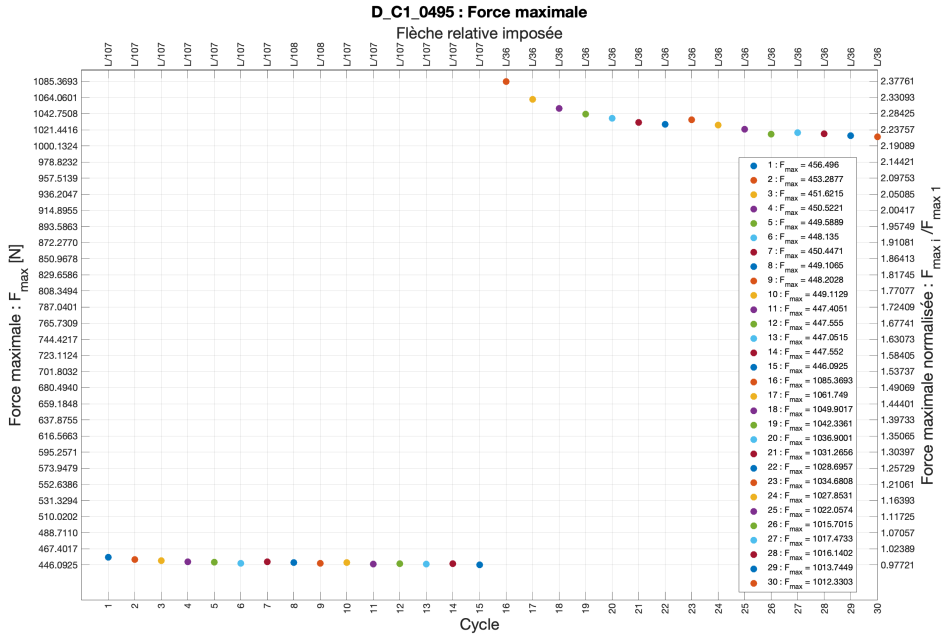


Figure M.251 – Force maximale de l'éprouvette D_C1_0495 de la batterie 4

Module de Young

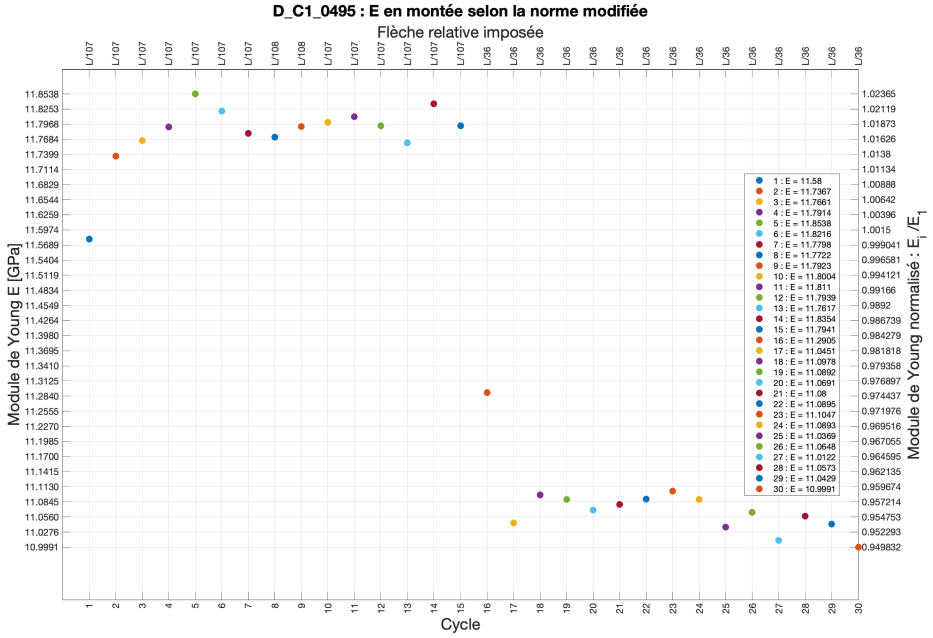


FIGURE M.252 – Module de Young en montée de l'éprouvette D_C1_0495 de la batterie 4

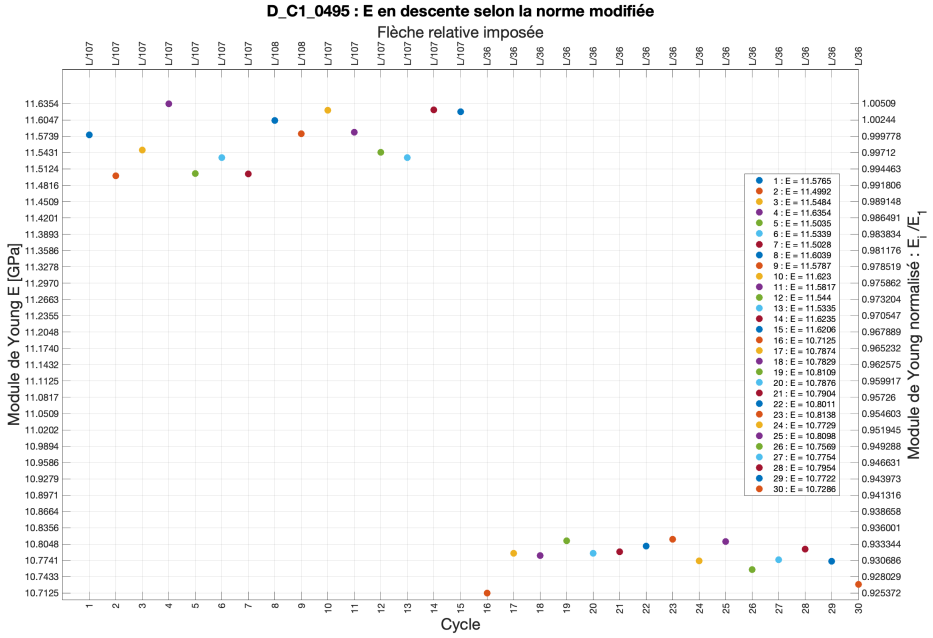


FIGURE M.253 – Module de Young en descente de l'éprouvette D_C1_0495 de la batterie 4

Rigidité flexionnelle

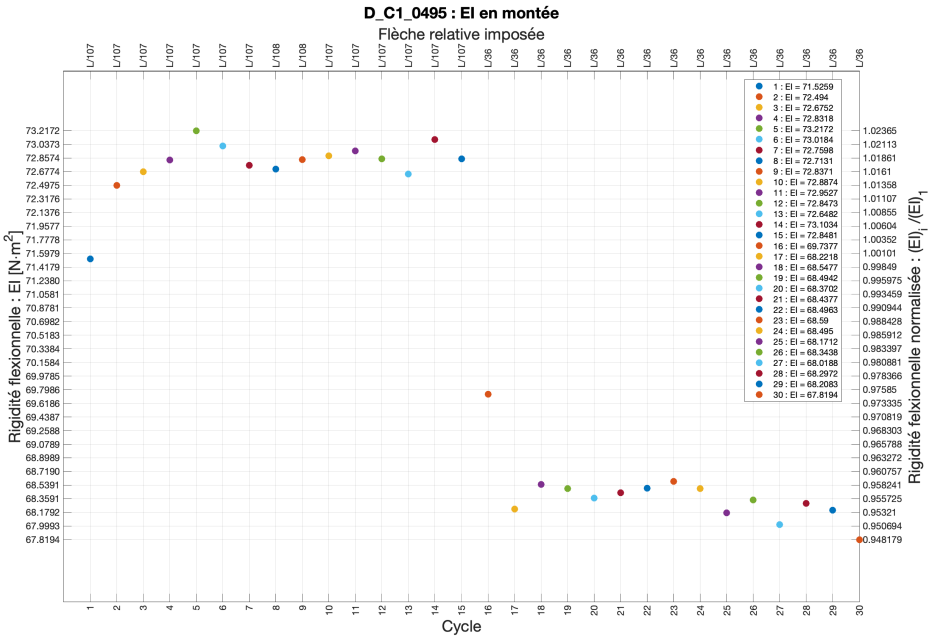


Figure M.254 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette D_C1_0495 de la batterie 4

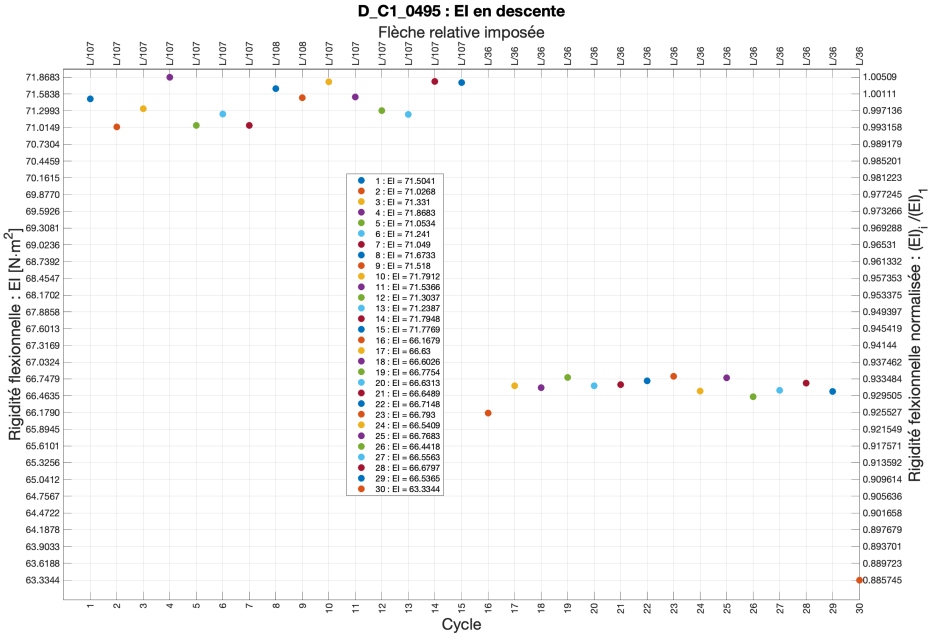


Figure M.255 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette D_C1_0495 de la batterie 4

Fonction S

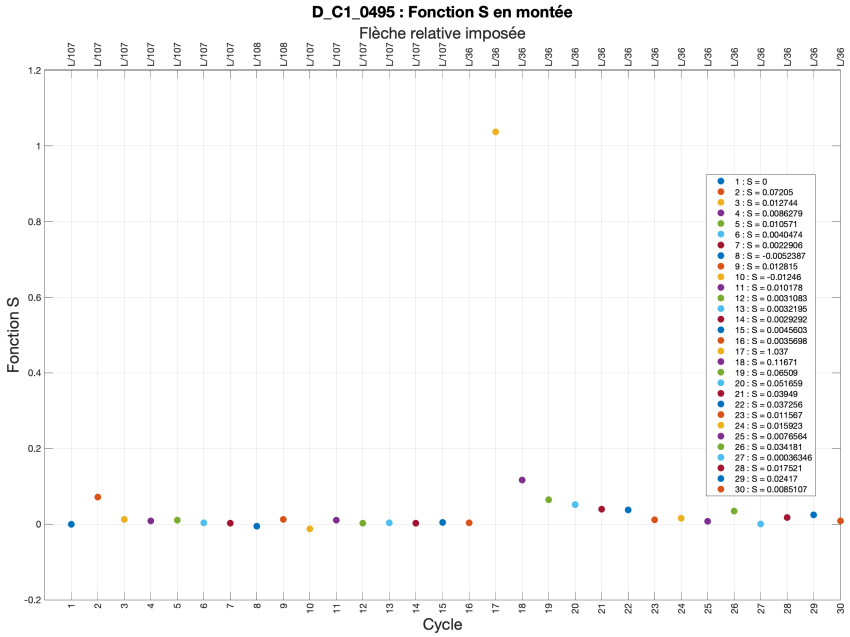


FIGURE M.256 – Fonction S en montée de l'éprouvette D_C1_0495 de la batterie 4

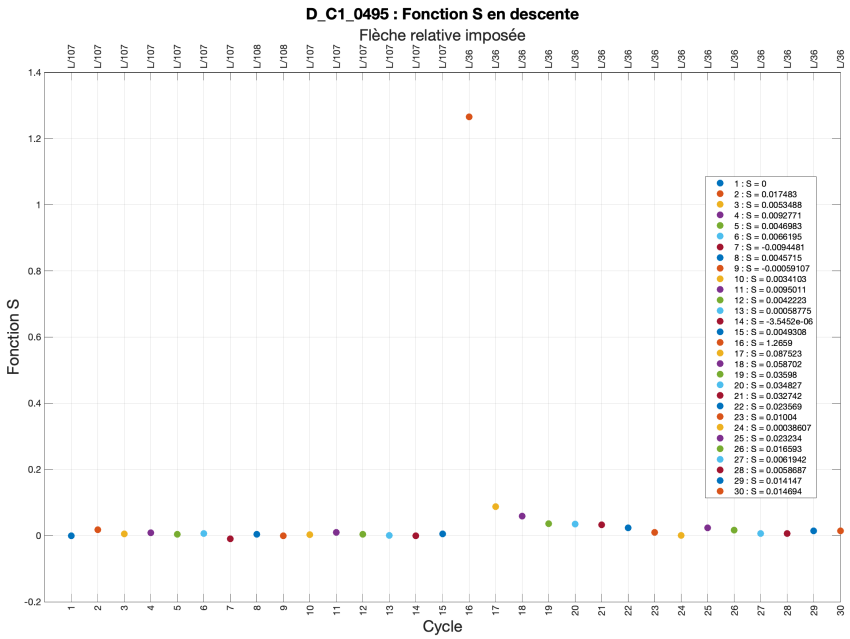


FIGURE M.257 – Fonction S en descente de l'éprouvette D_C1_0495 de la batterie 4

Chargement statique *a posteriori*

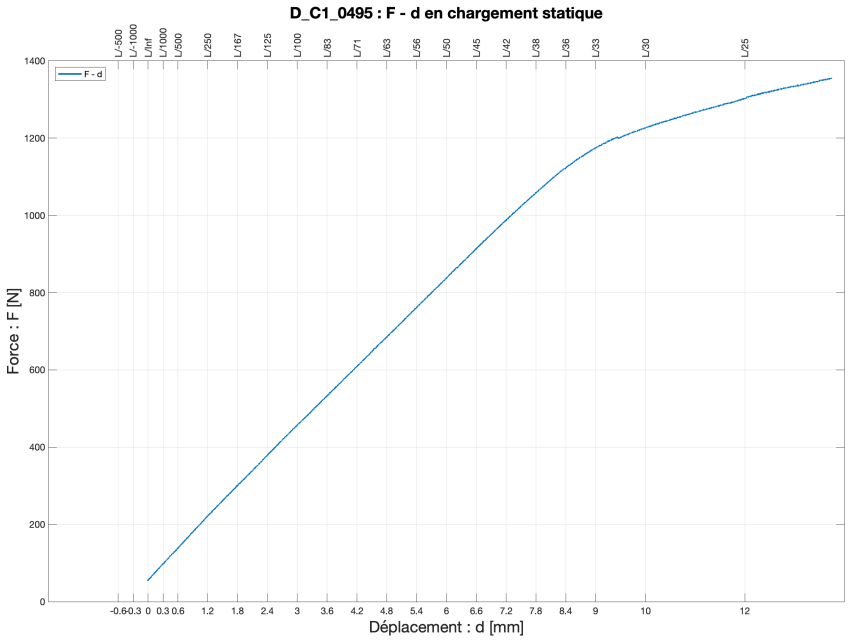


Figure M.258 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette D_C1_0495 de la batterie 4

Éprouvette D_C1_2475

Global

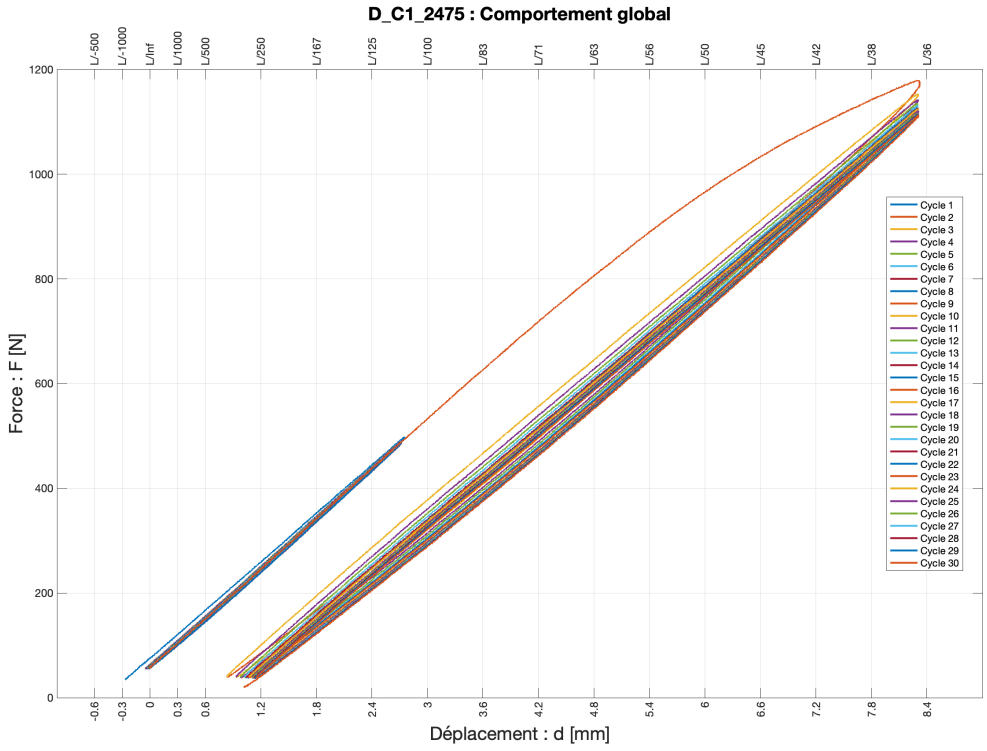


FIGURE M.259 – Comportement global de l'éprouvette D_C1_2475 de la batterie 4

Déplacement résiduel

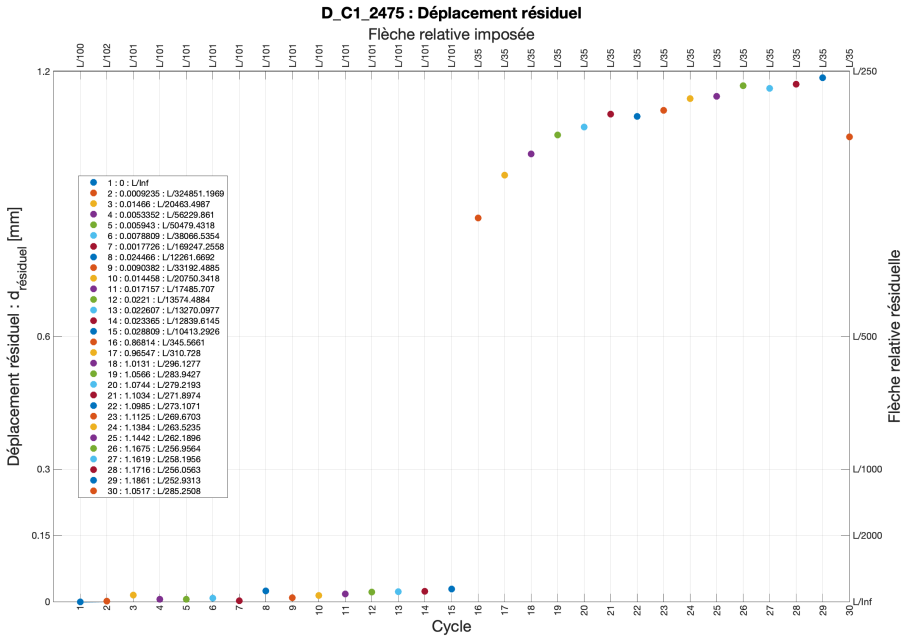


Figure M.260 – Déplacement résiduel de l'éprouvette D_C1_2475 de la batterie 4

Force maximale

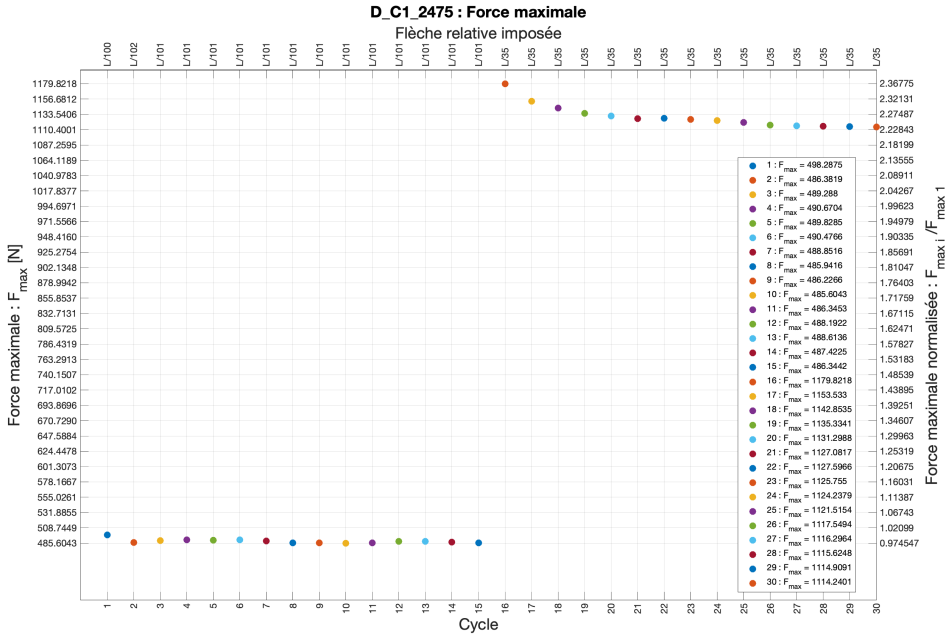


Figure M.261 – Force maximale de l'éprouvette D_C1_2475 de la batterie 4

Module de Young

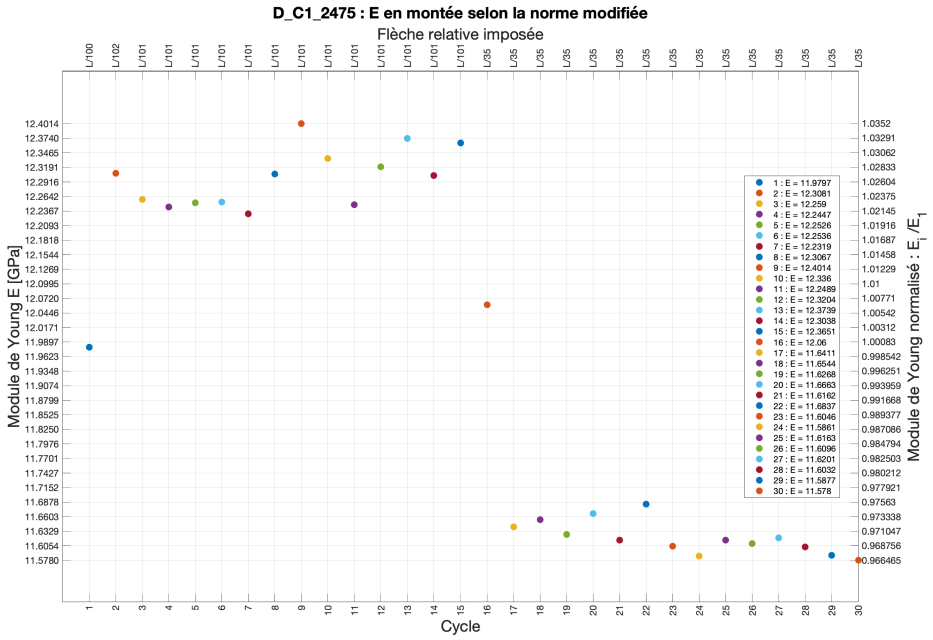


FIGURE M.262 – Module de Young en montée de l'éprouvette D_C1_2475 de la batterie 4

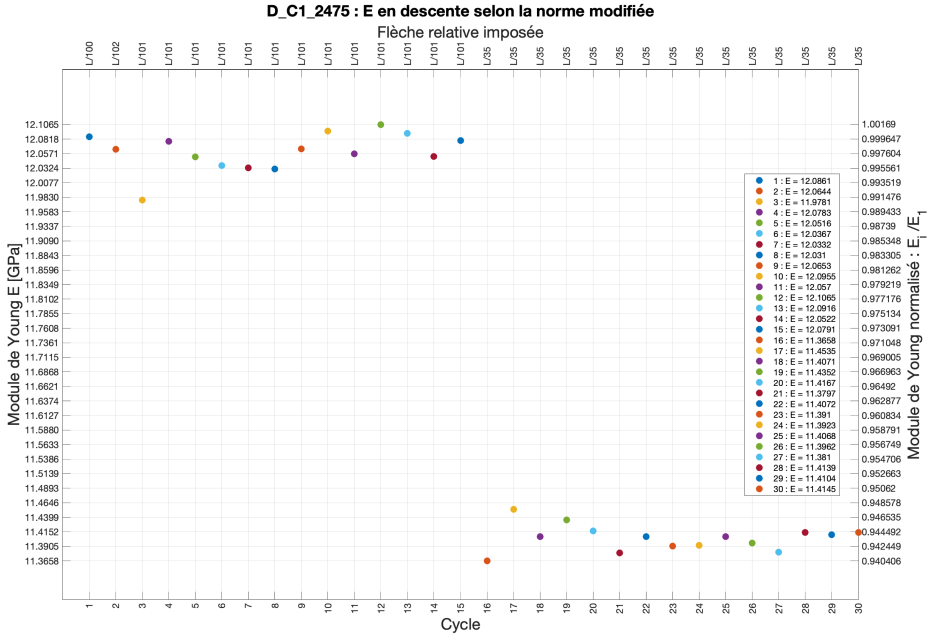


FIGURE M.263 – Module de Young en descente de l'éprouvette D_C1_2475 de la batterie 4

Rigidité flexionnelle

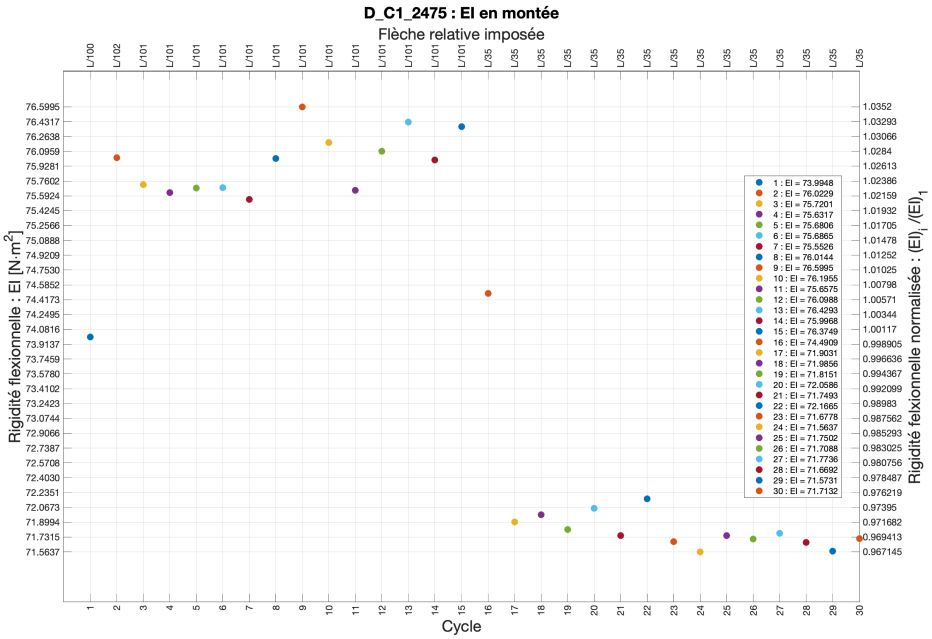


Figure M.264 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette D_C1_2475 de la batterie 4

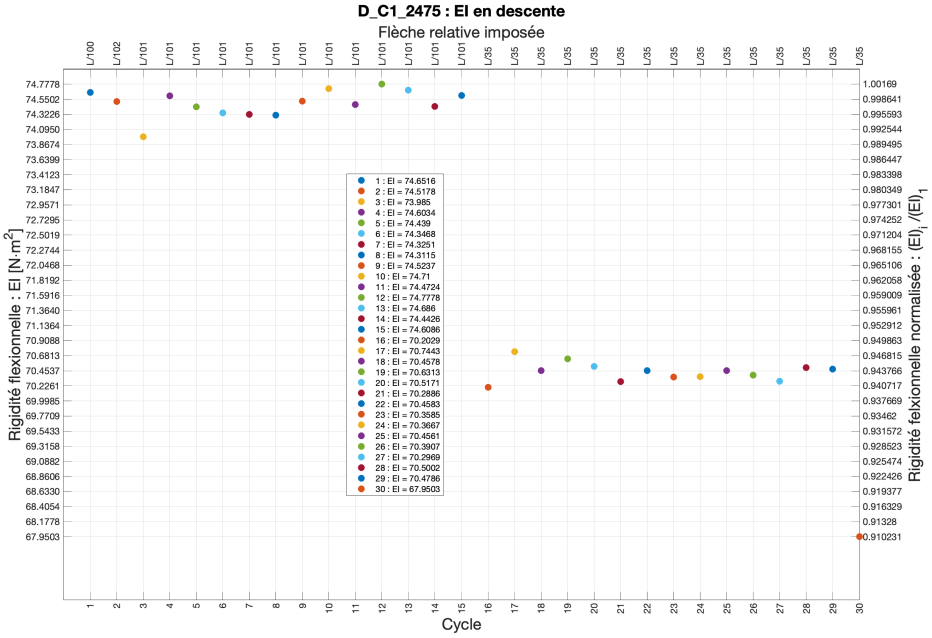


Figure M.265 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette D_C1_2475 de la batterie 4

Fonction S

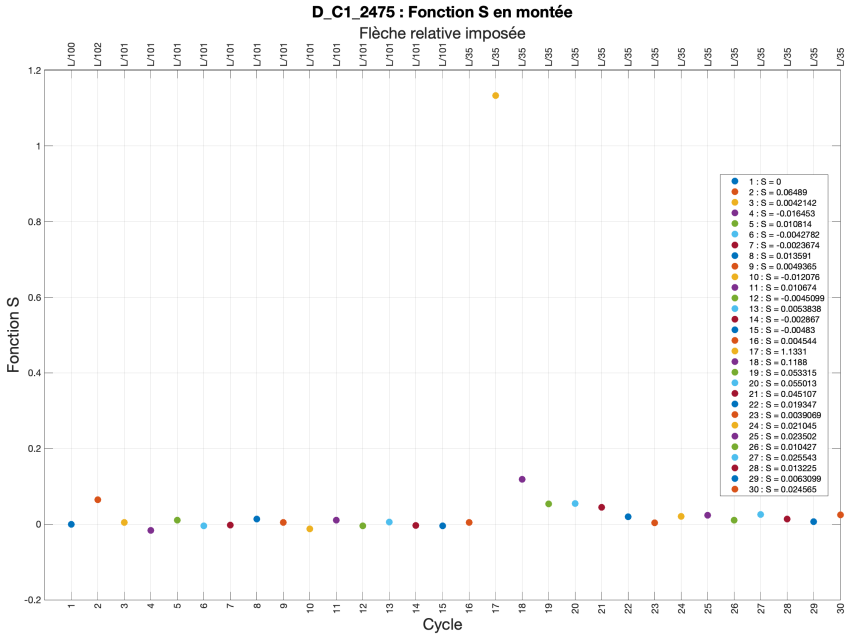


FIGURE M.266 – Fonction S en montée de l'éprouvette D_C1_2475 de la batterie 4

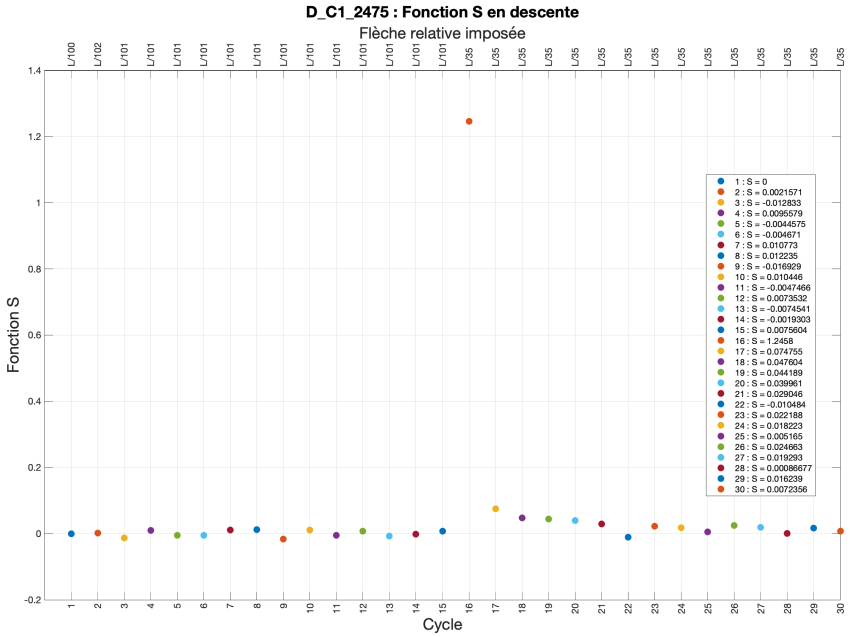


FIGURE M.267 – Fonction S en descente de l'éprouvette D_C1_2475 de la batterie 4

Chargement statique *a posteriori*

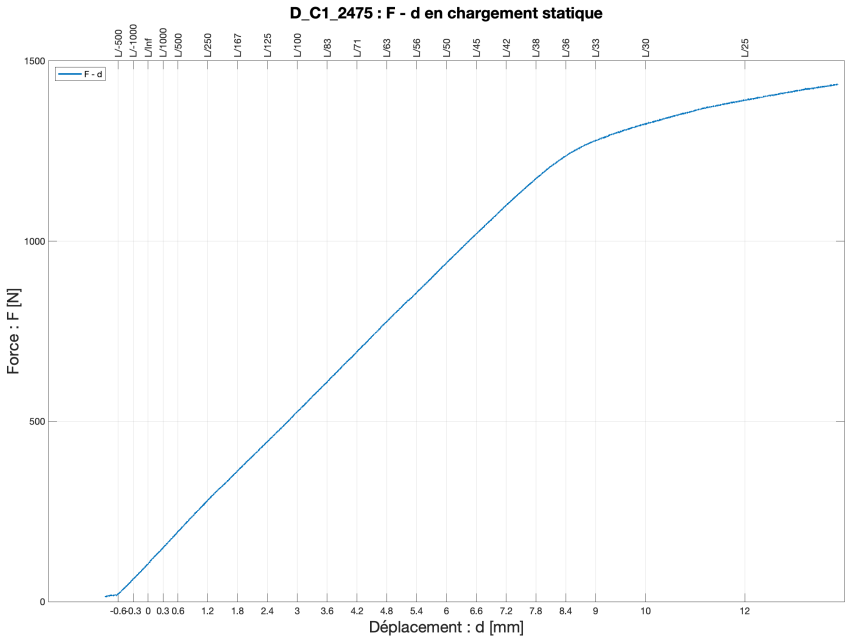


Figure M.268 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette D_C1_2475 de la batterie 4

Éprouvette D_C2_0495

Global

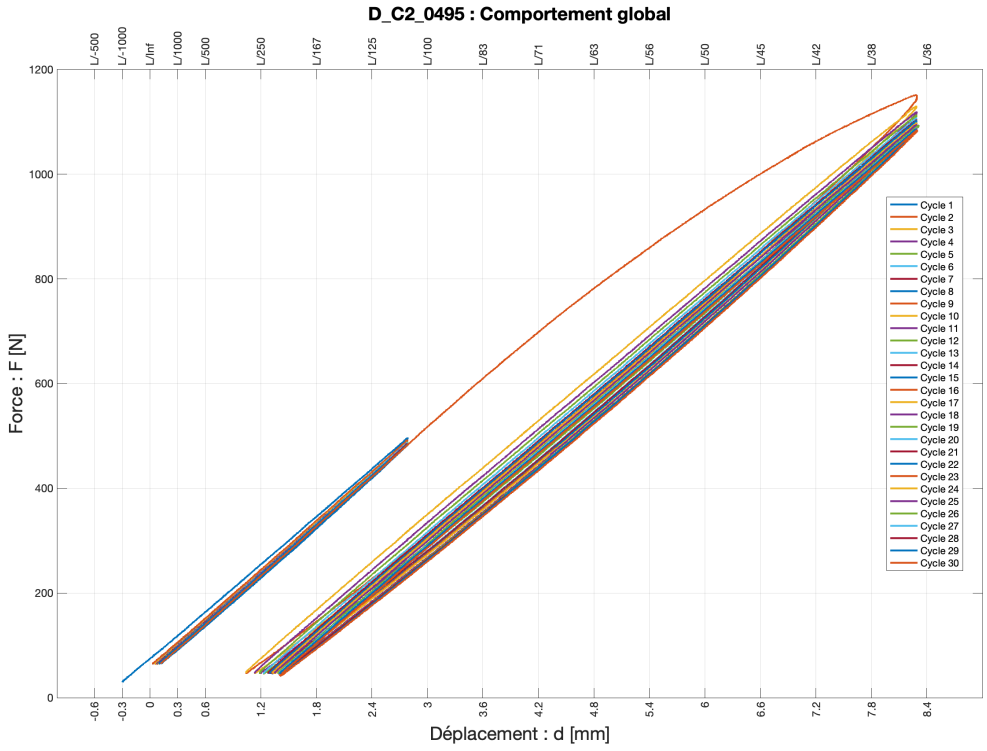


FIGURE M.269 – Comportement global de l'éprouvette D_C2_0495 de la batterie 4

Déplacement résiduel

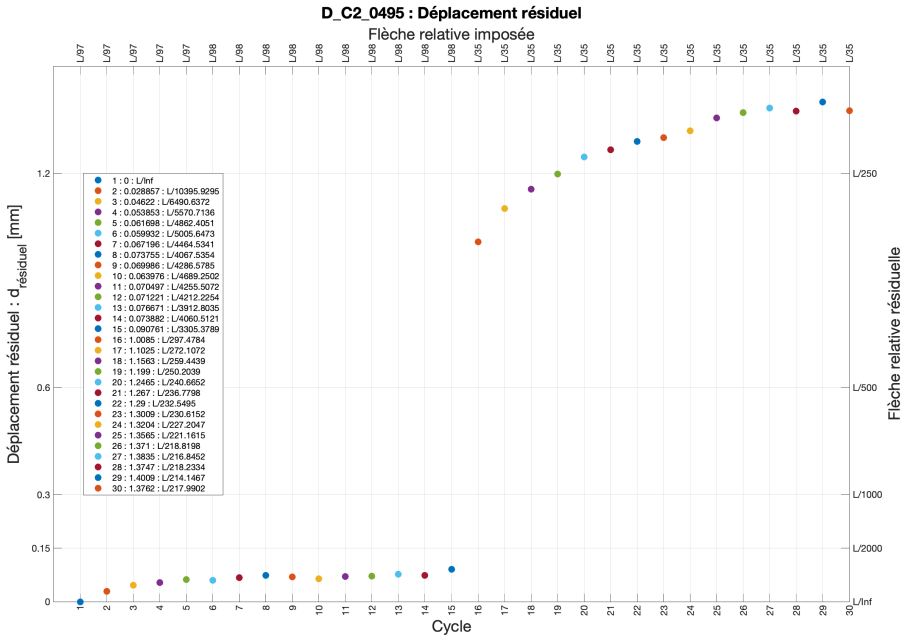


Figure M.270 – Déplacement résiduel de l'éprouvette D_C2_0495 de la batterie 4

Force maximale

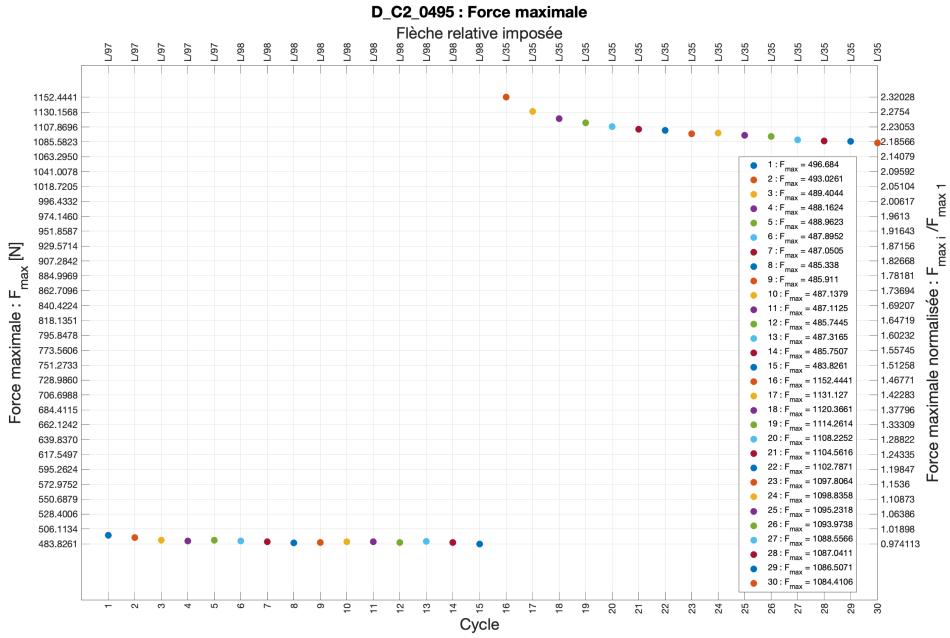


Figure M.271 – Force maximale de l'éprouvette D_C2_0495 de la batterie 4

Module de Young

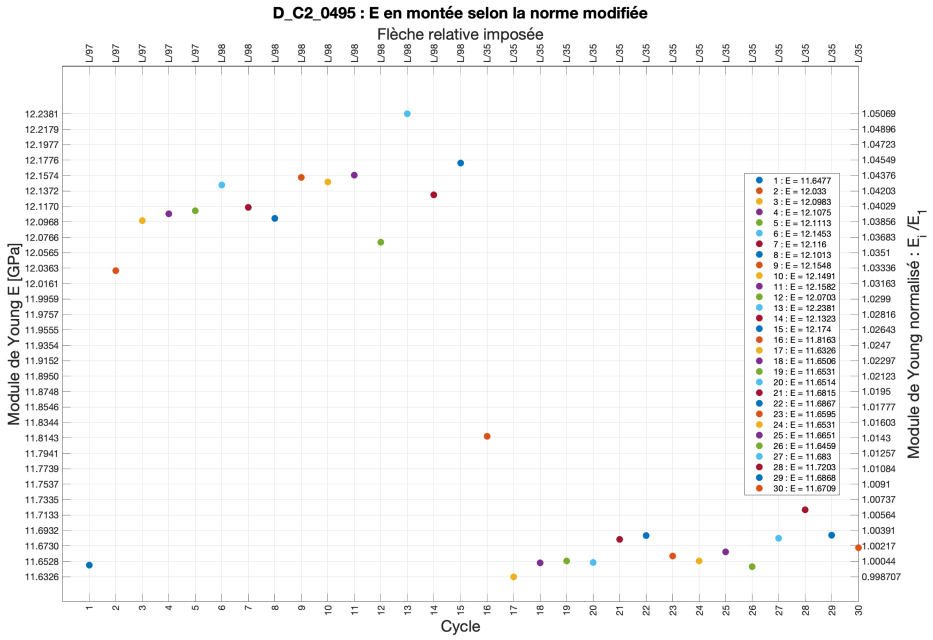


FIGURE M.272 – Module de Young en montée de l'éprouvette D_C2_0495 de la batterie 4

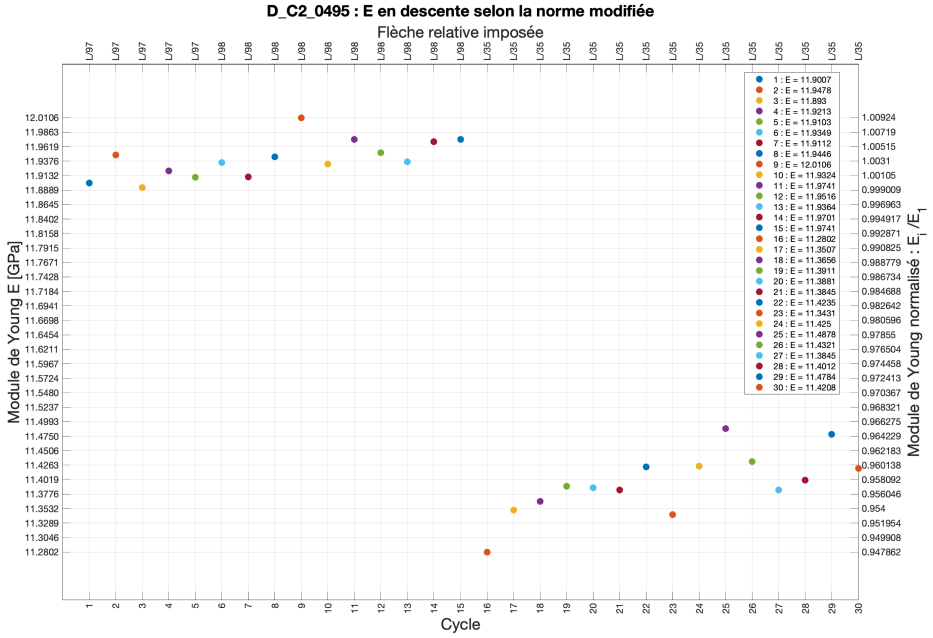


FIGURE M.273 – Module de Young en descente de l'éprouvette D_C2_0495 de la batterie 4

Rigidité flexionnelle

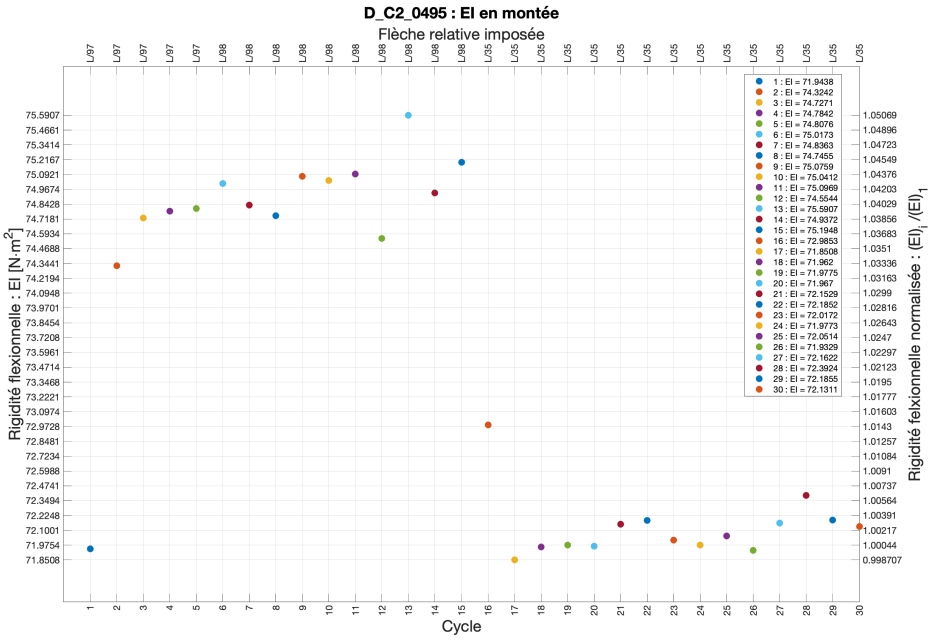


Figure M.274 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette D_C2_0495 de la batterie 4

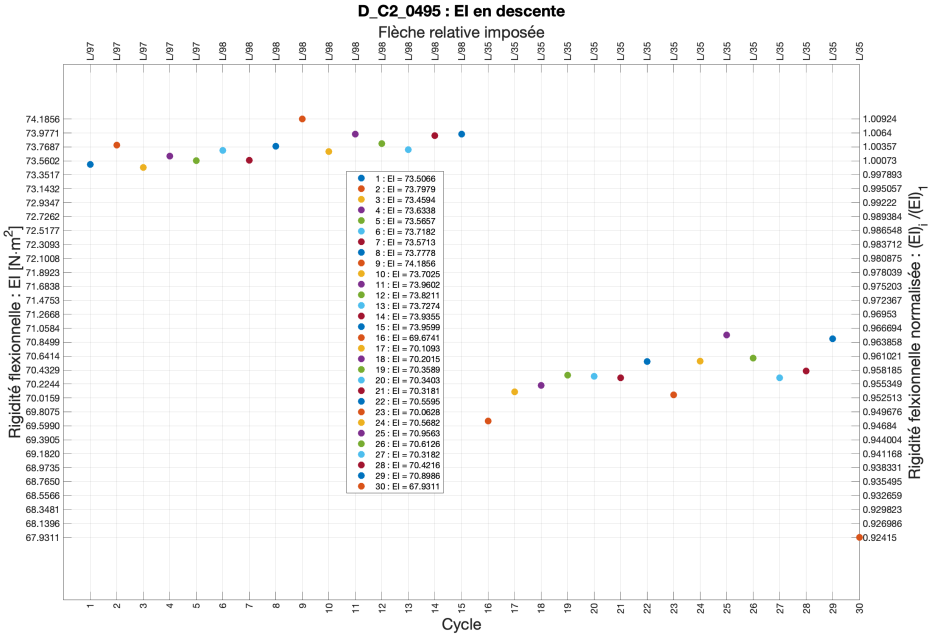


Figure M.275 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette D_C2_0495 de la batterie 4

Fonction S

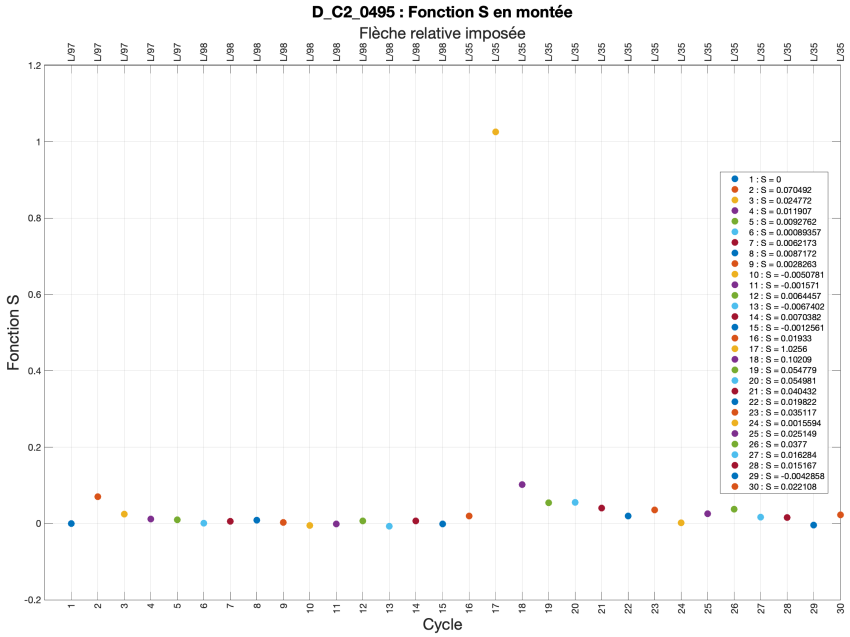


FIGURE M.276 – Fonction S en montée de l'éprouvette D_C2_0495 de la batterie 4

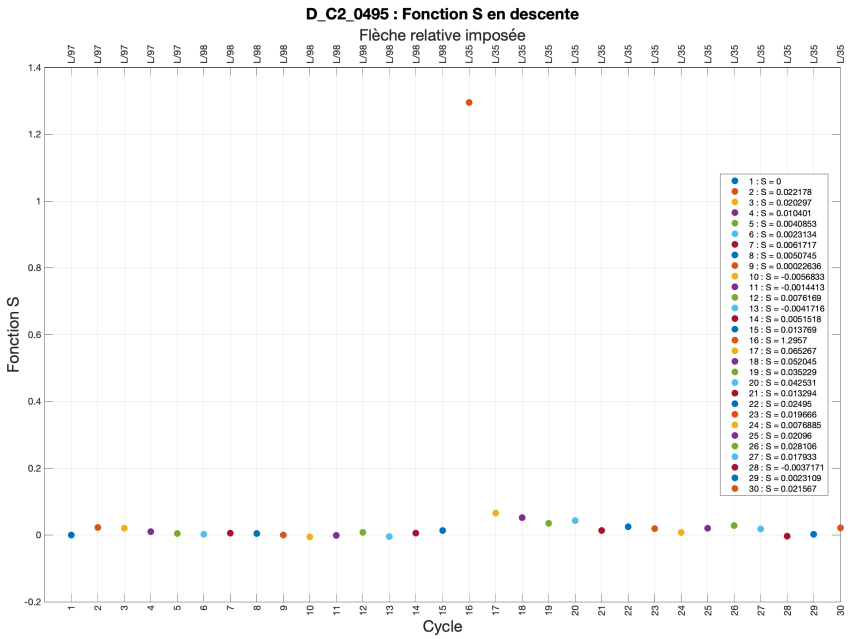


FIGURE M.277 – Fonction S en descente de l'éprouvette D_C2_0495 de la batterie 4

Chargement statique *a posteriori*

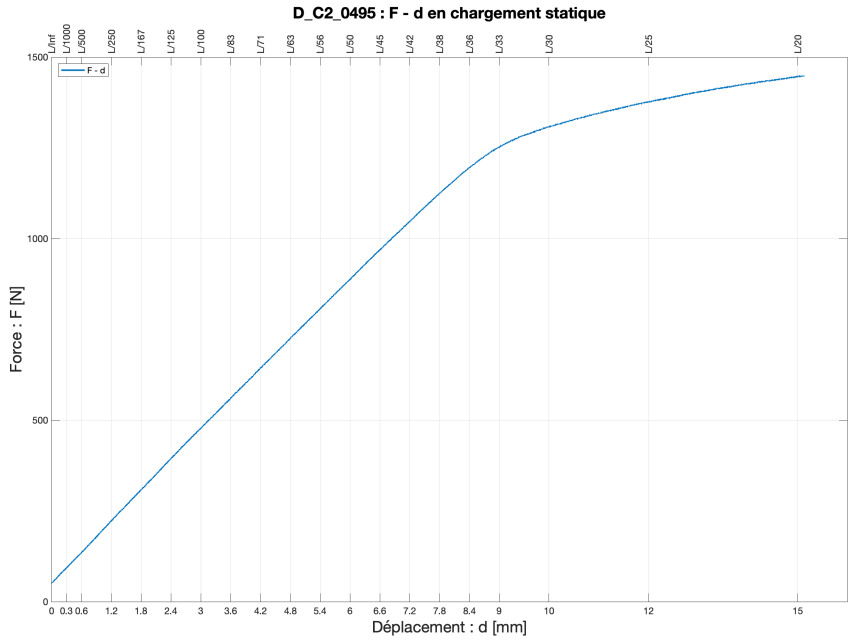


Figure M.278 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette D_C2_0495 de la batterie 4

Éprouvette D_C2_2475

Global

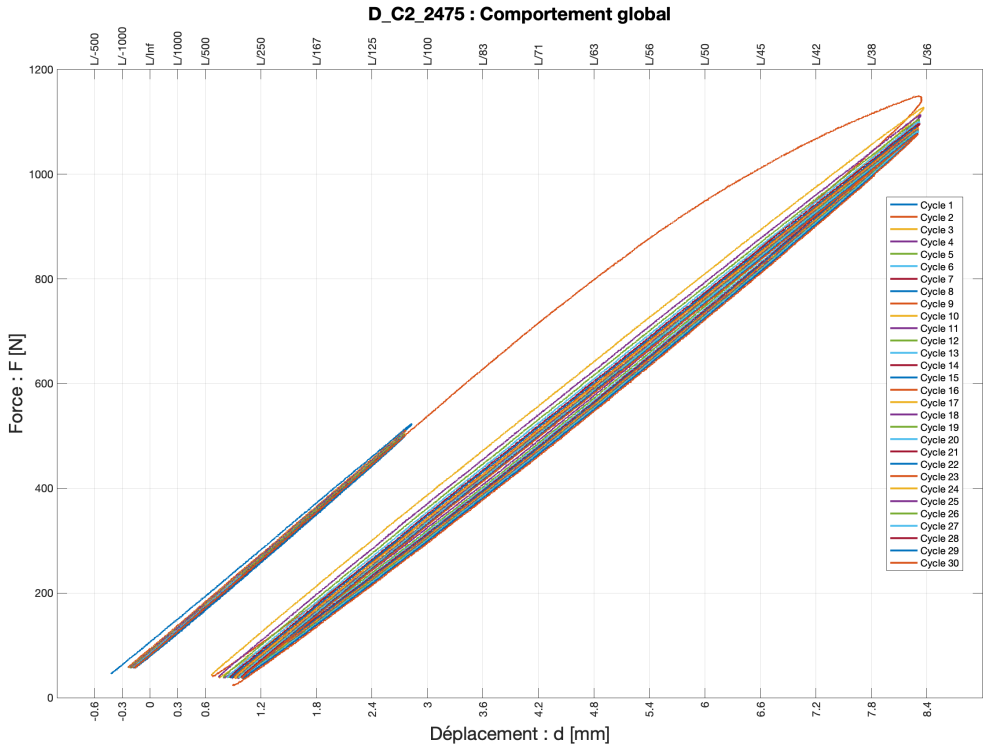


FIGURE M.279 – Comportement global de l'éprouvette D_C2_2475 de la batterie 4

Déplacement résiduel

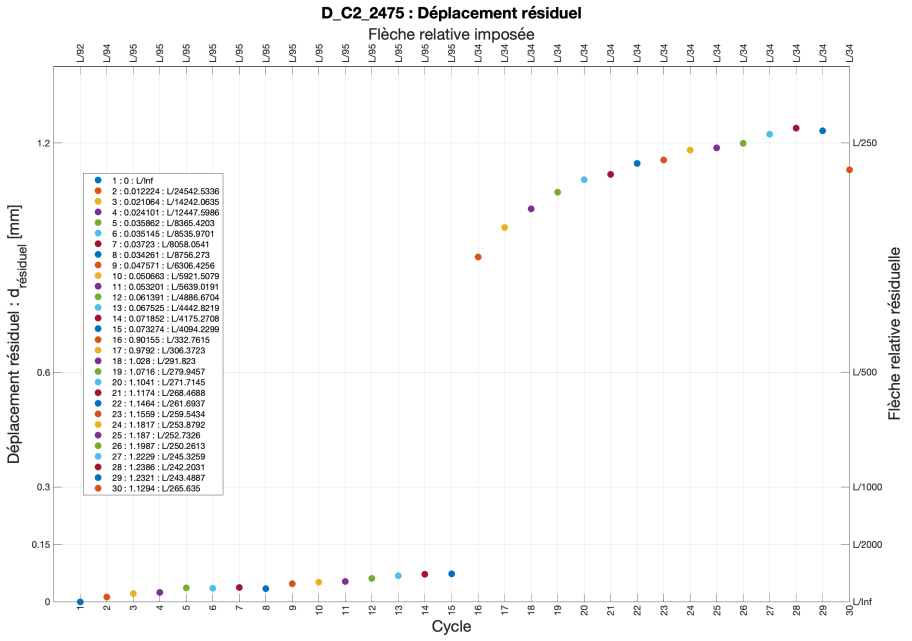


Figure M.280 – Déplacement résiduel de l'éprouvette D_C2_2475 de la batterie 4

Force maximale

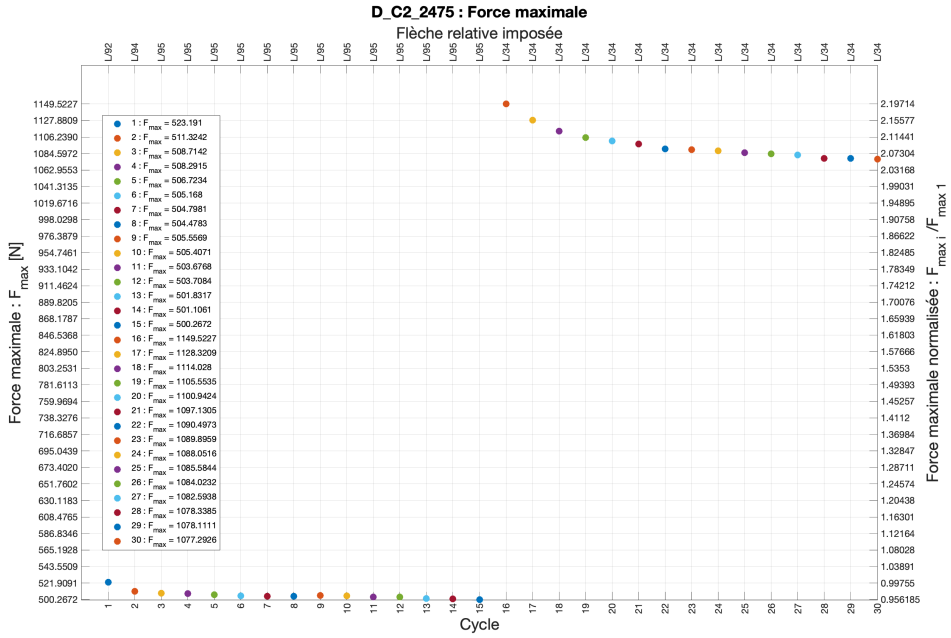


Figure M.281 – Force maximale de l'éprouvette D_C2_2475 de la batterie 4

Module de Young

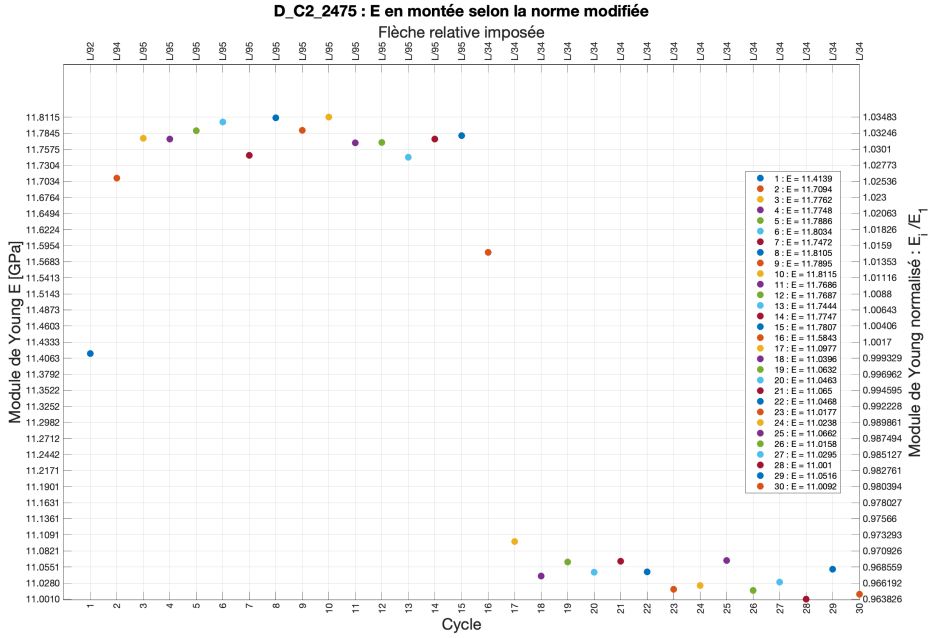


FIGURE M.282 – Module de Young en montée de l'éprouvette D_C2_2475 de la batterie 4

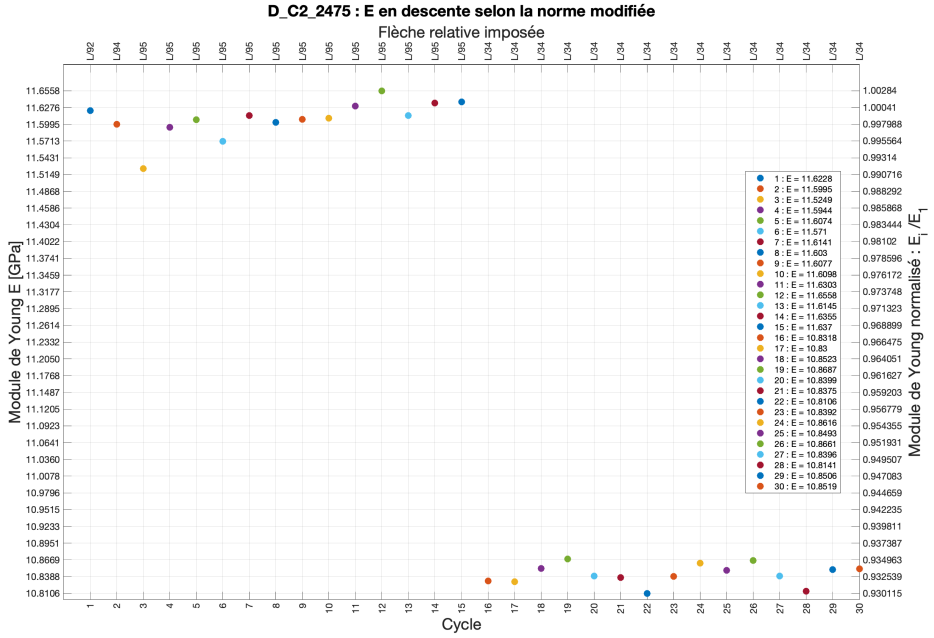


FIGURE M.283 – Module de Young en descente de l'éprouvette D_C2_2475 de la batterie 4

Rigidité flexionnelle

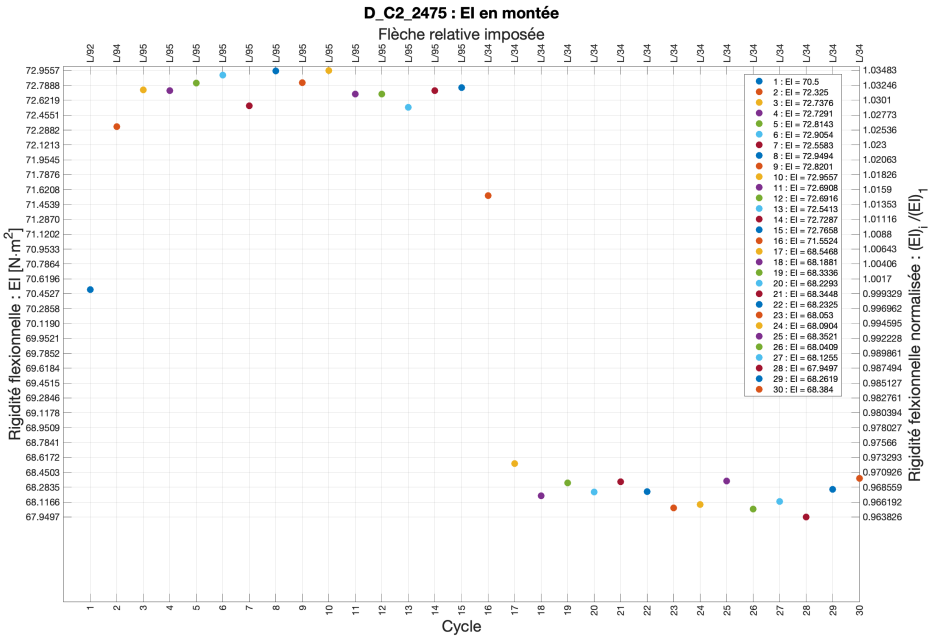


Figure M.284 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette D_C2_2475 de la batterie 4

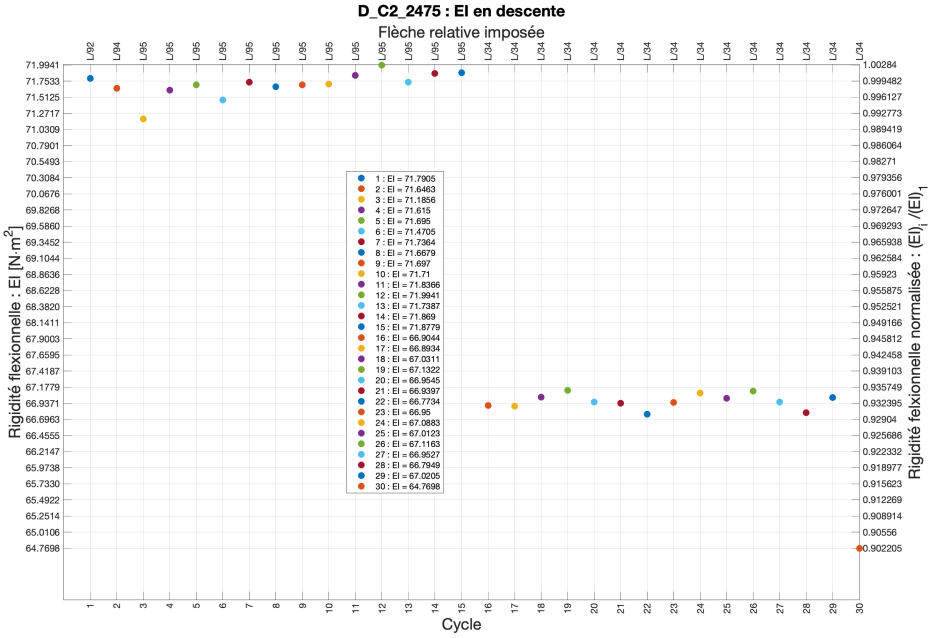


Figure M.285 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette D_C2_2475 de la batterie 4

Fonction S

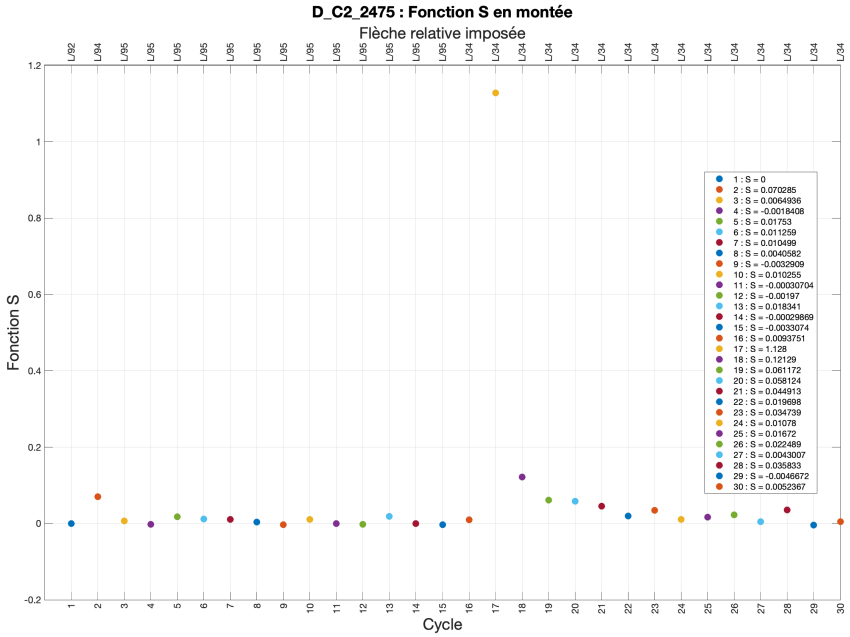


FIGURE M.286 – Fonction S en montée de l'éprouvette D_C2_2475 de la batterie 4

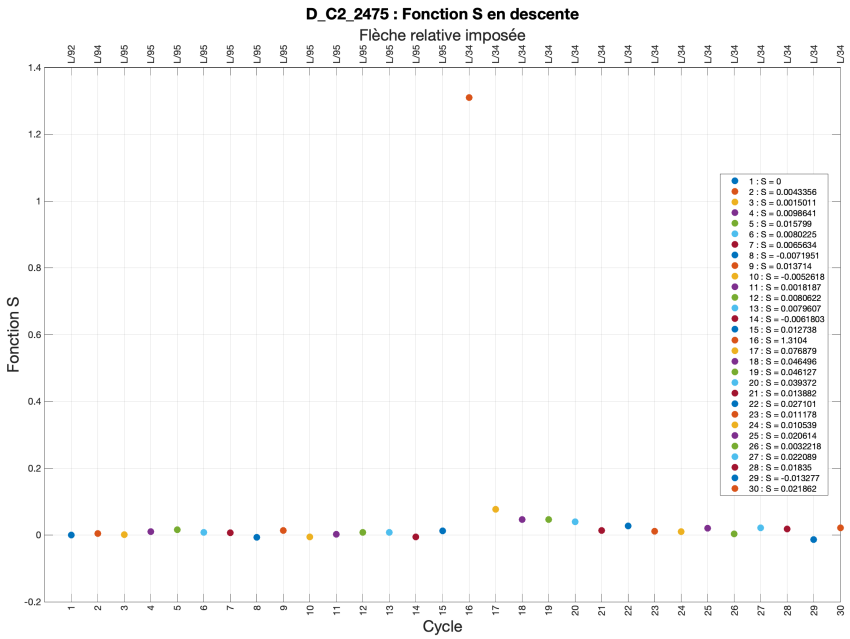


FIGURE M.287 – Fonction S en descente de l'éprouvette D_C2_2475 de la batterie 4

Chargement statique *a posteriori*

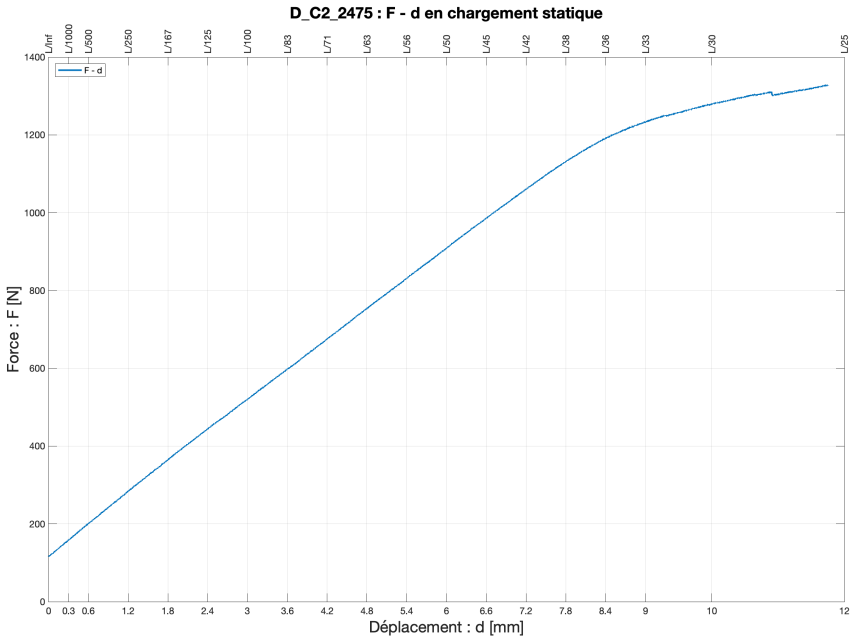


Figure M.288 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette D_C2_2475 de la batterie 4

Éprouvette D_D3_0495

Global

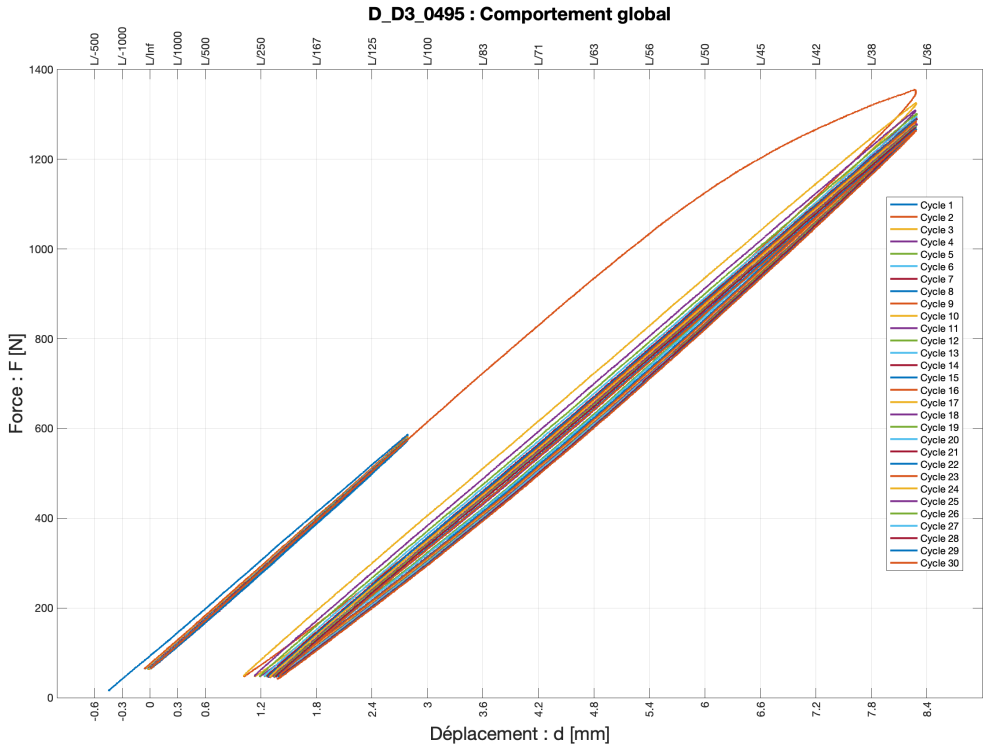


FIGURE M.289 – Comportement global de l'éprouvette D_D3_0495 de la batterie 4

Déplacement résiduel

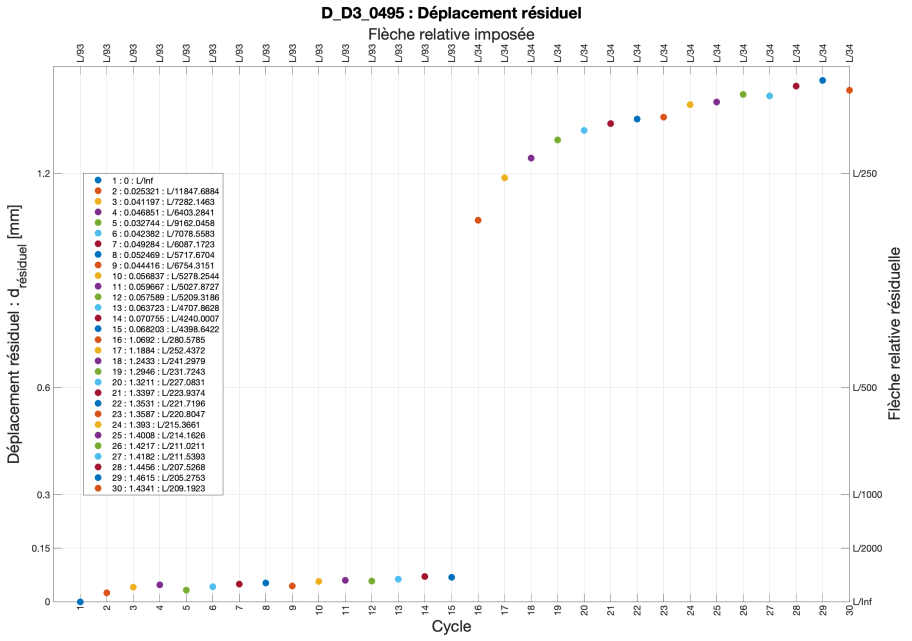


Figure M.290 – Déplacement résiduel de l'éprouvette D_D3_0495 de la batterie 4

Force maximale

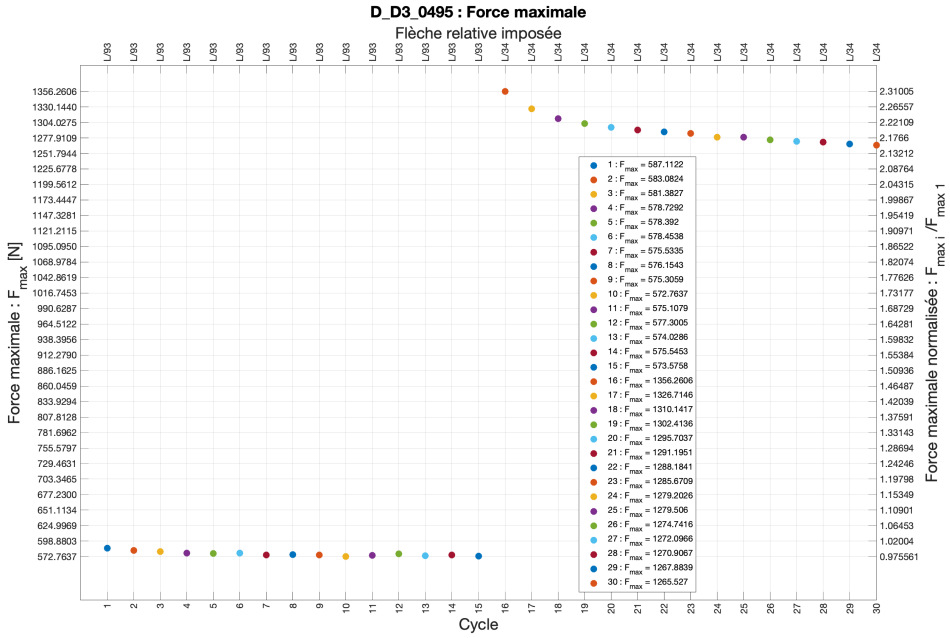


Figure M.291 – Force maximale de l'éprouvette D_D3_0495 de la batterie 4

Module de Young

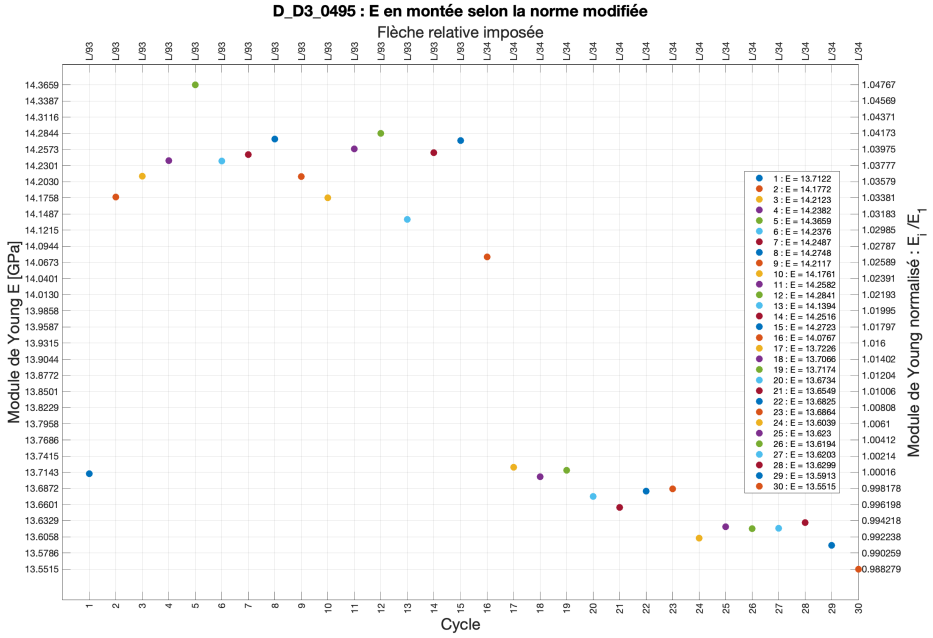


FIGURE M.292 – Module de Young en montée de l'éprouvette D_D3_0495 de la batterie 4

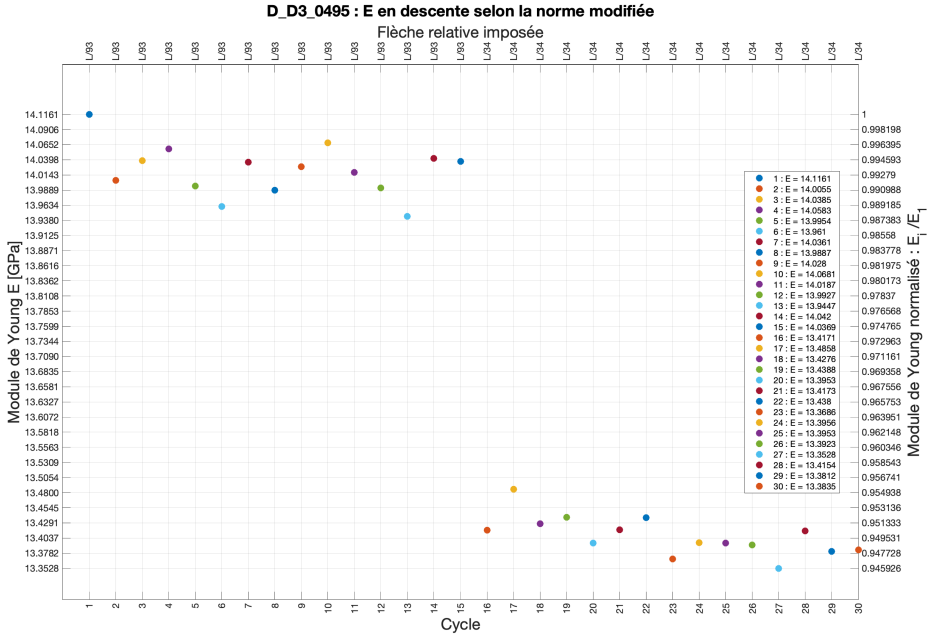


FIGURE M.293 – Module de Young en descente de l'éprouvette D_D3_0495 de la batterie 4

Rigidité flexionnelle

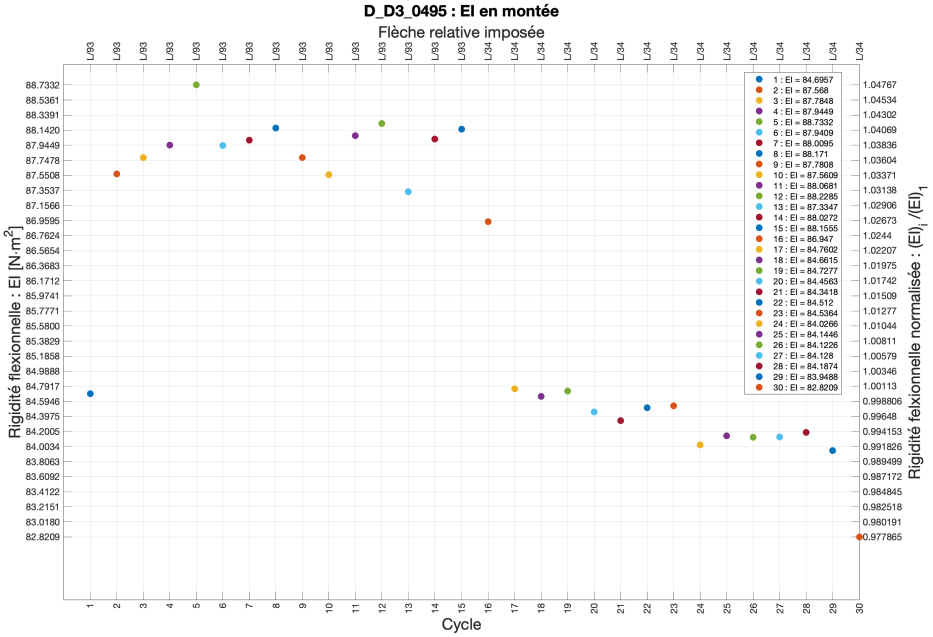


Figure M.294 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette D_D3_0495 de la batterie 4

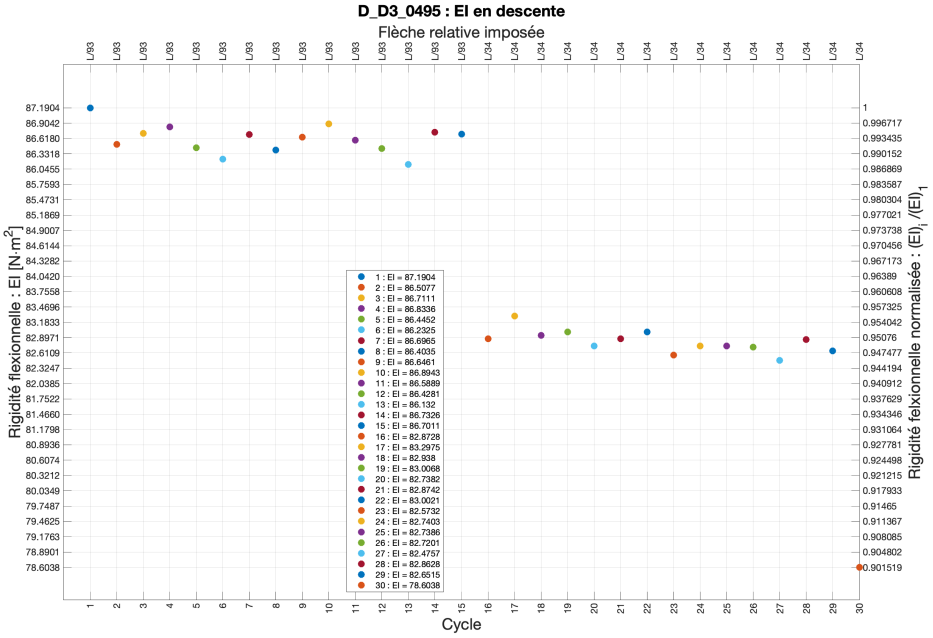


Figure M.295 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette D_D3_0495 de la batterie 4

Fonction S

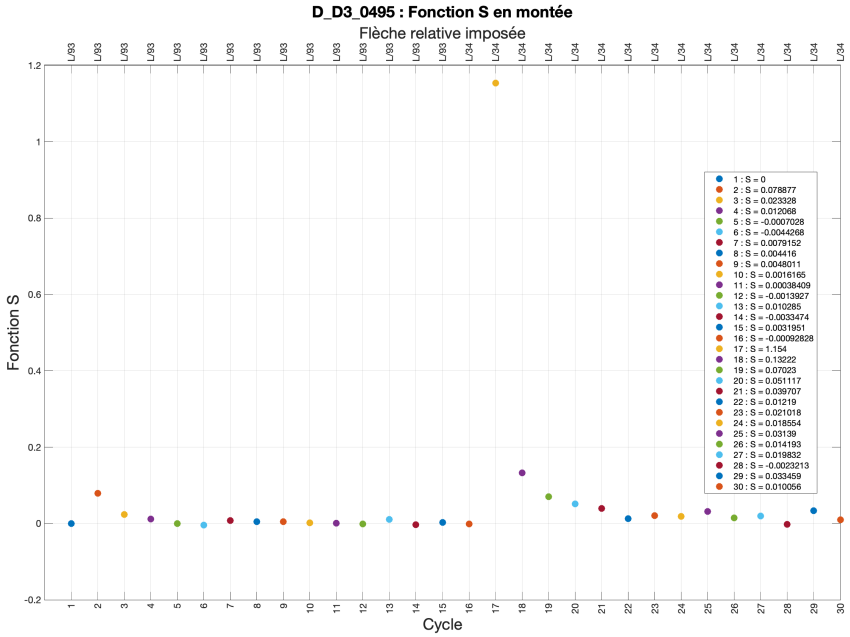


FIGURE M.296 – Fonction S en montée de l'éprouvette D_D3_0495 de la batterie 4

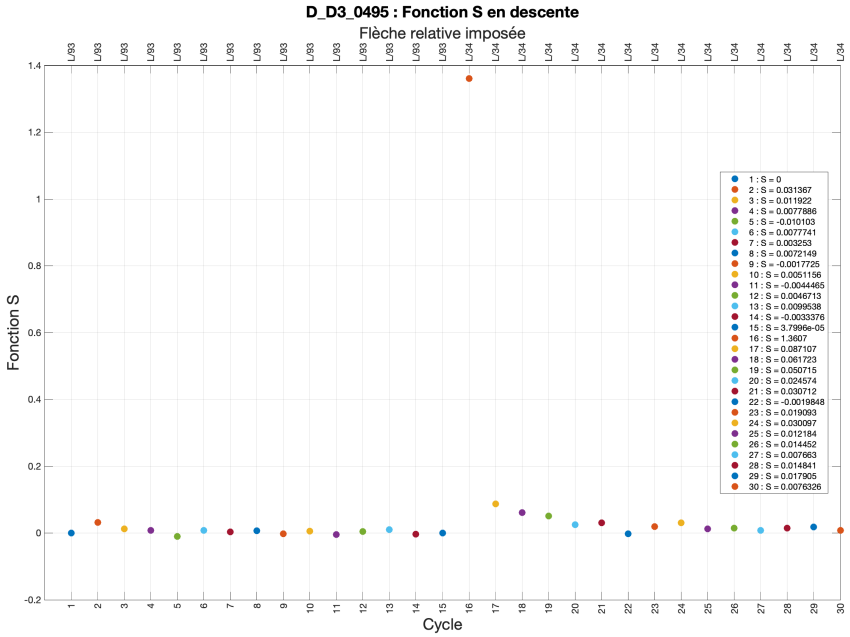


FIGURE M.297 – Fonction S en descente de l'éprouvette D_D3_0495 de la batterie 4

Chargement statique *a posteriori*

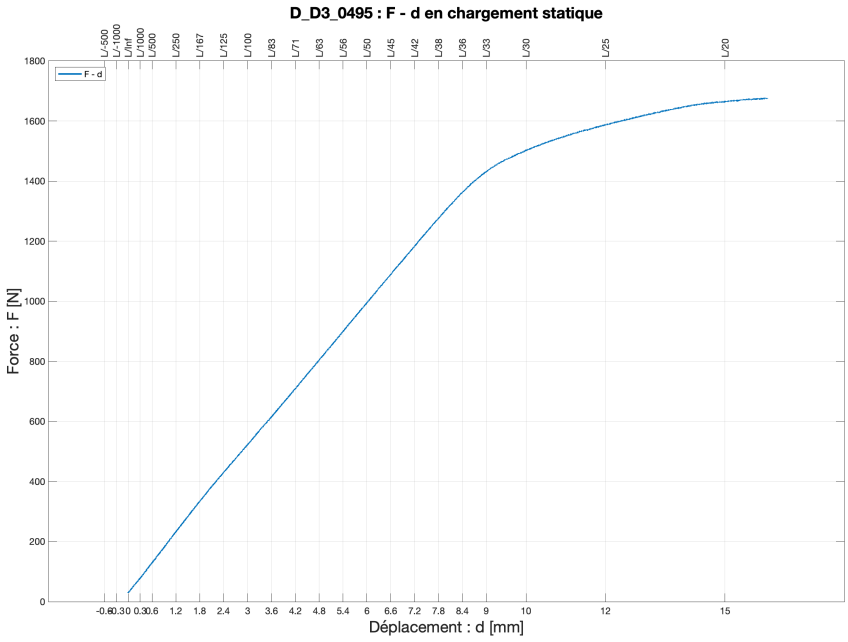


Figure M.298 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette D_D3_0495 de la batterie 4

Éprouvette D_D3_2475

Global

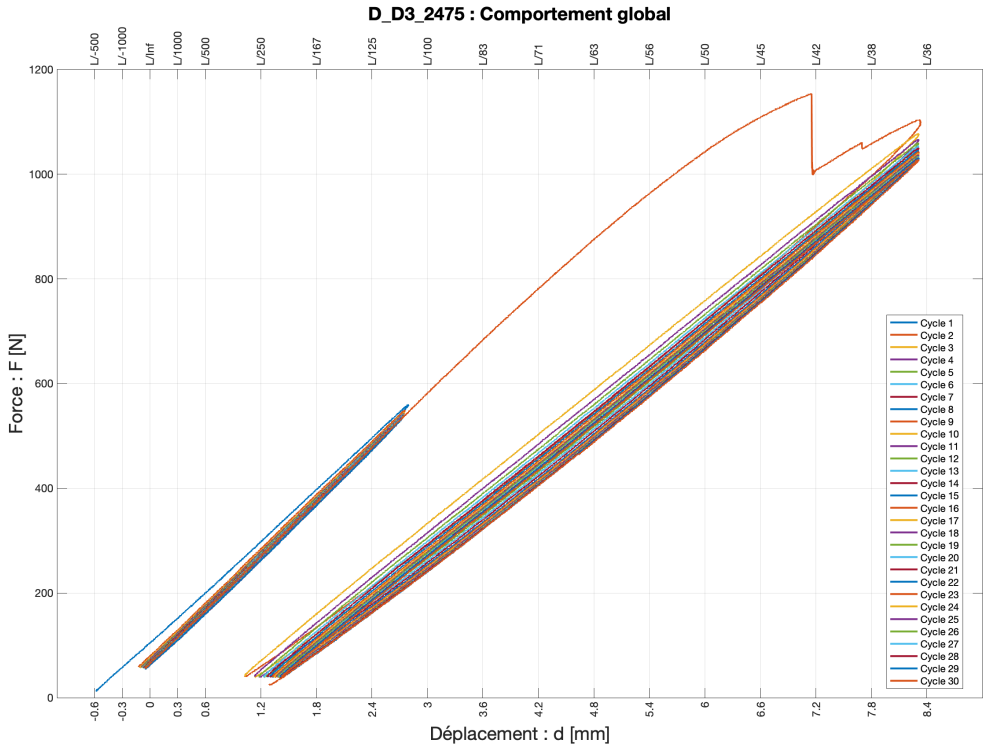


FIGURE M.299 – Comportement global de l'éprouvette D_D3_2475 de la batterie 4

Déplacement résiduel

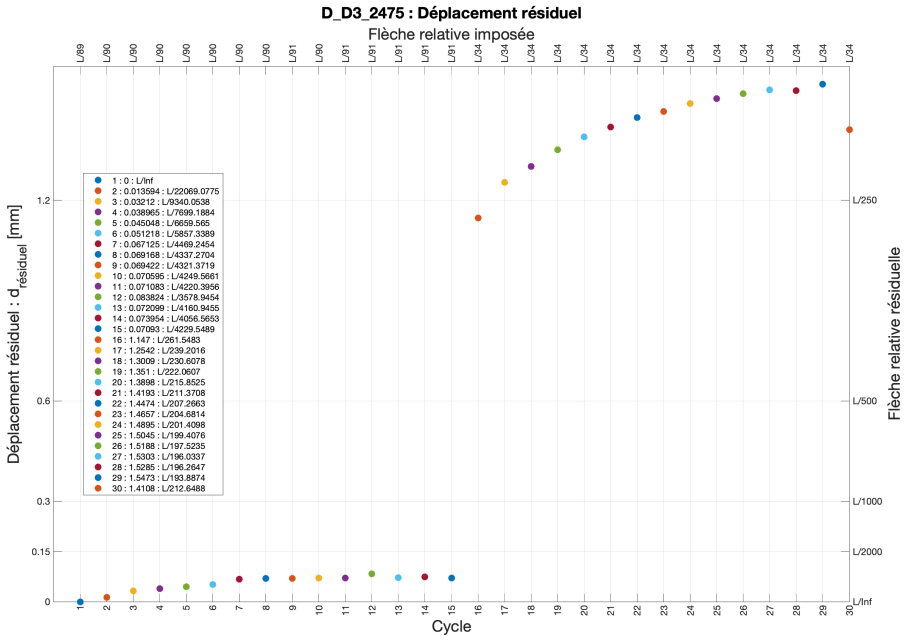


Figure M.300 – Déplacement résiduel de l'éprouvette D_D3_2475 de la batterie 4

Force maximale

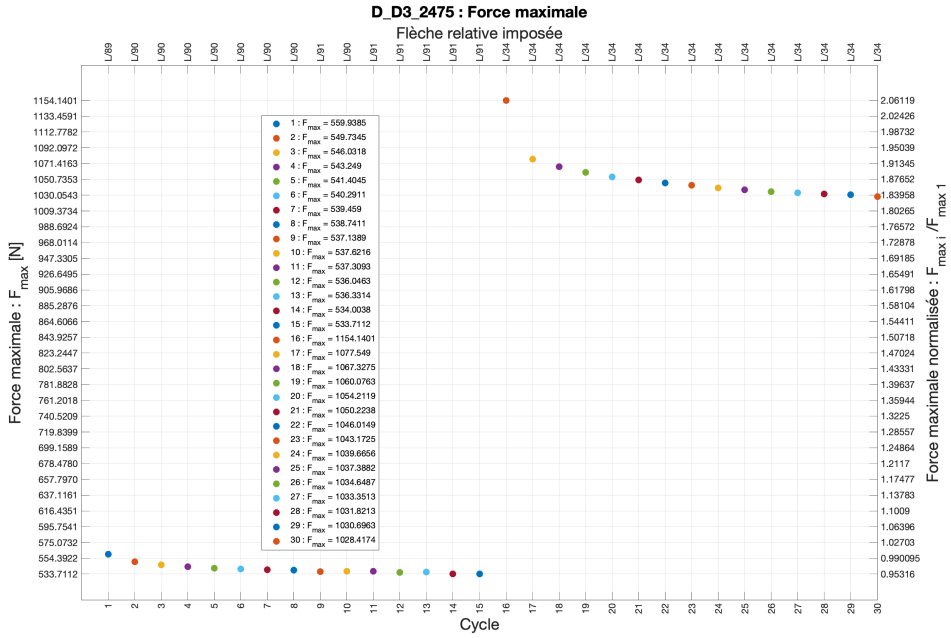


Figure M.301 – Force maximale de l'éprouvette D_D3_2475 de la batterie 4

Module de Young

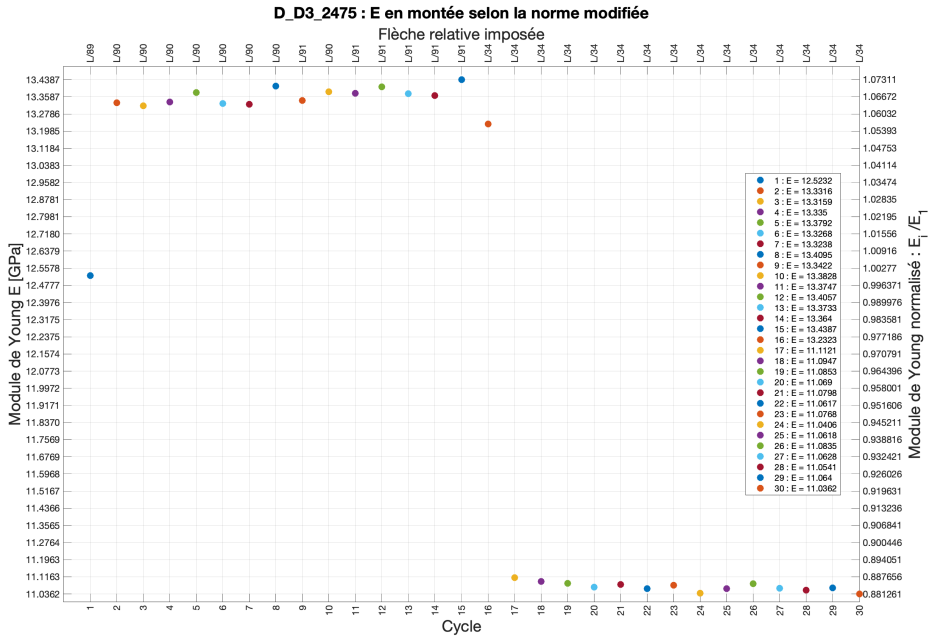


FIGURE M.302 – Module de Young en montée de l'éprouvette D_D3_2475 de la batterie 4

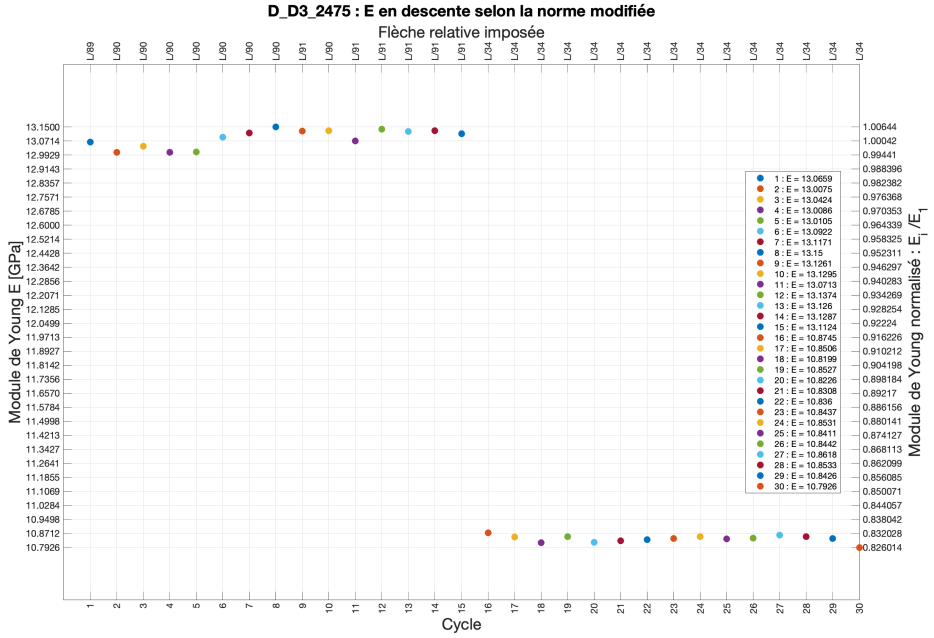


FIGURE M.303 – Module de Young en descente de l'éprouvette D_D3_2475 de la batterie 4

Rigidité flexionnelle

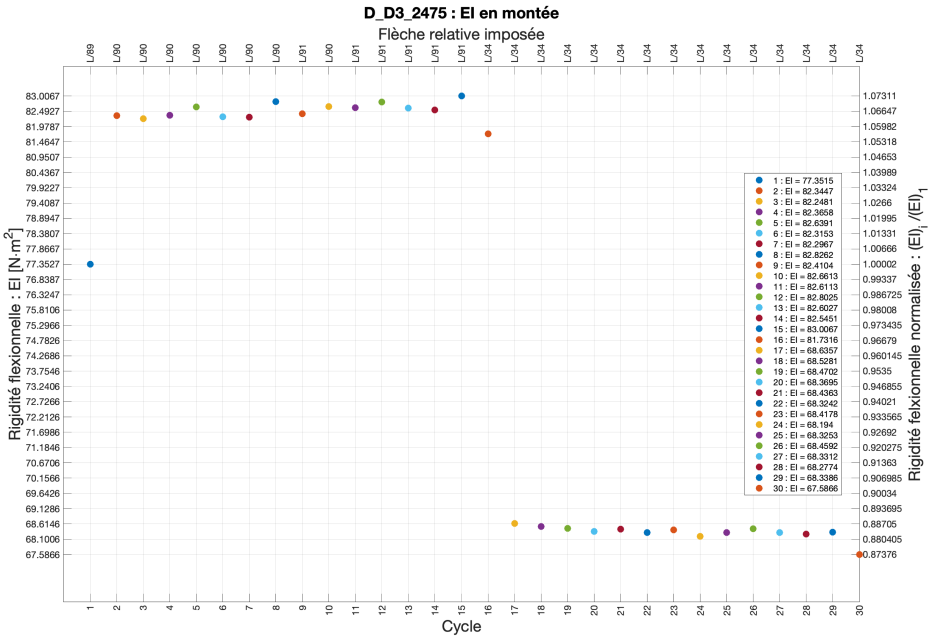


Figure M.304 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette D_D3_2475 de la batterie 4

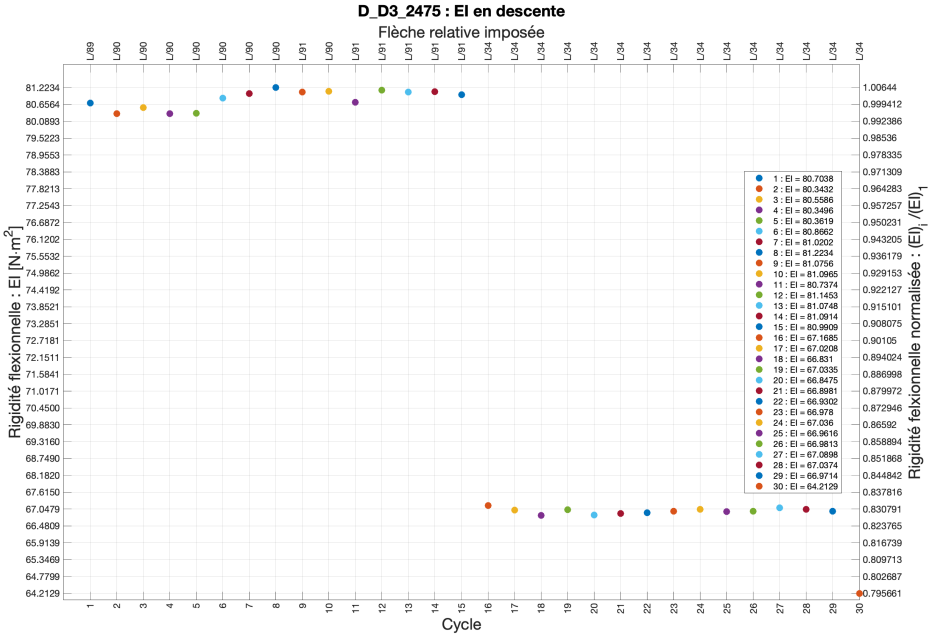


Figure M.305 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette D_D3_2475 de la batterie 4

Fonction S

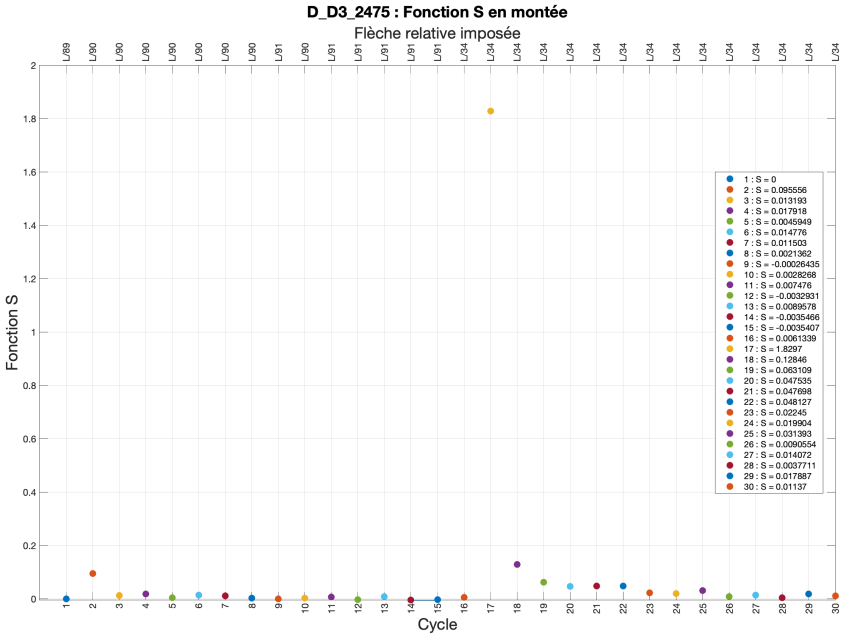


FIGURE M.306 – Fonction S en montée de l'éprouvette D_D3_2475 de la batterie 4

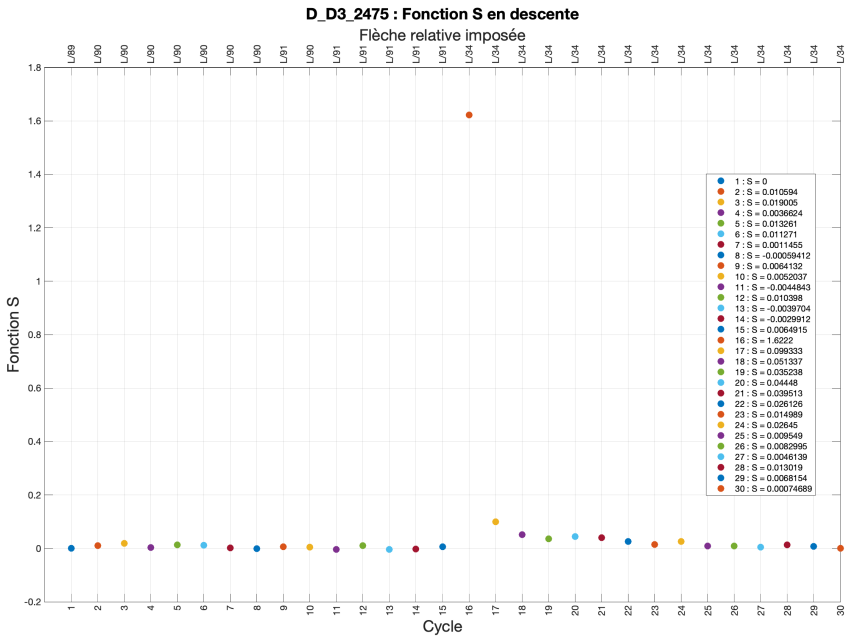


FIGURE M.307 – Fonction S en descente de l'éprouvette D_D3_2475 de la batterie 4

Chargement statique *a posteriori*

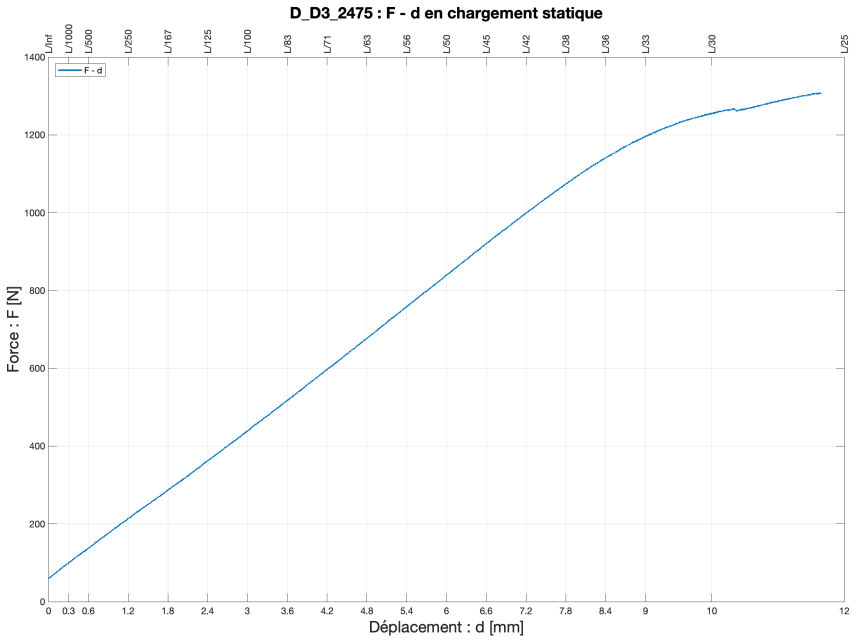


Figure M.308 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette D_D3_2475 de la batterie 4

Éprouvette D_D4_0495

Global

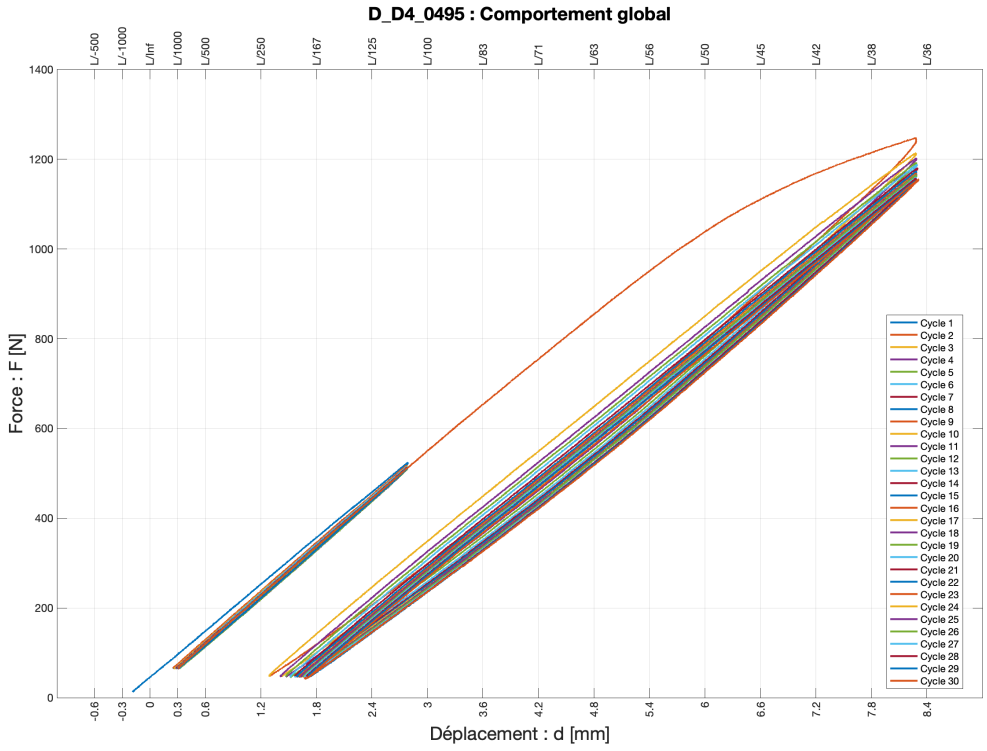


FIGURE M.309 – Comportement global de l'éprouvette D_D4_0495 de la batterie 4

Déplacement résiduel

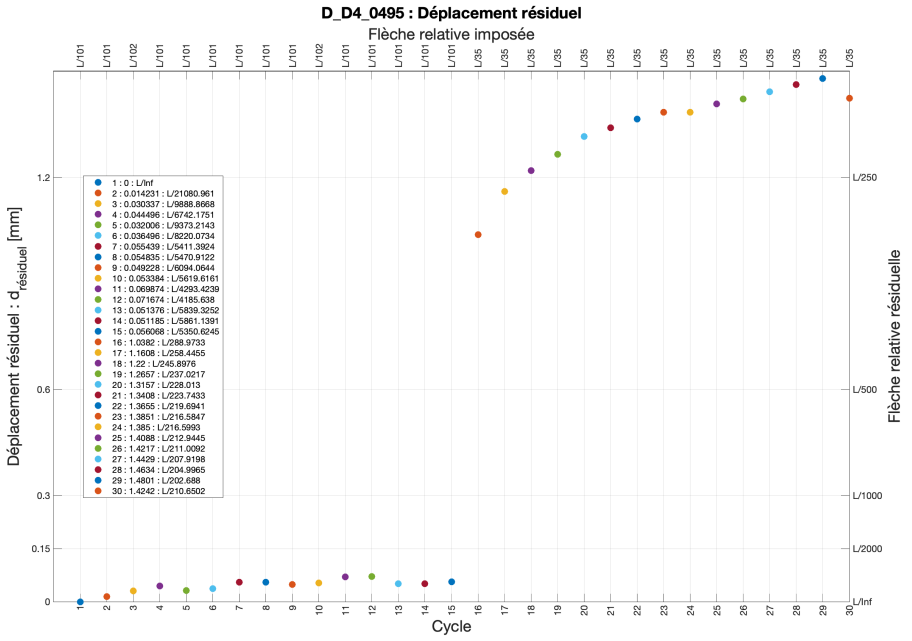


Figure M.310 – Déplacement résiduel de l'éprouvette D_D4_0495 de la batterie 4

Force maximale

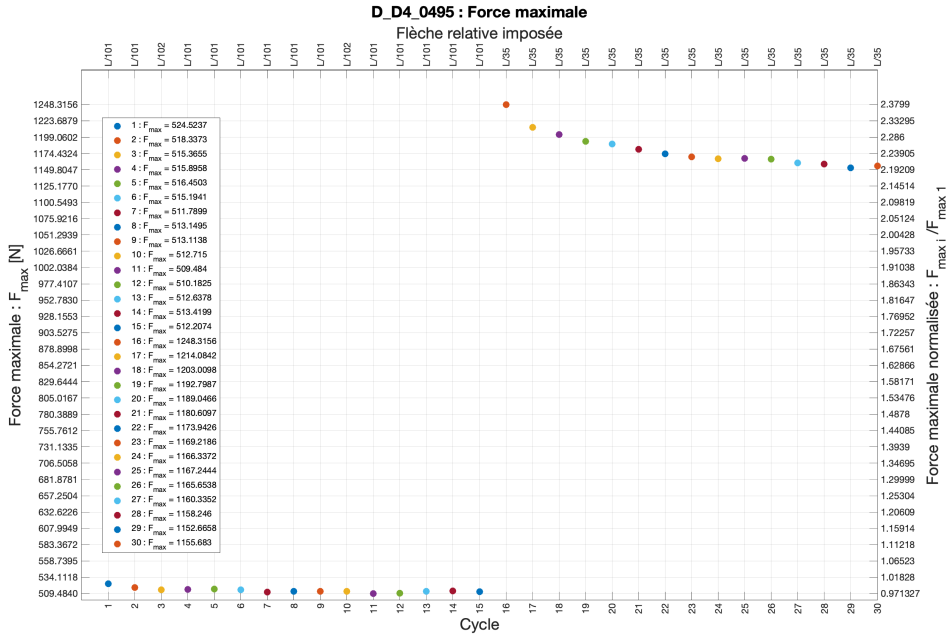


Figure M.311 – Force maximale de l'éprouvette D_D4_0495 de la batterie 4

Module de Young

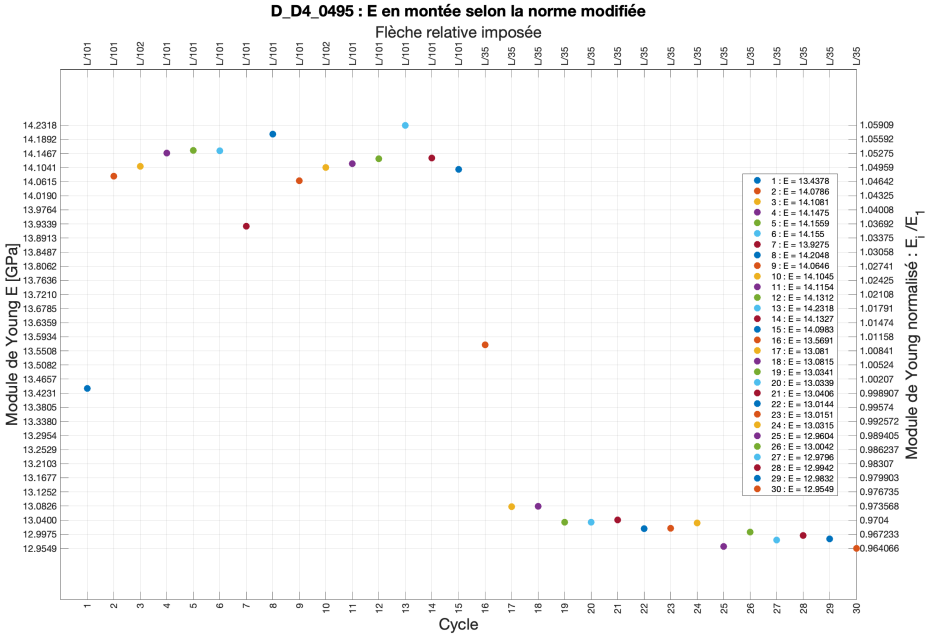


FIGURE M.312 – Module de Young en montée de l'éprouvette D_D4_0495 de la batterie 4

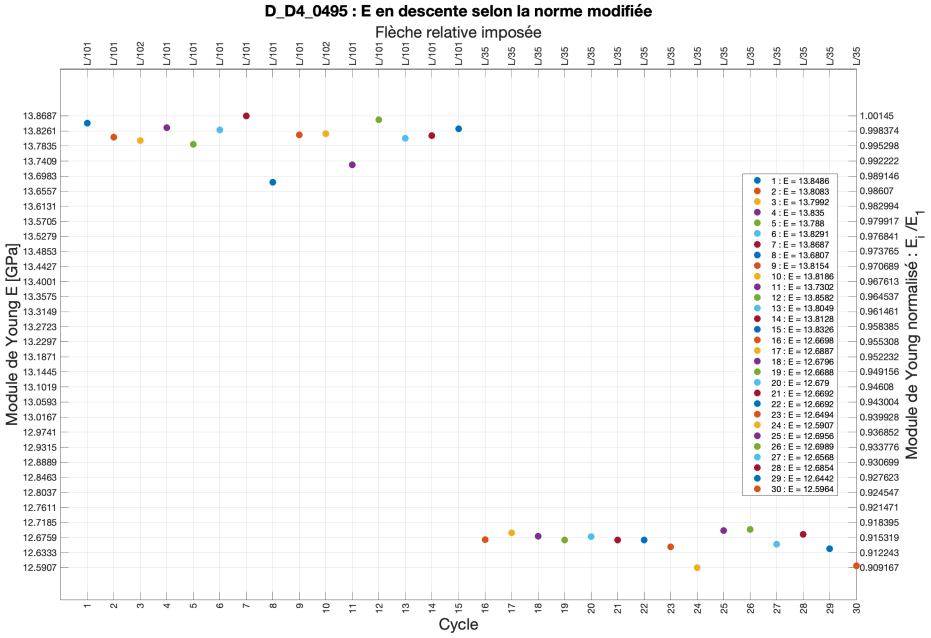


FIGURE M.313 – Module de Young en descente de l'éprouvette D_D4_0495 de la batterie 4

Rigidité flexionnelle

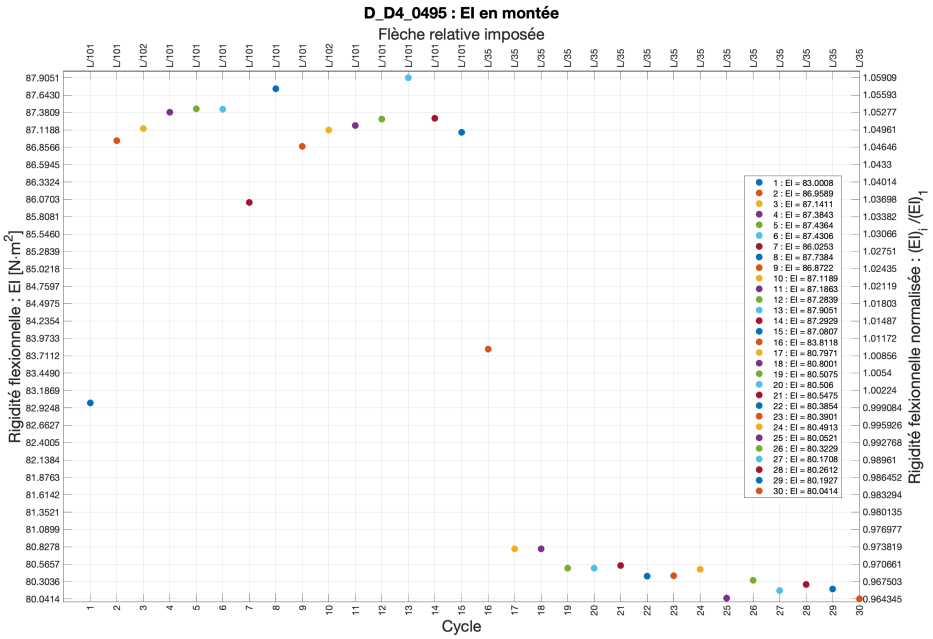


Figure M.314 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette D_D4_0495 de la batterie 4

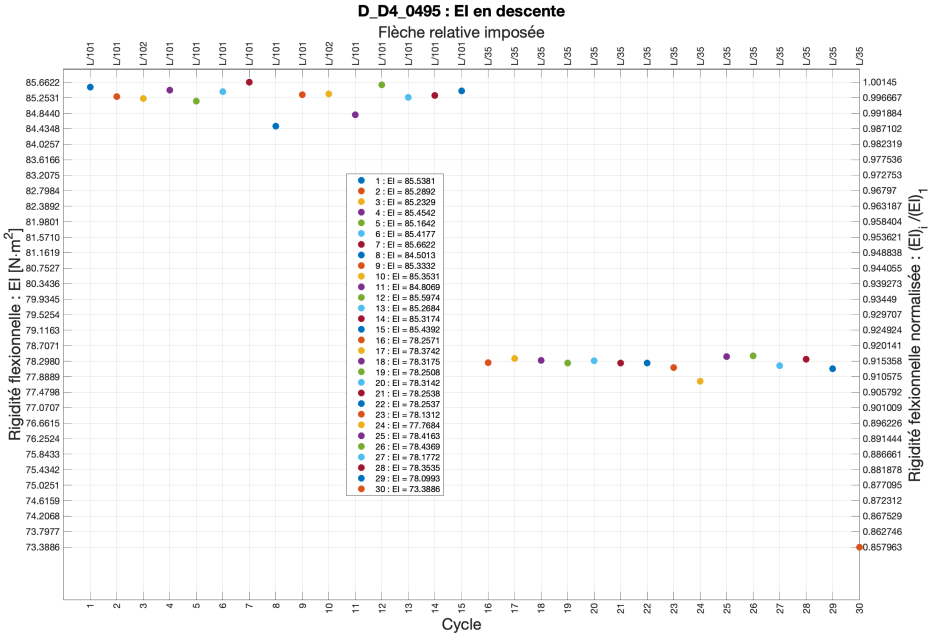


Figure M.315 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette D_D4_0495 de la batterie 4

Fonction S

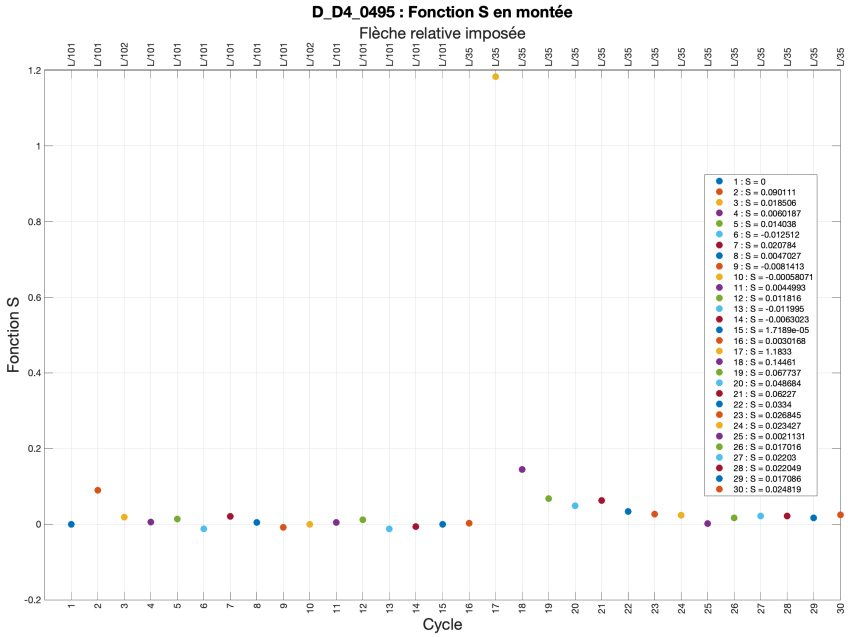


FIGURE M.316 – Fonction S en montée de l'éprouvette D_D4_0495 de la batterie 4

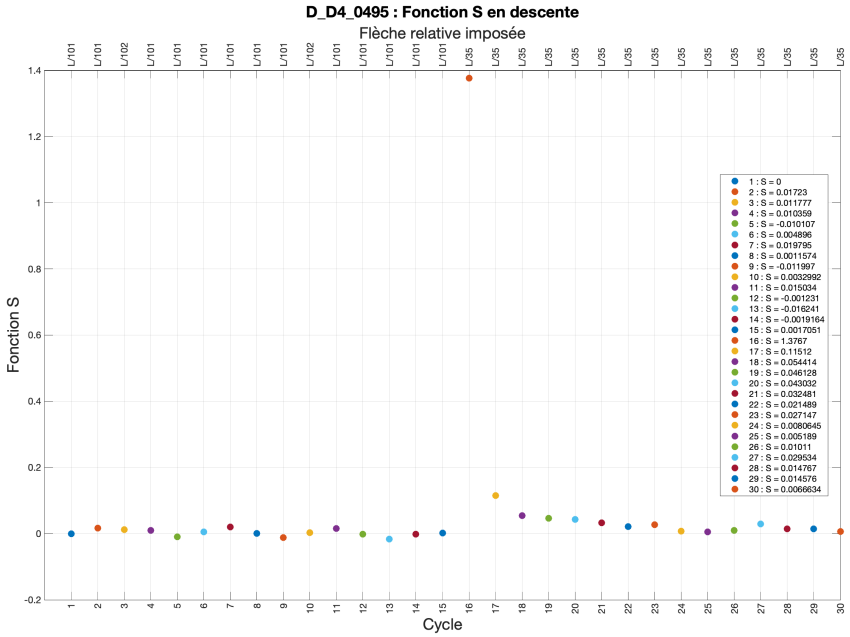


FIGURE M.317 – Fonction S en descente de l'éprouvette D_D4_0495 de la batterie 4

Chargement statique *a posteriori*

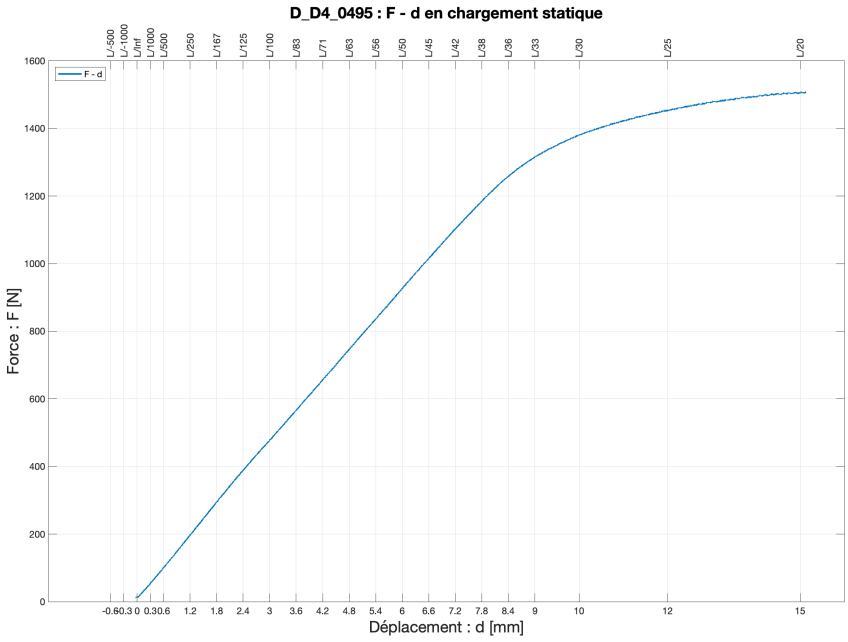


Figure M.318 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette D_D4_0495 de la batterie 4

Éprouvette D_D4_2475

Global

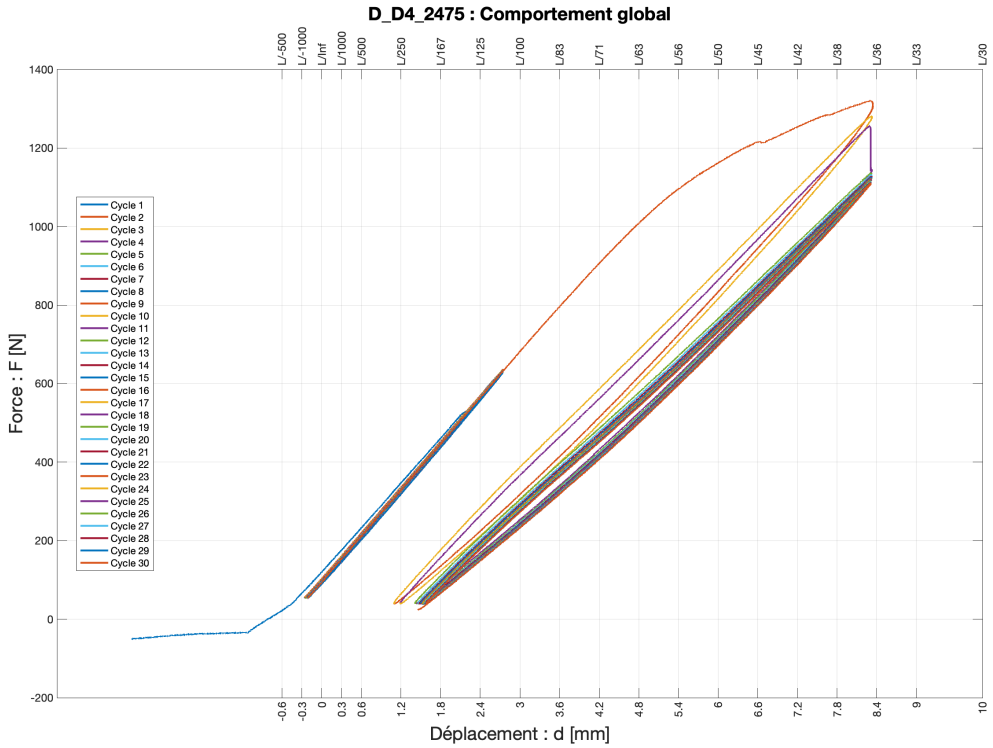


FIGURE M.319 – Comportement global de l'éprouvette D_D4_2475 de la batterie 4

Déplacement résiduel

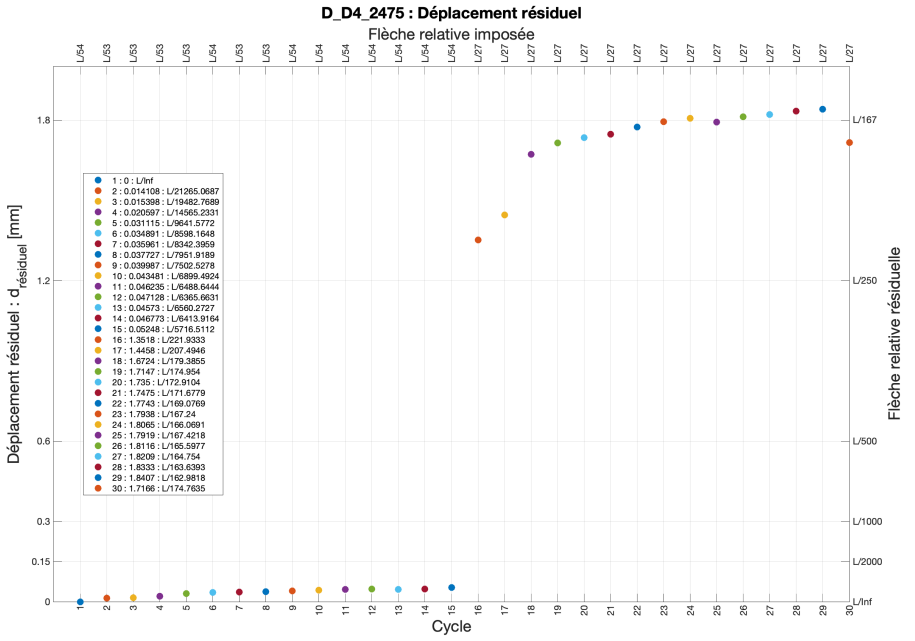


Figure M.320 – Déplacement résiduel de l'éprouvette D_D4_2475 de la batterie 4

Force maximale

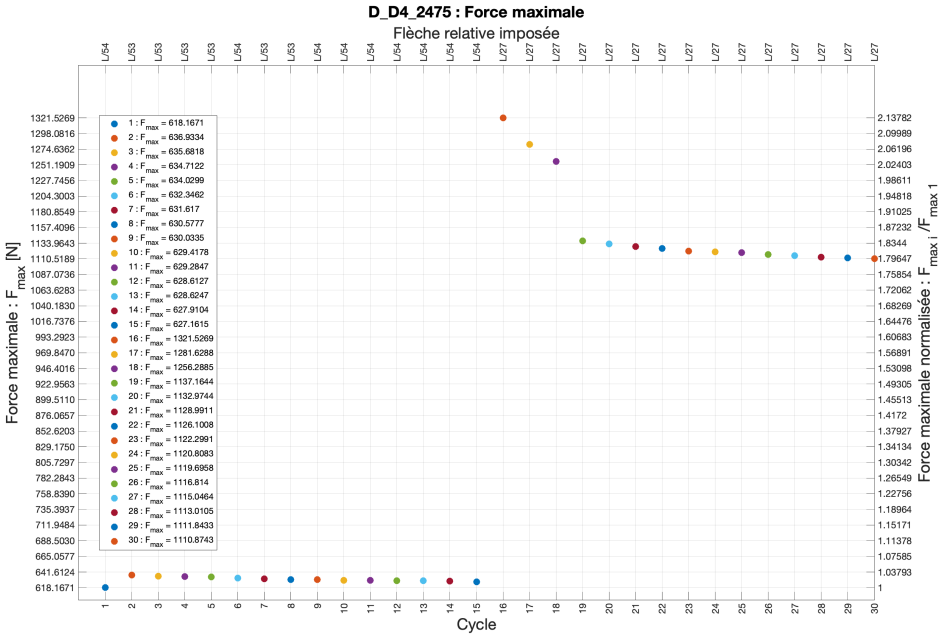


Figure M.321 – Force maximale de l'éprouvette D_D4_2475 de la batterie 4

Module de Young

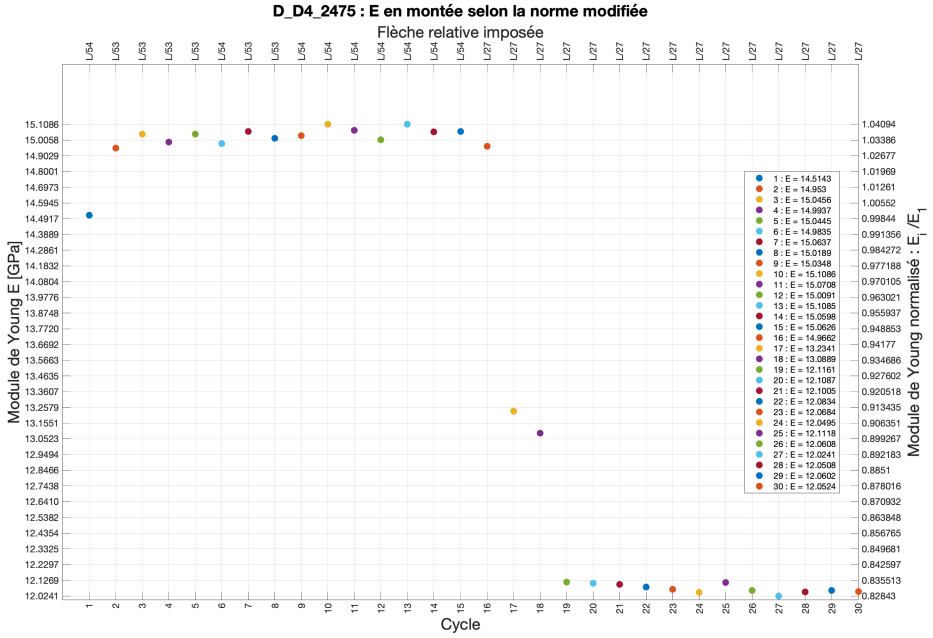


FIGURE M.322 – Module de Young en montée de l'éprouvette D_D4_2475 de la batterie 4

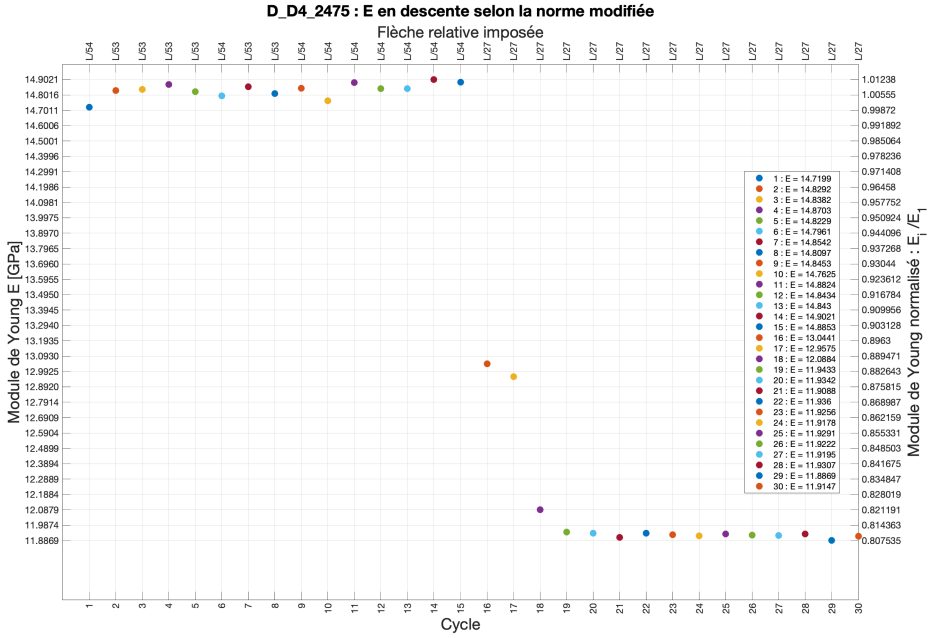


FIGURE M.323 – Module de Young en descente de l'éprouvette D_D4_2475 de la batterie 4

Rigidité flexionnelle

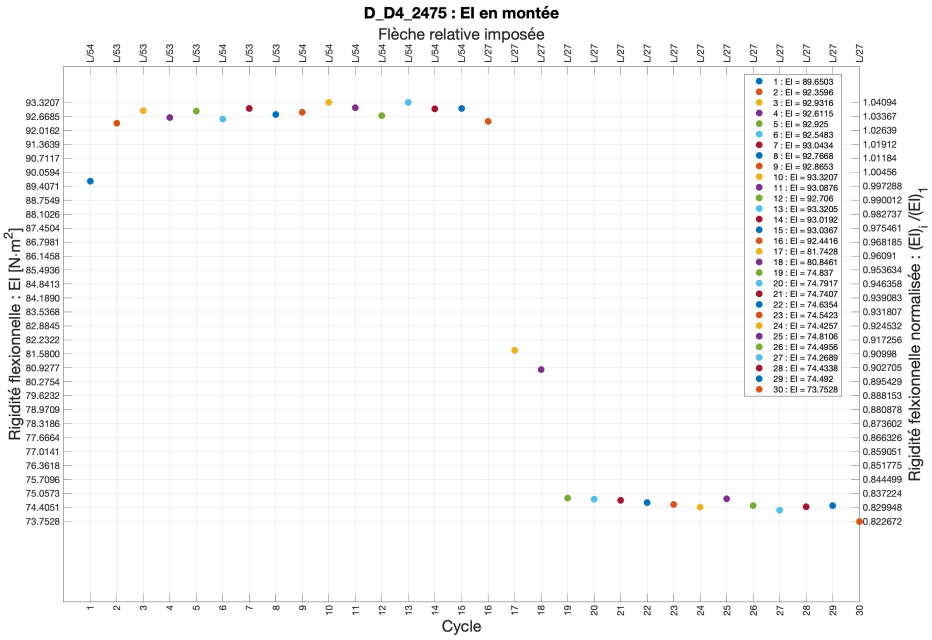


Figure M.324 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette D_D4_2475 de la batterie 4

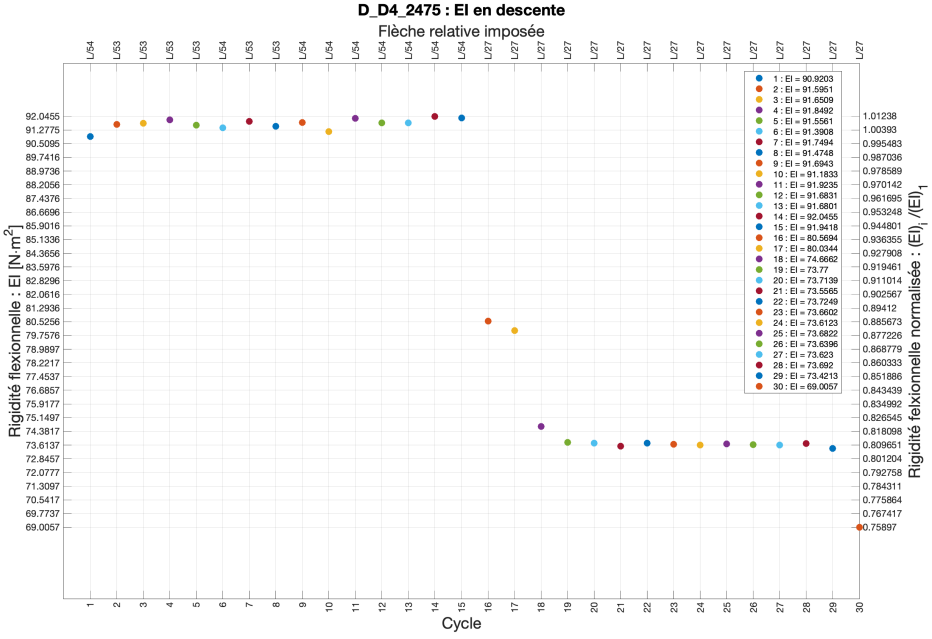


Figure M.325 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette D_D4_2475 de la batterie 4

Fonction S

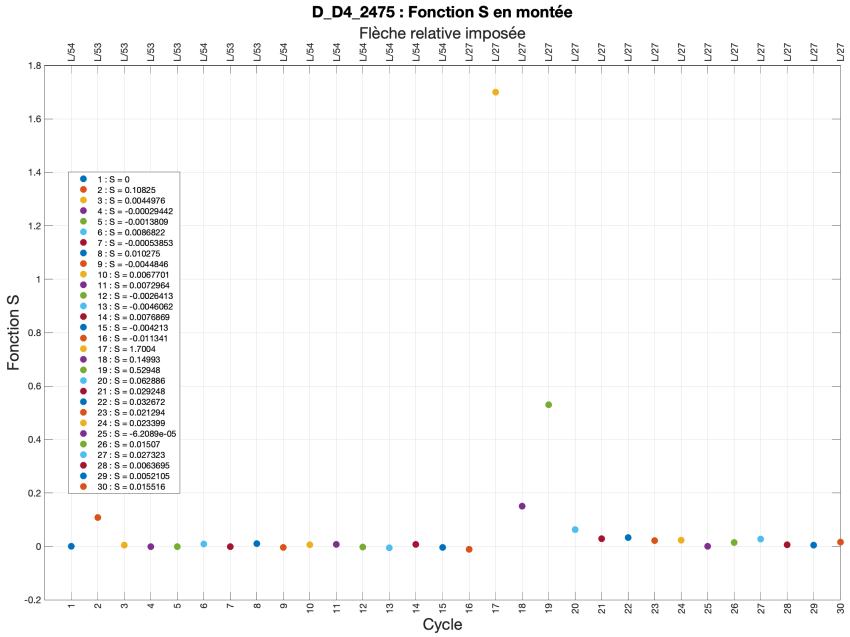


FIGURE M.326 – Fonction S en montée de l'éprouvette D_D4_2475 de la batterie 4

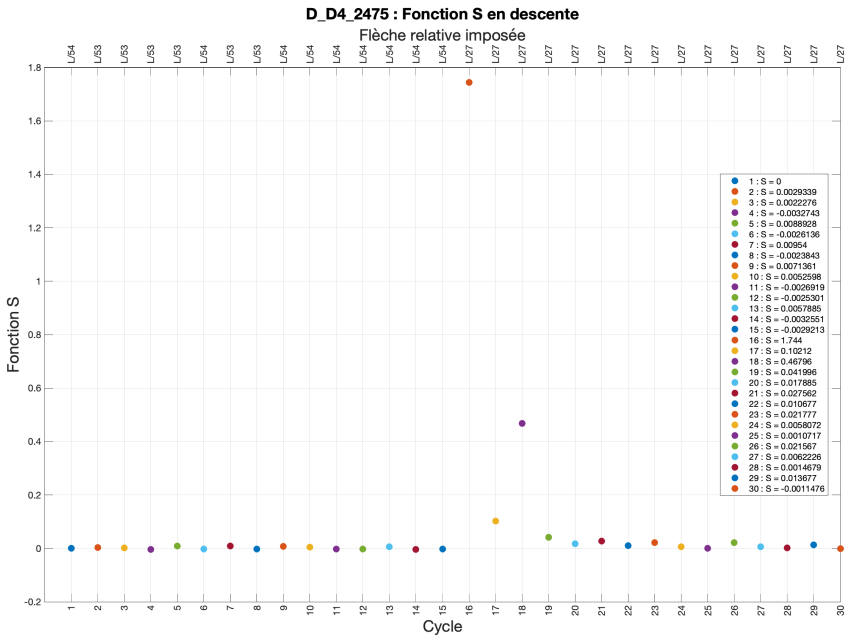


FIGURE M.327 – Fonction S en descente de l'éprouvette D_D4_2475 de la batterie 4

Chargement statique *a posteriori*

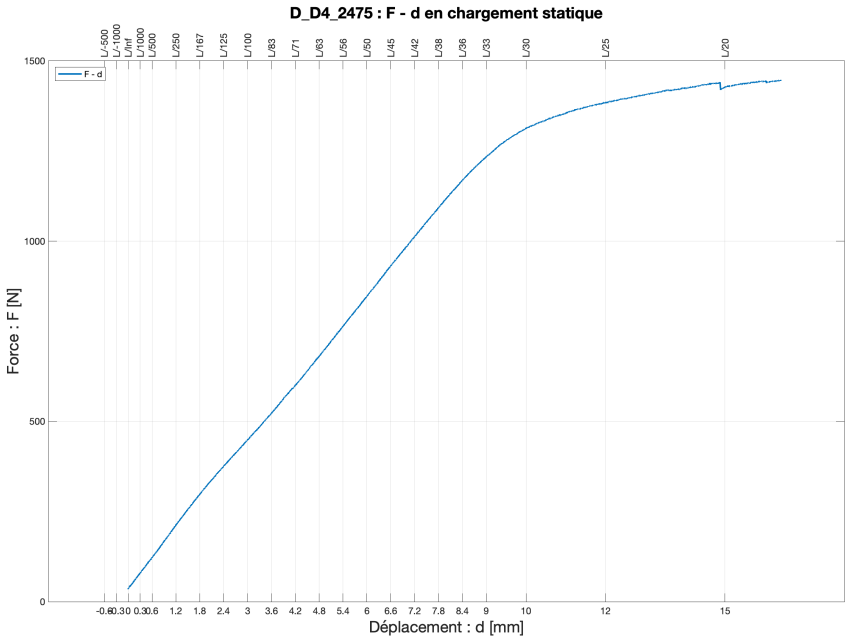


Figure M.328 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette D_D4_2475 de la batterie 4

Éprouvette D_E1_0495

Global

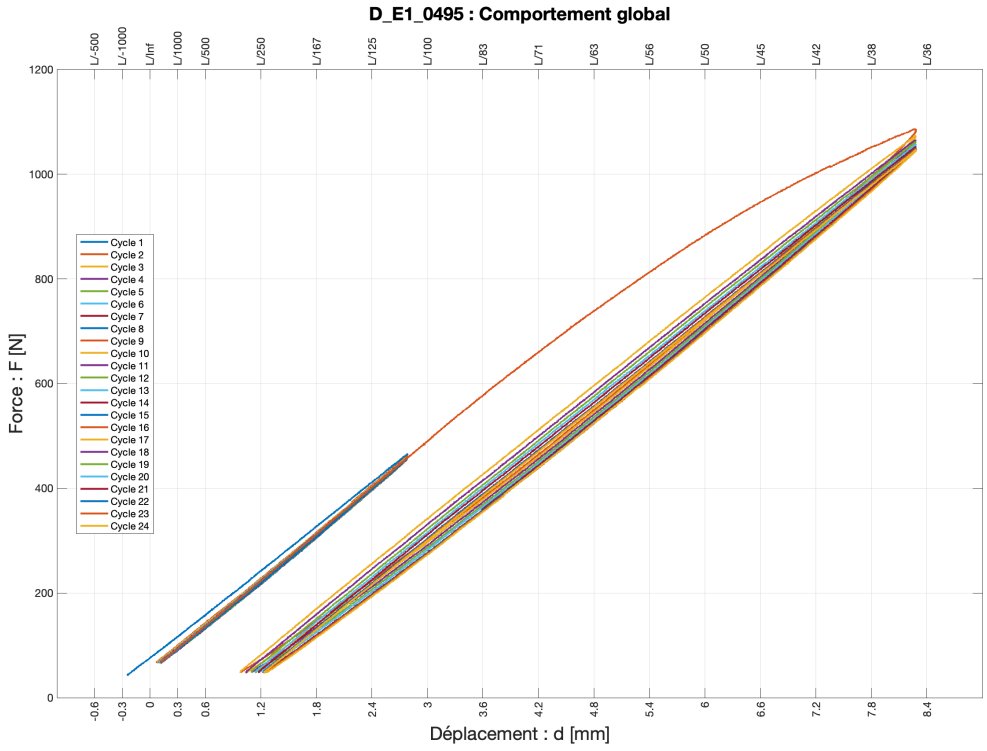


FIGURE M.329 – Comportement global de l'éprouvette D_E1_0495 de la batterie 4

Déplacement résiduel

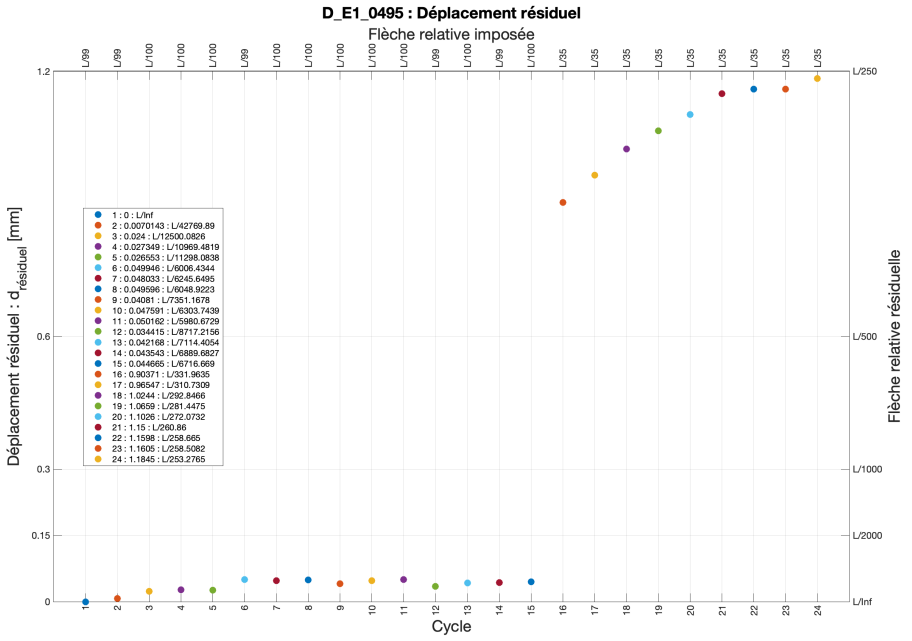


Figure M.330 – Déplacement résiduel de l'éprouvette D_E1_0495 de la batterie 4

Force maximale

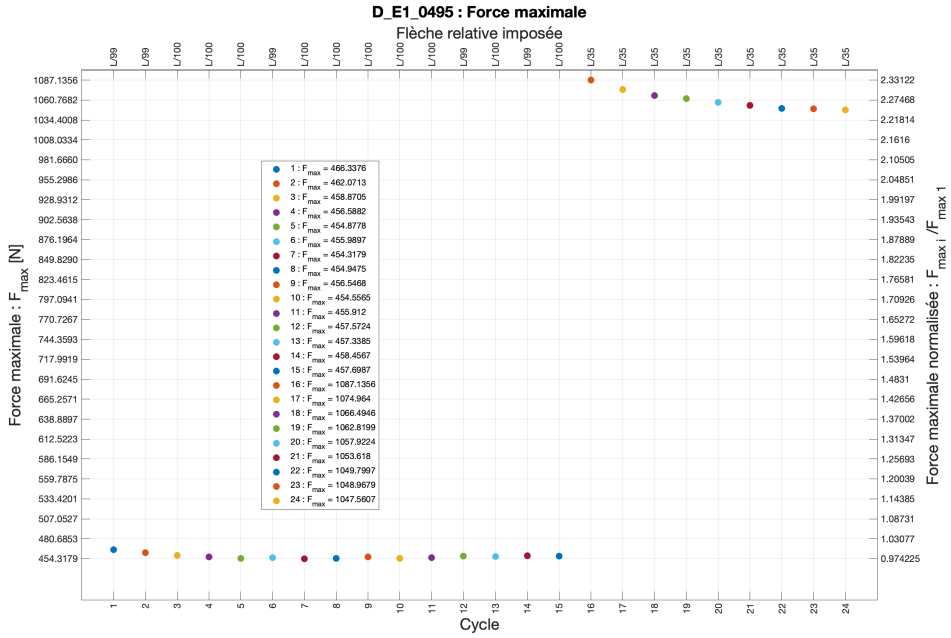


Figure M.331 – Force maximale de l'éprouvette D_E1_0495 de la batterie 4

Module de Young

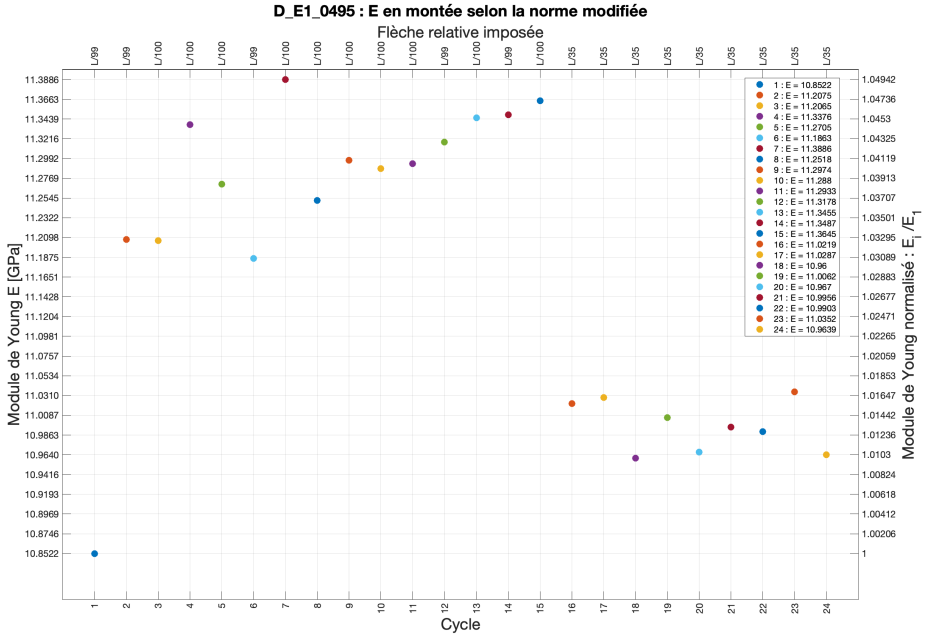


FIGURE M.332 – Module de Young en montée de l'éprouvette D_E1_0495 de la batterie 4

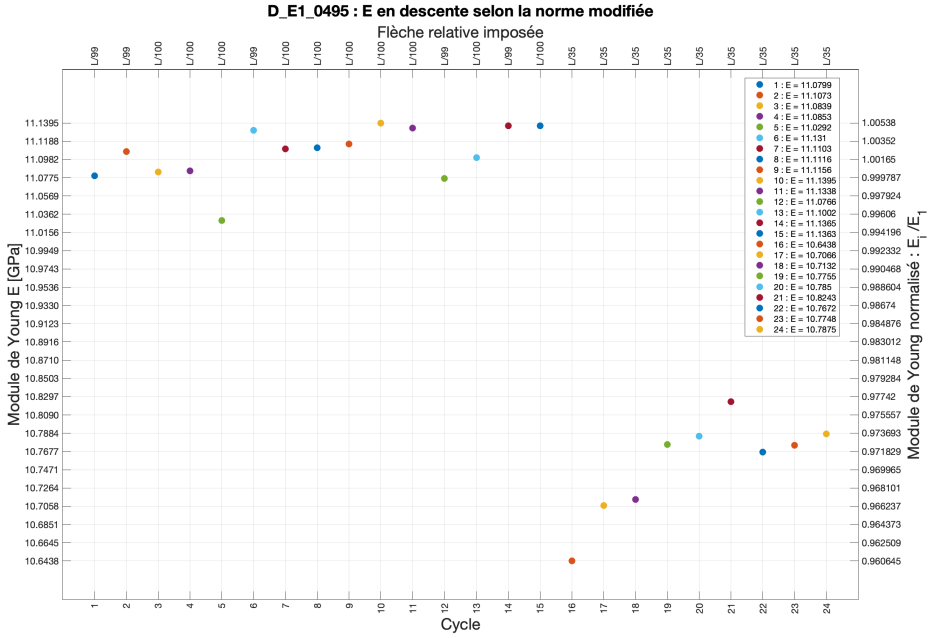


FIGURE M.333 – Module de Young en descente de l'éprouvette D_E1_0495 de la batterie 4

Rigidité flexionnelle

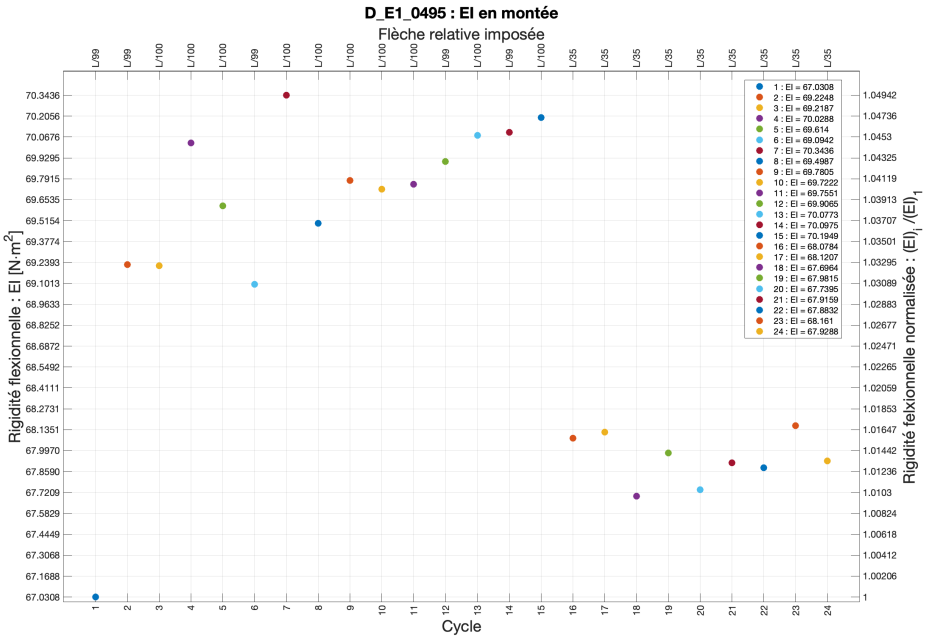


Figure M.334 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette D_E1_0495 de la batterie 4

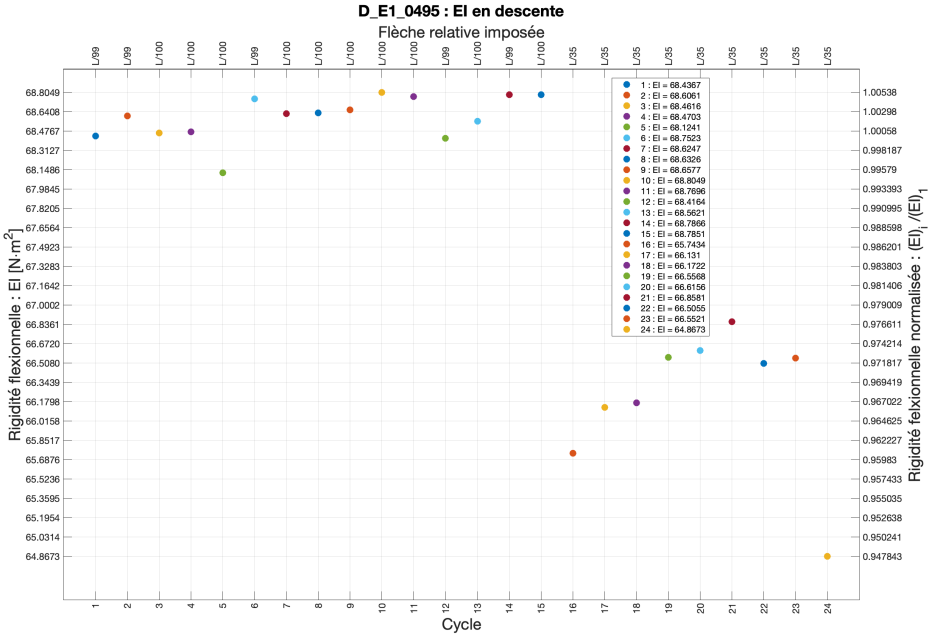


Figure M.335 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette D_E1_0495 de la batterie 4

Fonction S

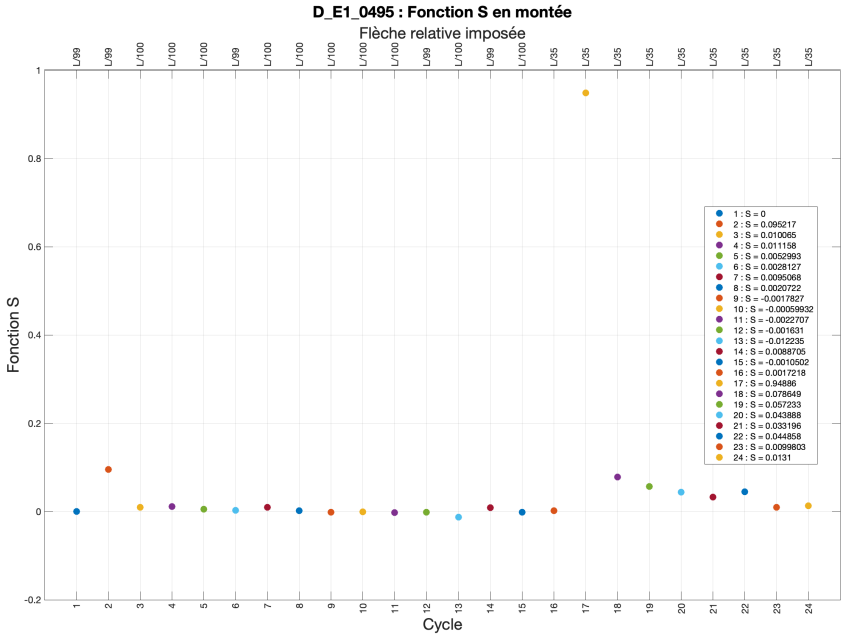


FIGURE M.336 – Fonction S en montée de l'éprouvette D_E1_0495 de la batterie 4

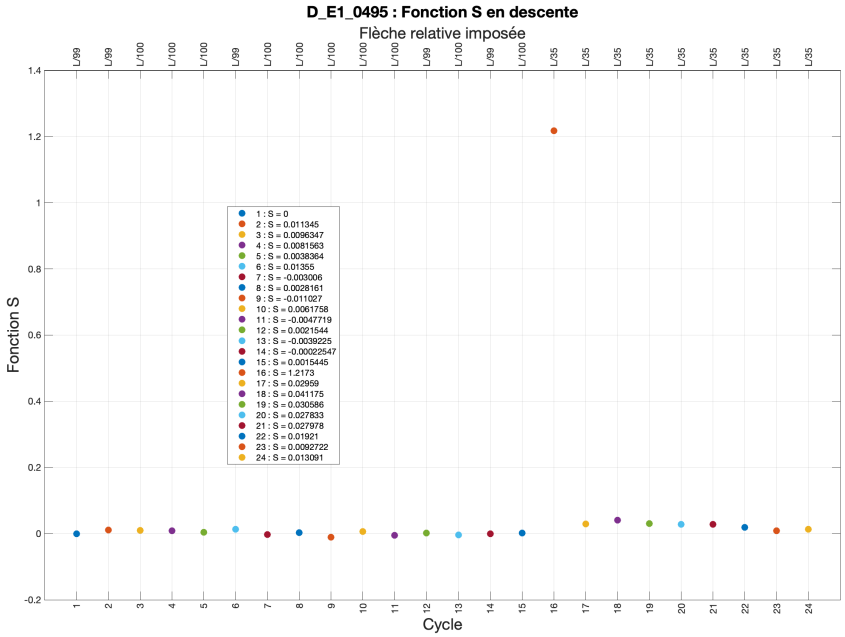


FIGURE M.337 – Fonction S en descente de l'éprouvette D_E1_0495 de la batterie 4

Chargement statique *a posteriori*

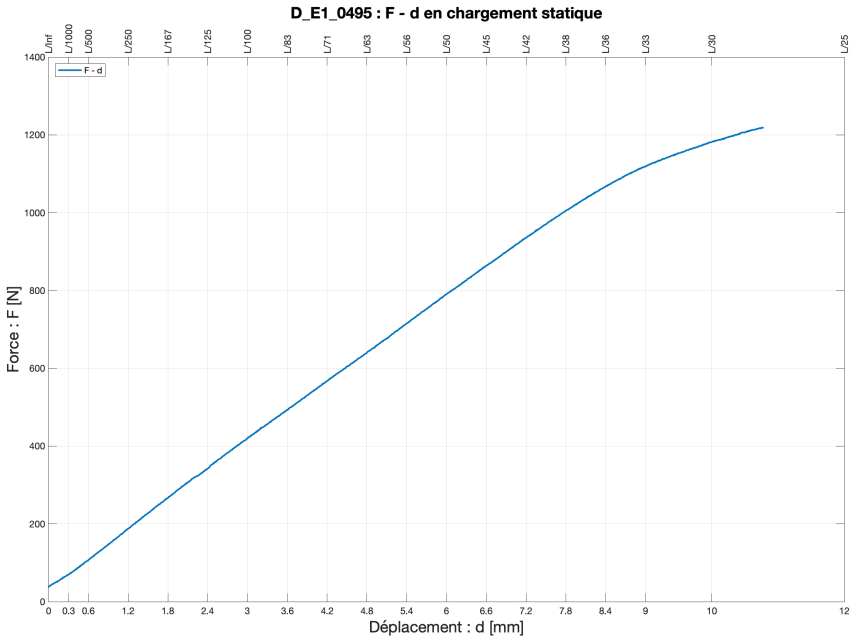


Figure M.338 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette D_E1_0495 de la batterie 4

Éprouvette D_E1_2475

Global

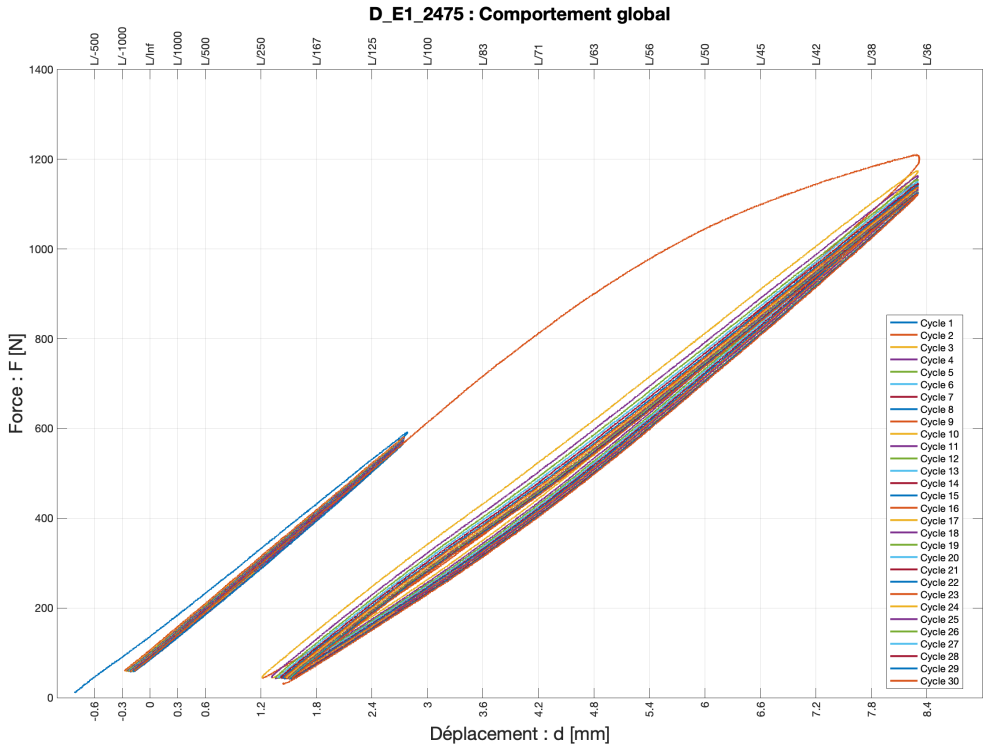


FIGURE M.339 – Comportement global de l'éprouvette D_E1_2475 de la batterie 4

Déplacement résiduel

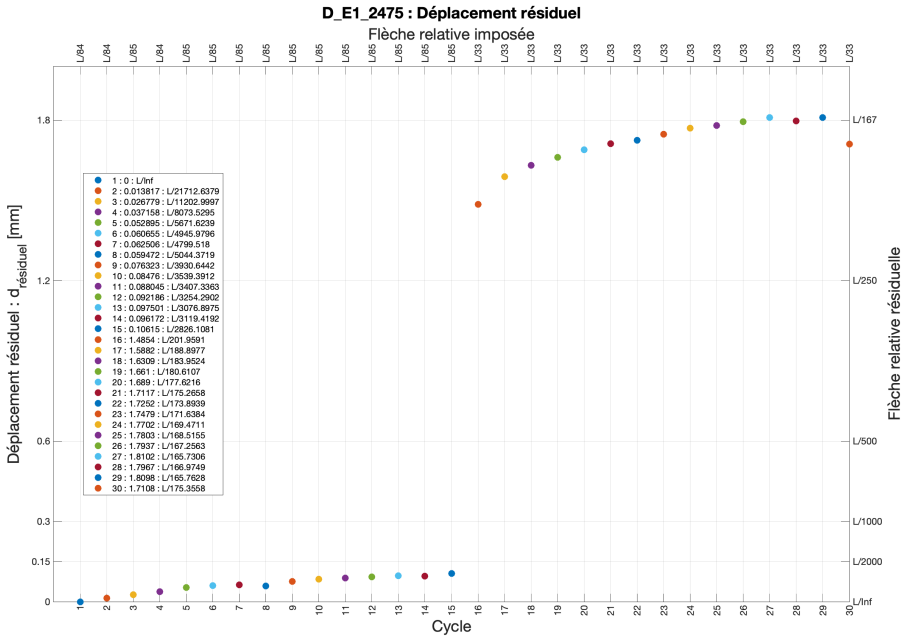


Figure M.340 – Déplacement résiduel de l'éprouvette D_E1_2475 de la batterie 4

Force maximale

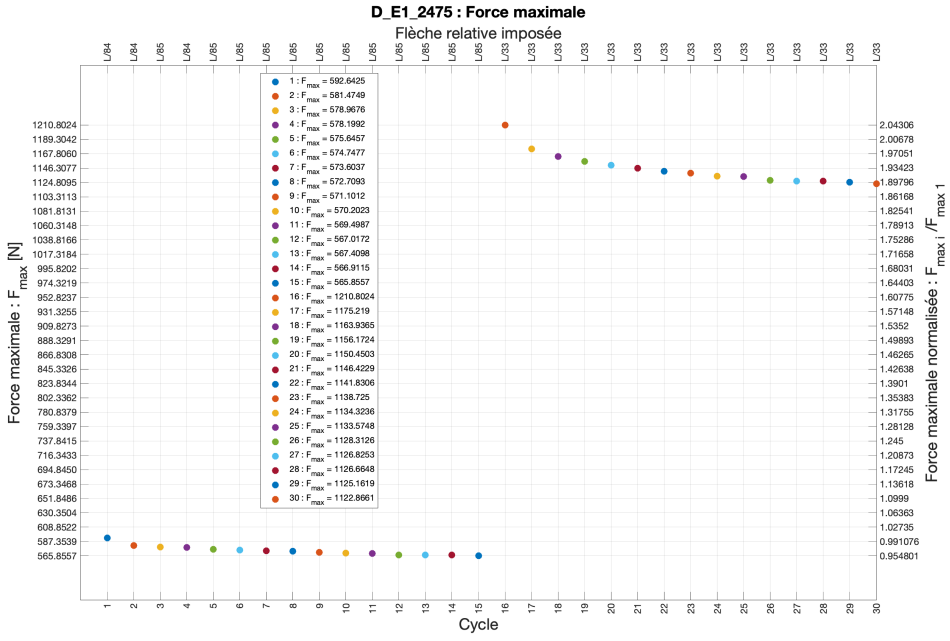


Figure M.341 – Force maximale de l'éprouvette D_E1_2475 de la batterie 4

Module de Young

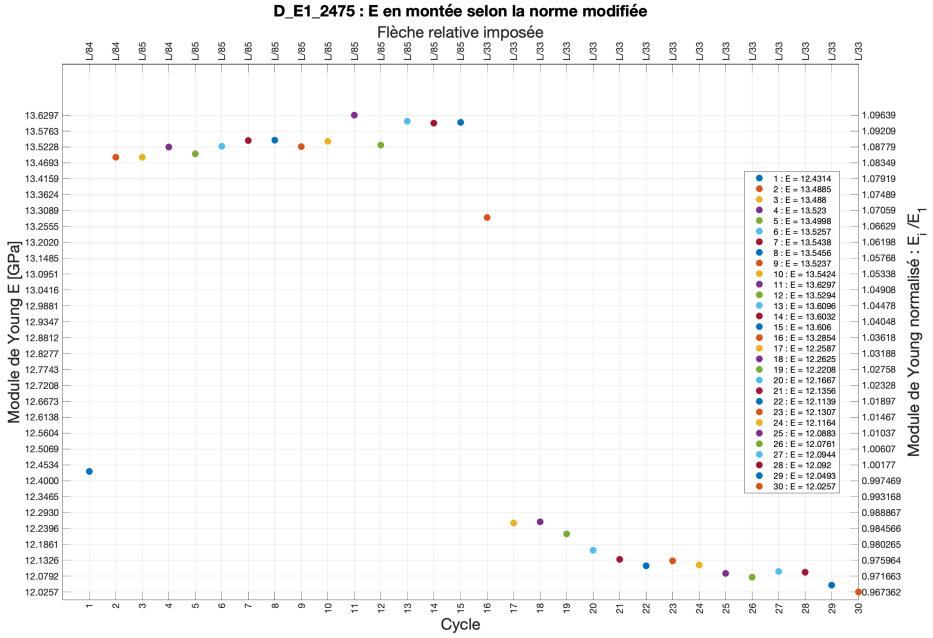


FIGURE M.342 – Module de Young en montée de l'éprouvette D_E1_2475 de la batterie 4

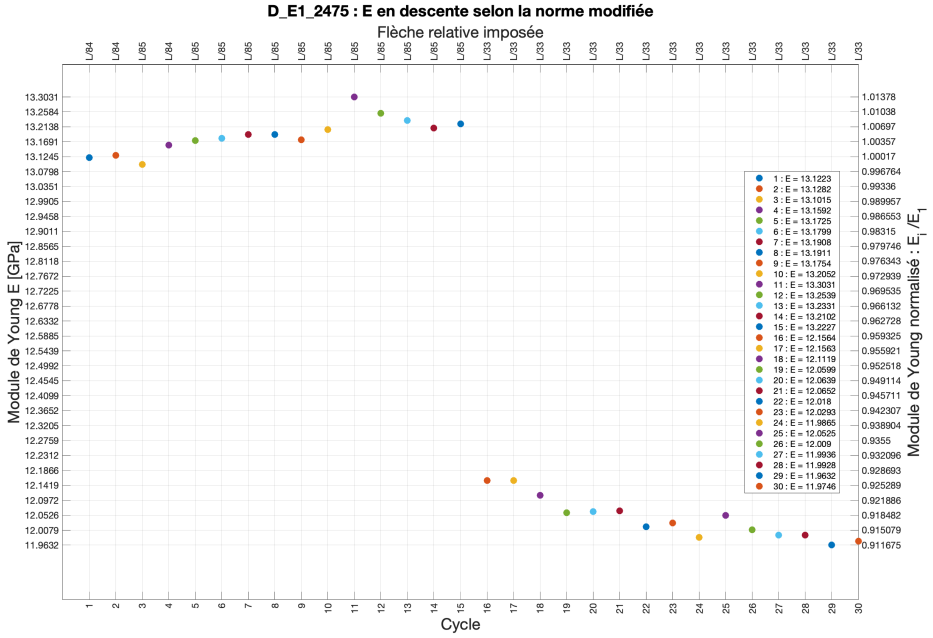


FIGURE M.343 – Module de Young en descente de l'éprouvette D_E1_2475 de la batterie 4

Rigidité flexionnelle

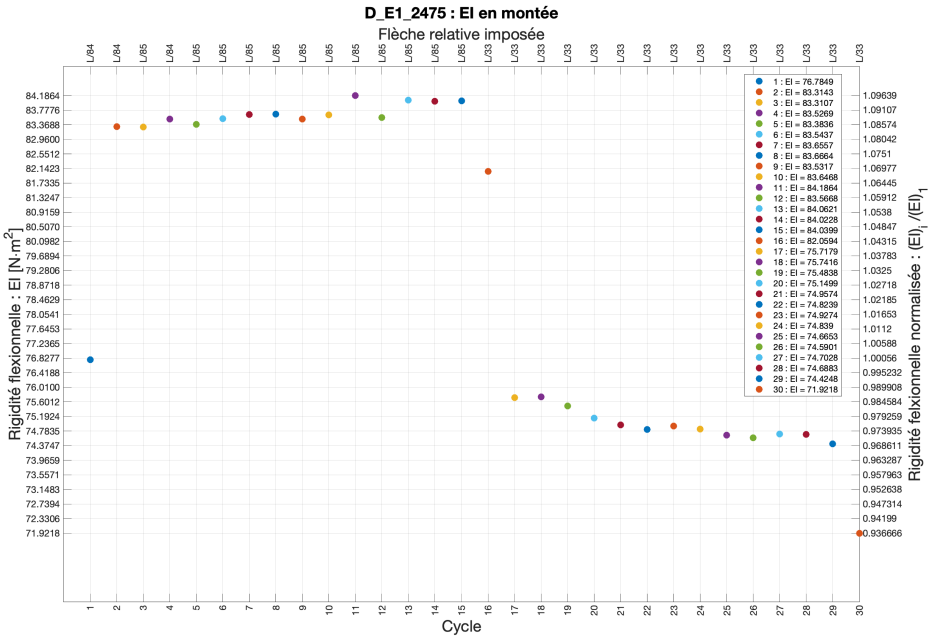


Figure M.344 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette D_E1_2475 de la batterie 4

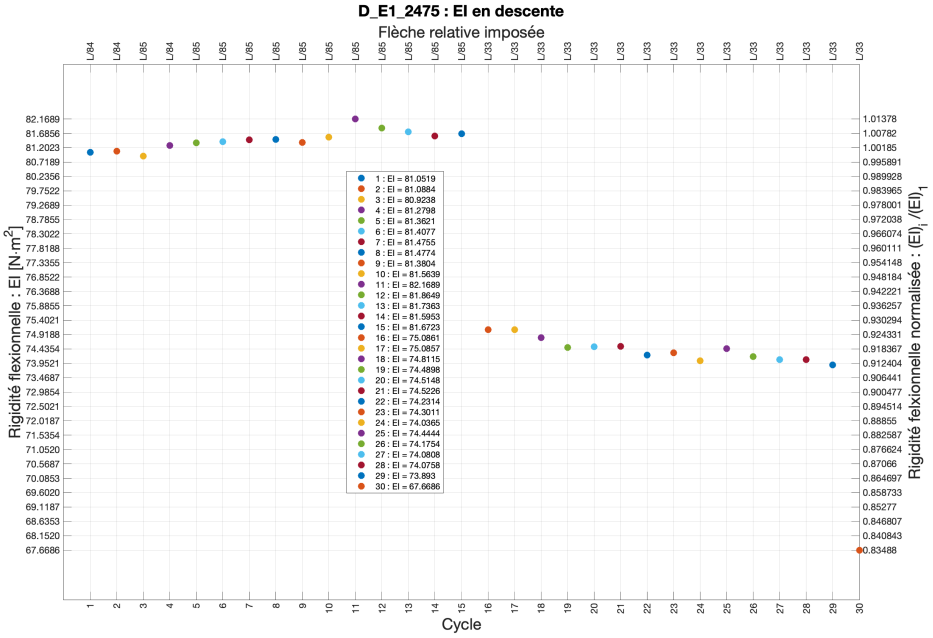


Figure M.345 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette D_E1_2475 de la batterie 4

Fonction S

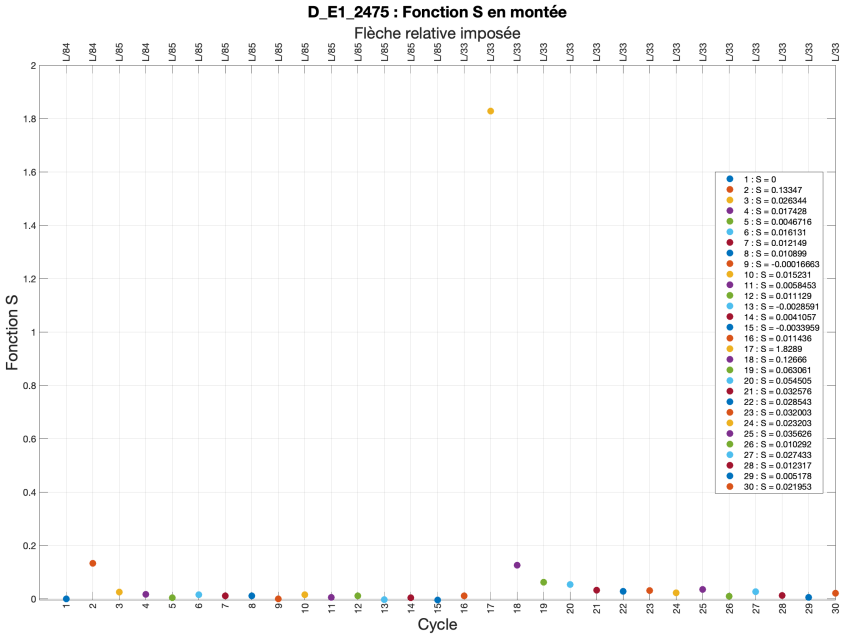


FIGURE M.346 – Fonction S en montée de l'éprouvette D_E1_2475 de la batterie 4

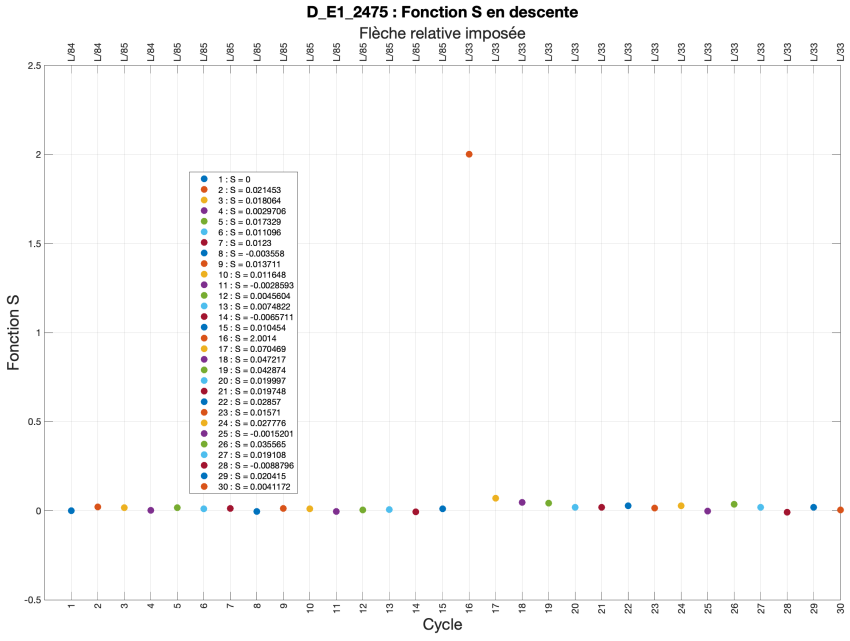


FIGURE M.347 – Fonction S en descente de l'éprouvette D_E1_2475 de la batterie 4

Chargement statique *a posteriori*

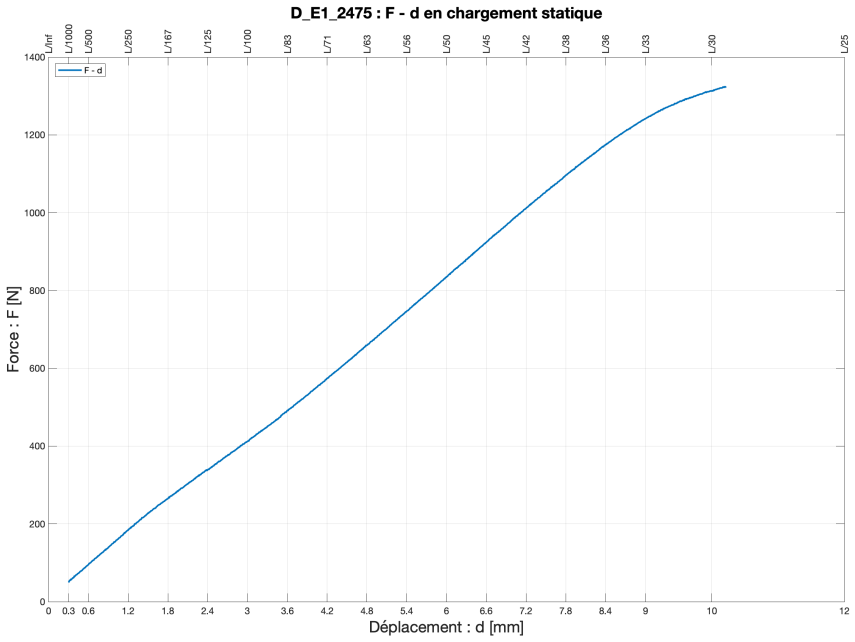


Figure M.348 – Chargement statique *a posteriori* de l'éprouvette D_E1_2475 de la batterie 4

M.5 Batterie 5 : Nombre de cycles

Éprouvette E_A4

Global

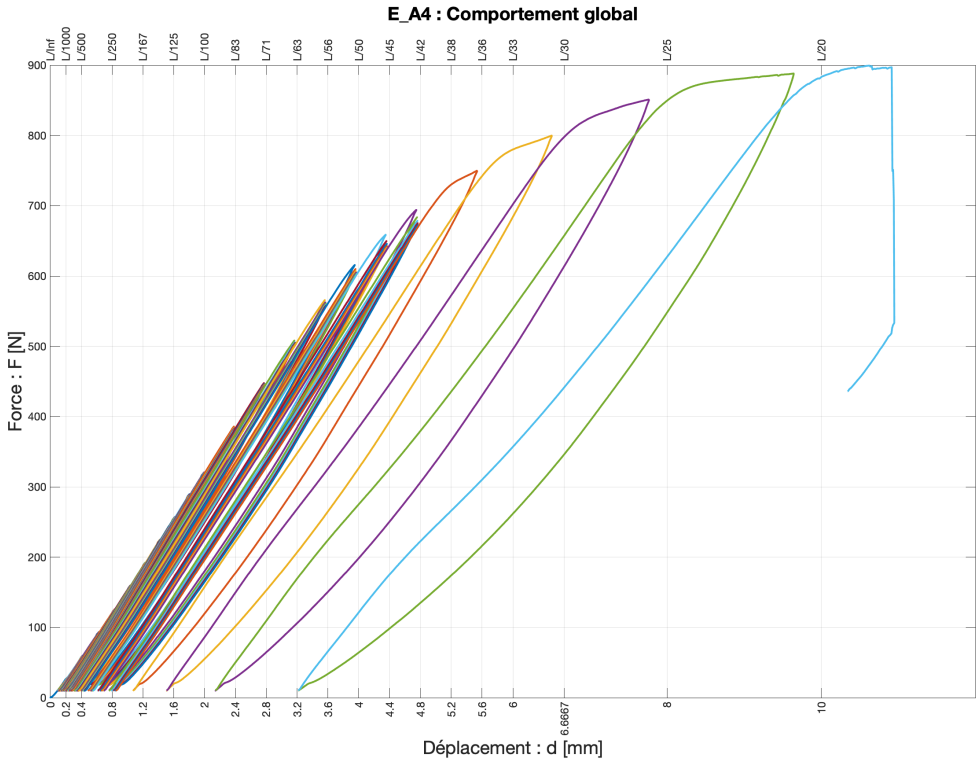


FIGURE M.349 – Comportement global de l'éprouvette E_A4 de la batterie 5

Déplacement résiduel

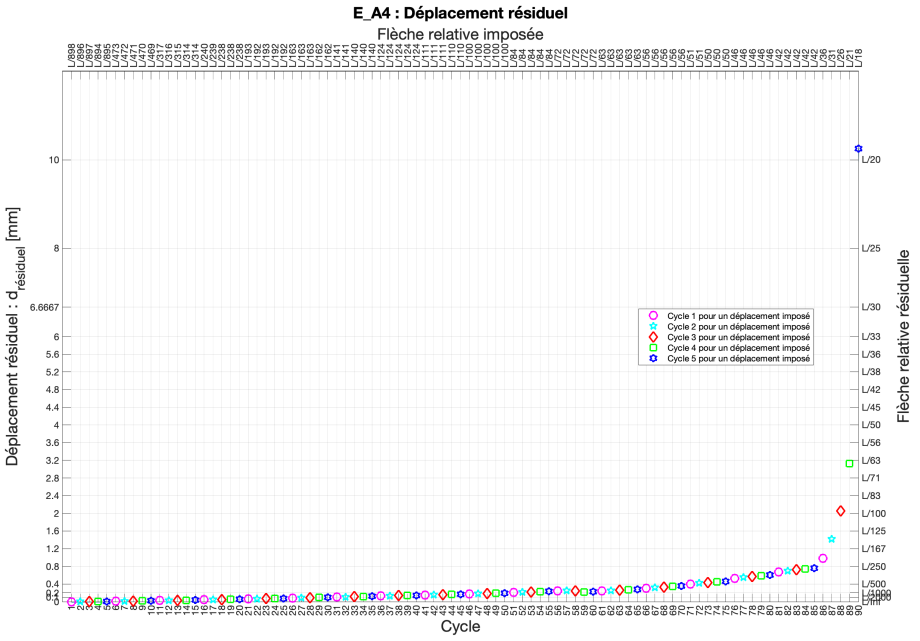


Figure M.350 – Déplacement résiduel de l'éprouvette E_A4 de la batterie 5

Force maximale

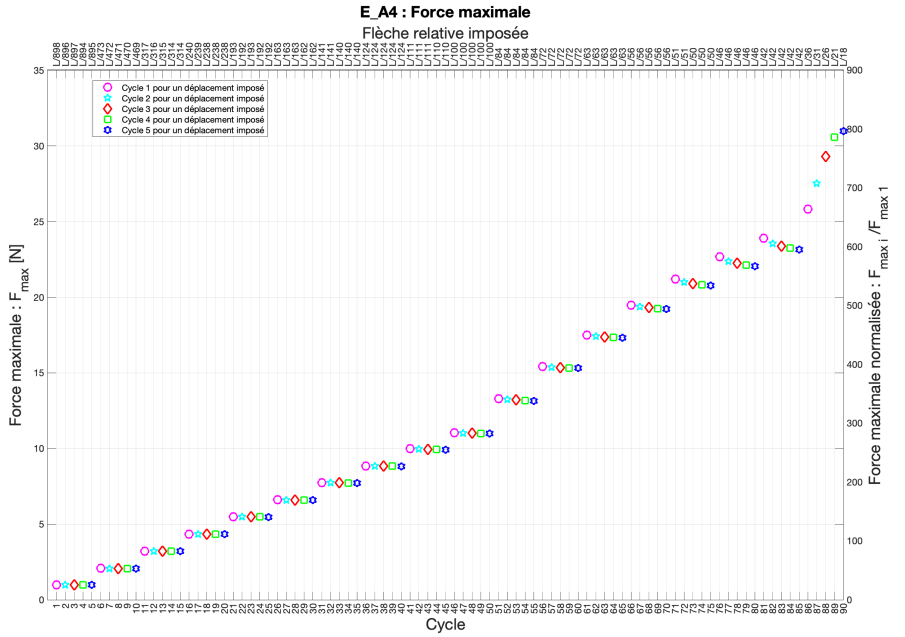


Figure M.351 – Force maximale de l'éprouvette E_A4 de la batterie 5

Module de Young

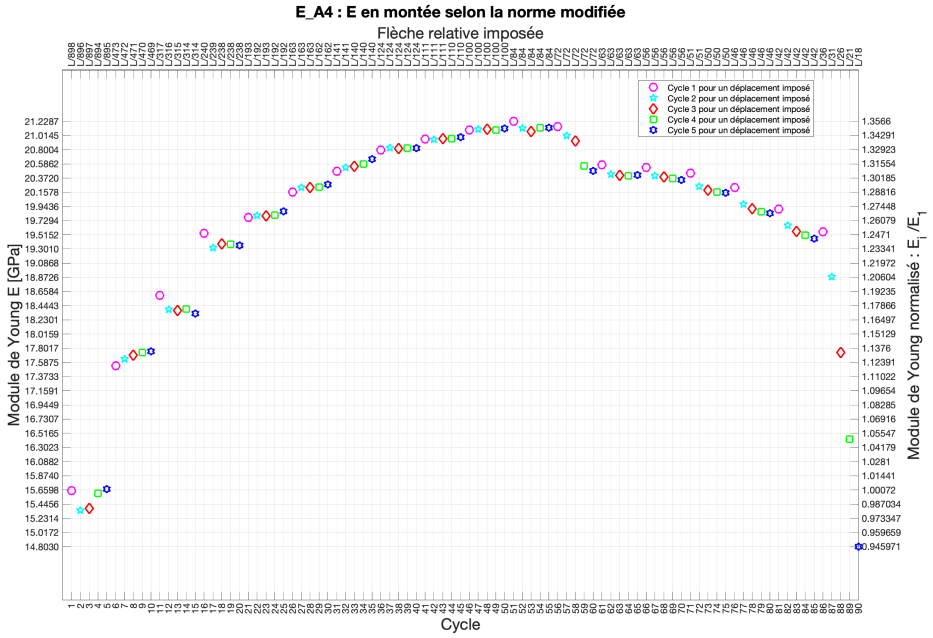


FIGURE M.352 – Module de Young en montée de l'éprouvette E_A4 de la batterie 5

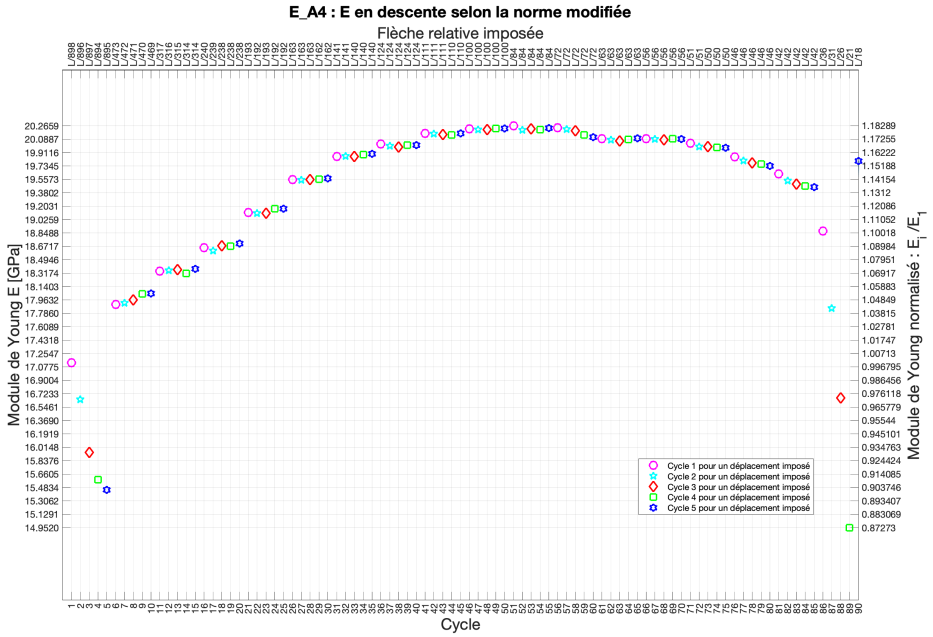


FIGURE M.353 – Module de Young en descente de l'éprouvette E_A4 de la batterie 5

Rigidité flexionnelle

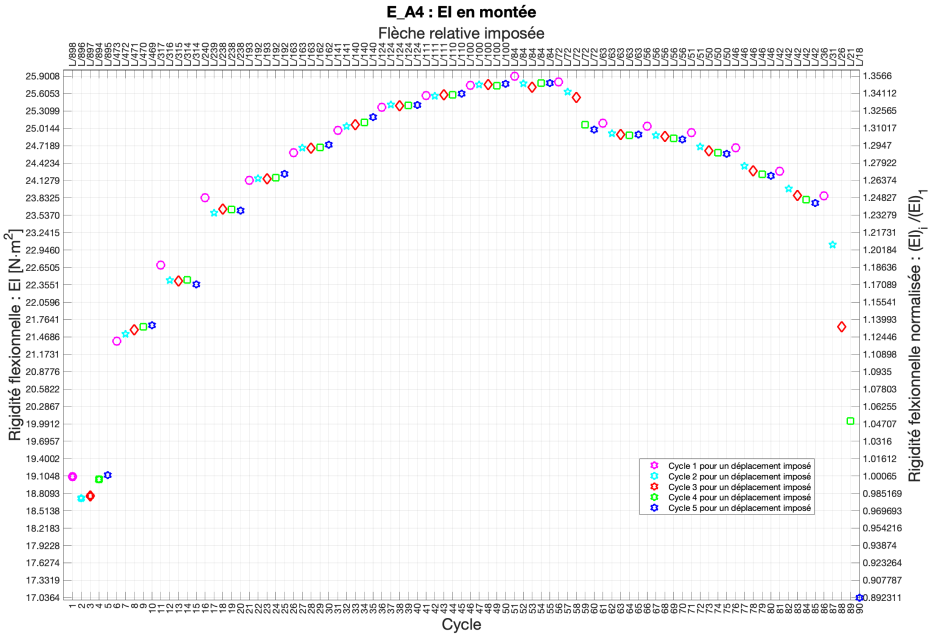


Figure M.354 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette E_A4 de la batterie 5

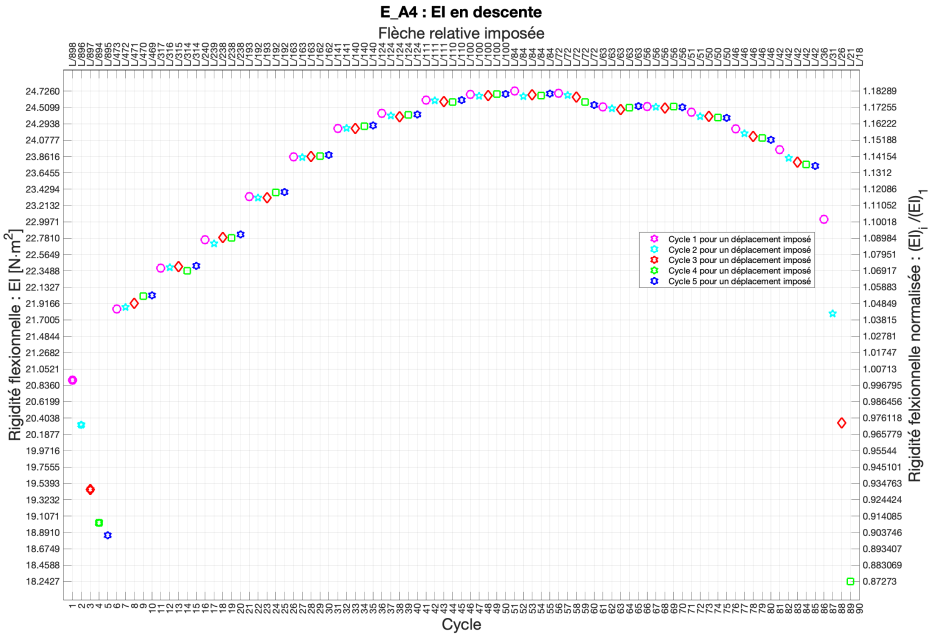


Figure M.355 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette E_A4 de la batterie 5

Fonction S

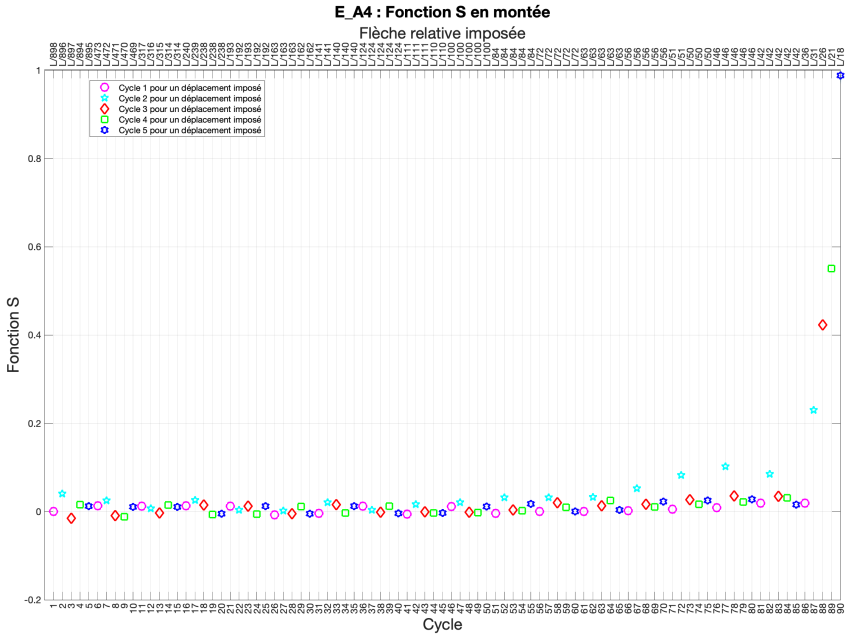


FIGURE M.356 – Fonction S en montée de l'éprouvette E_A4 de la batterie 5

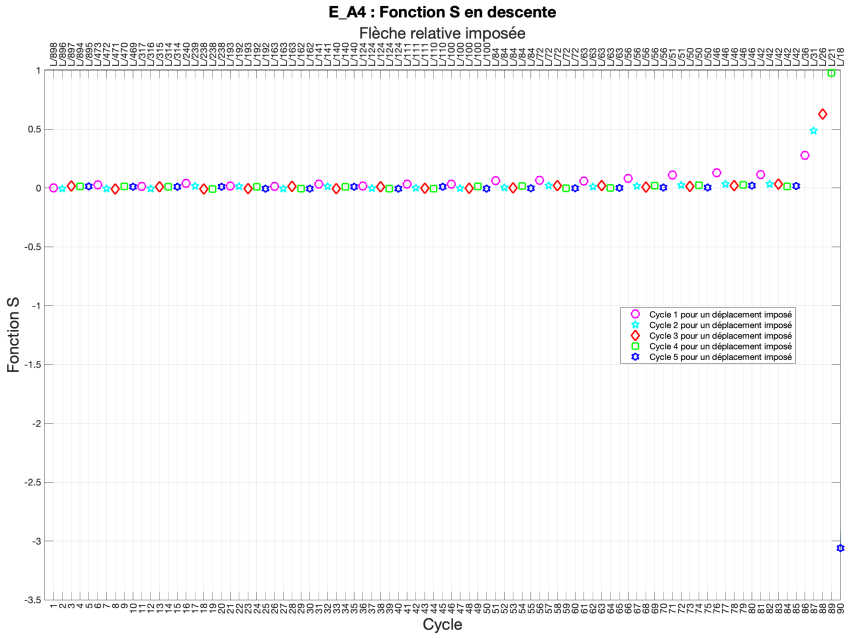


FIGURE M.357 – Fonction S en descente de l'éprouvette E_A4 de la batterie 5

Éprouvette E_A5

Global

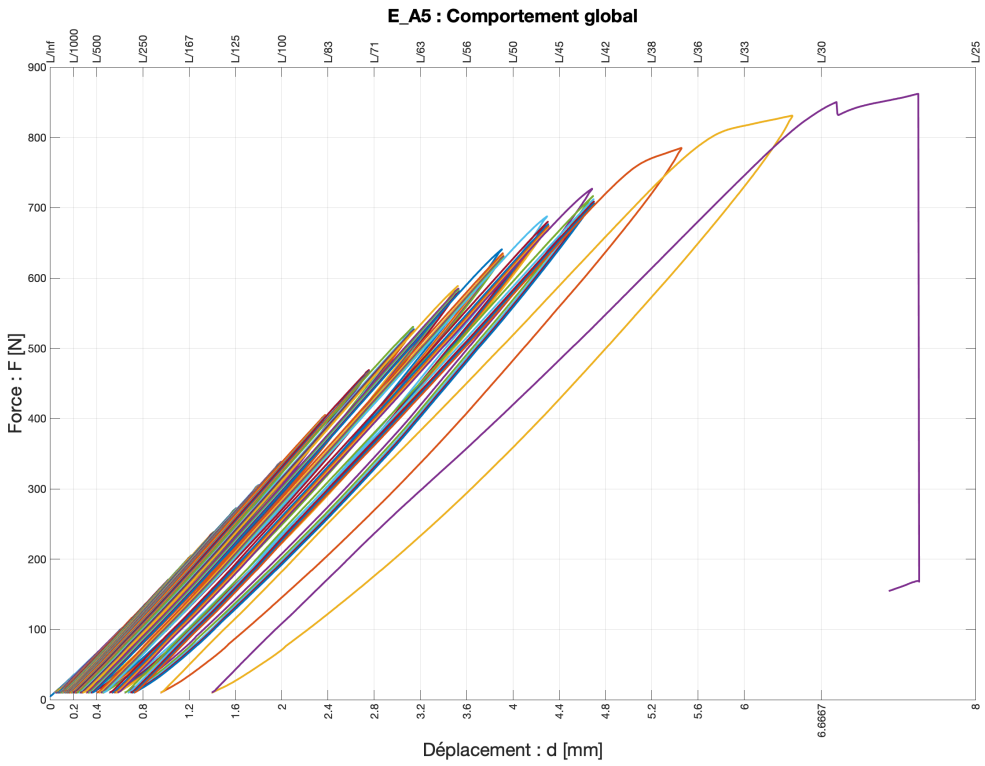


Figure M.358 – Comportement global de l'éprouvette E_A5 de la batterie 5

Déplacement résiduel

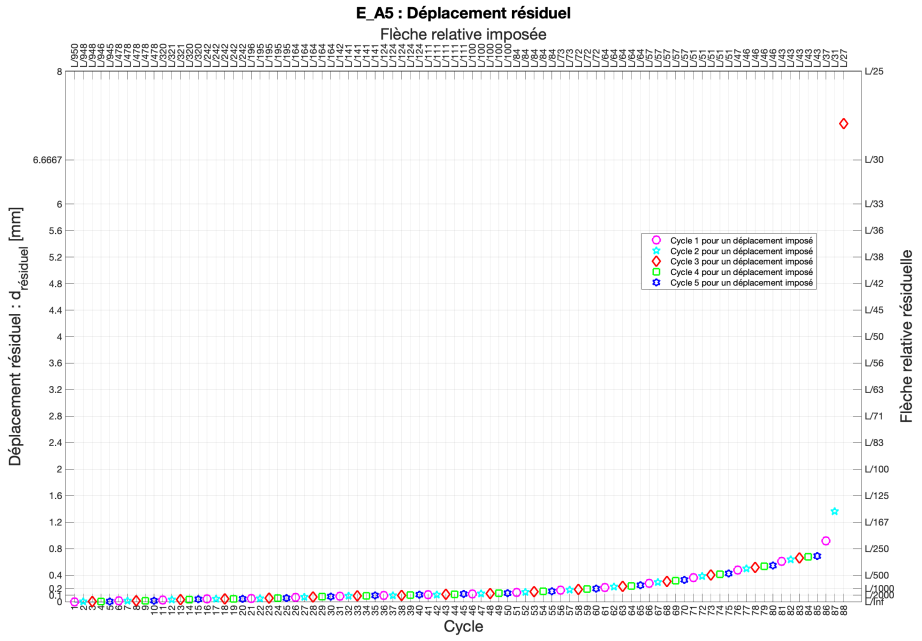


FIGURE M.359 – Déplacement résiduel de l'éprouvette E_A5 de la batterie 5

Force maximale

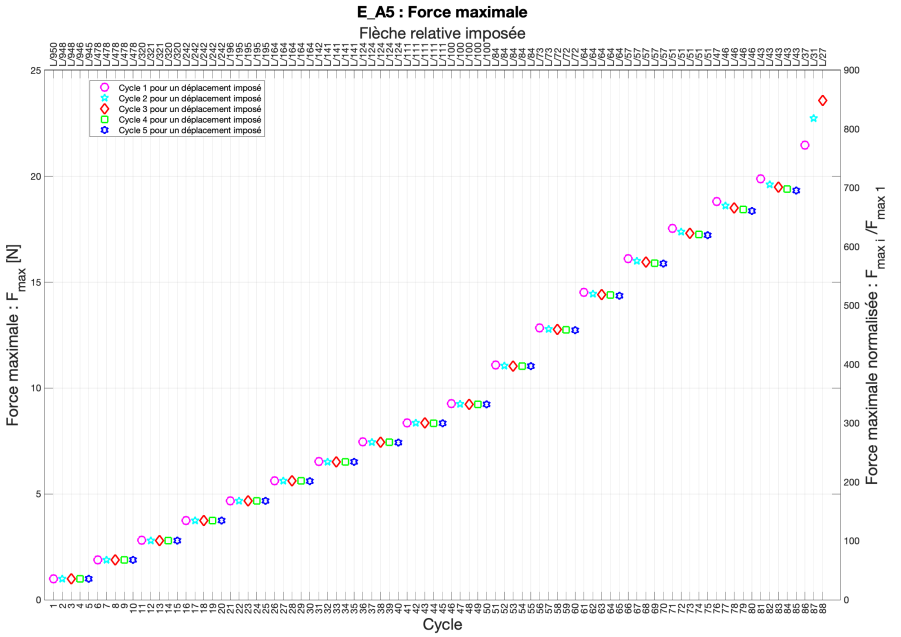


FIGURE M.360 – Force maximale de l'éprouvette E_A5 de la batterie 5

Module de Young

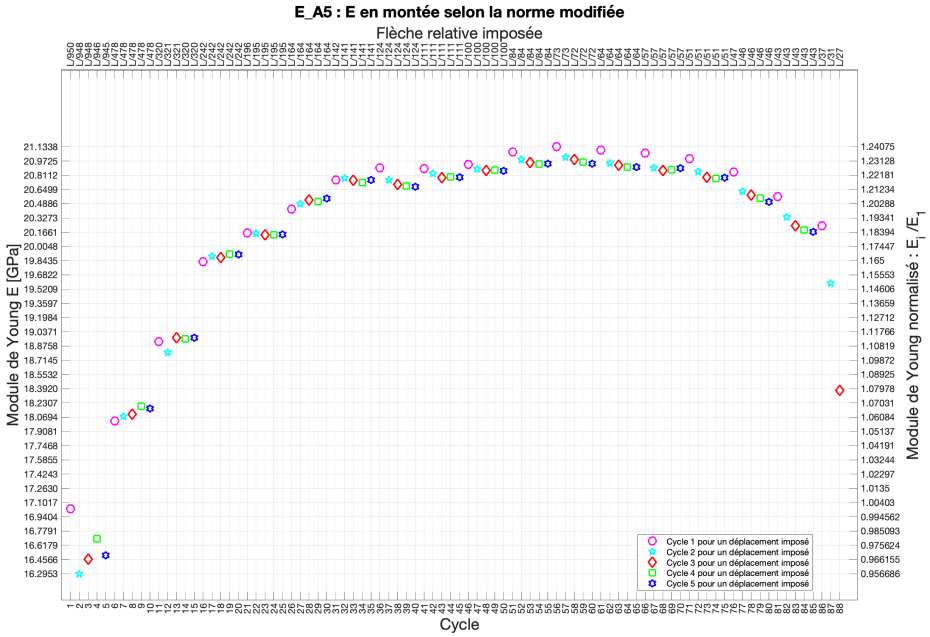


Figure M.361 – Module de Young en montée de l'éprouvette E_A5 de la batterie 5

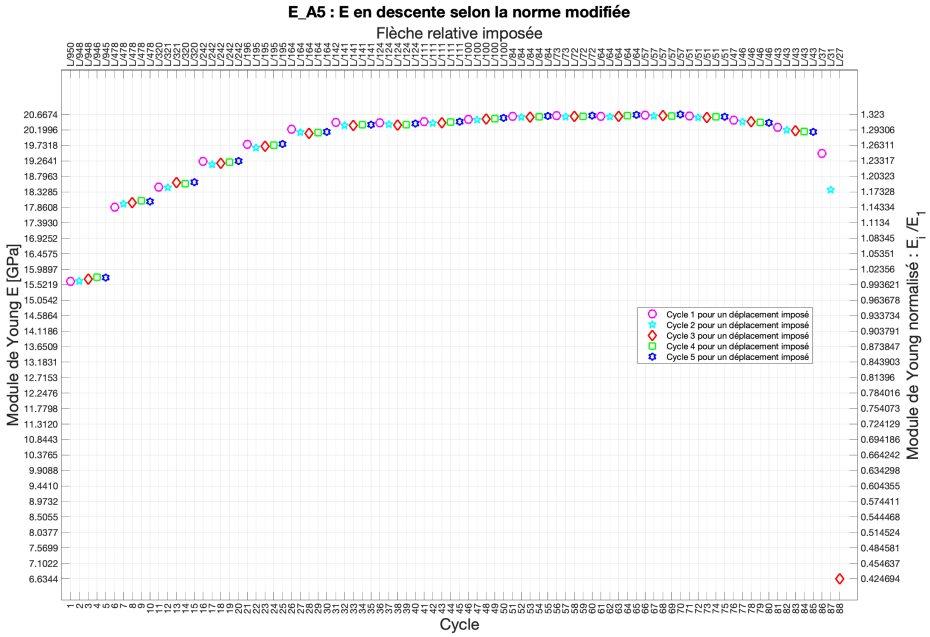


Figure M.362 – Module de Young en descente de l'éprouvette E_A5 de la batterie 5

Rigidité flexionnelle

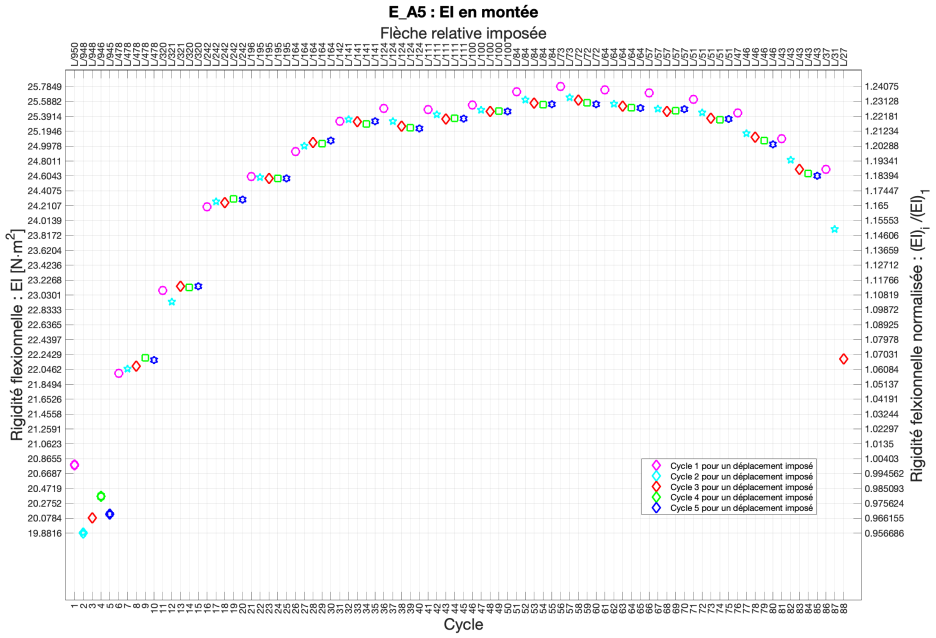


FIGURE M.363 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette E_A5 de la batterie 5

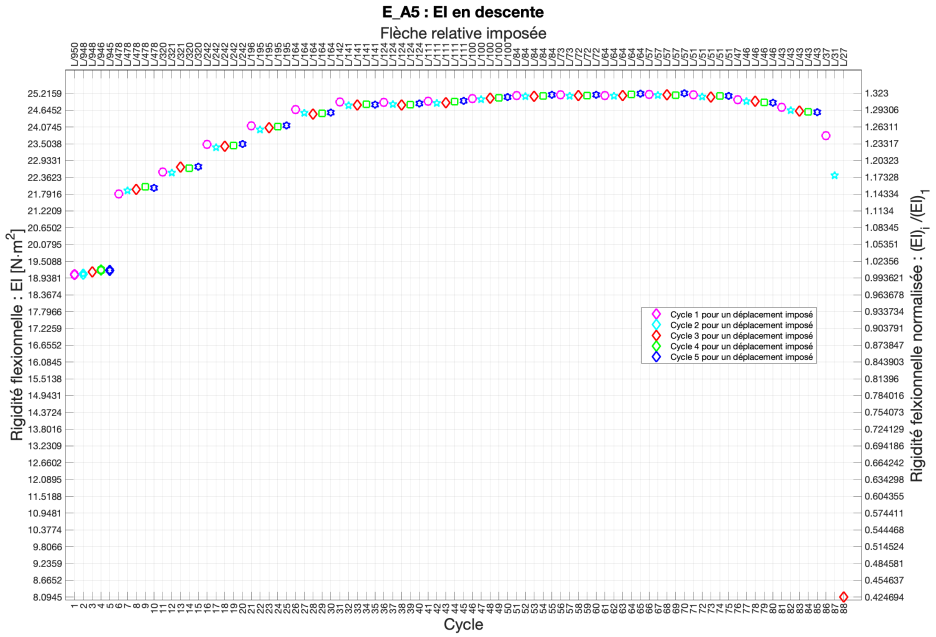


FIGURE M.364 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette E_A5 de la batterie 5

Fonction S

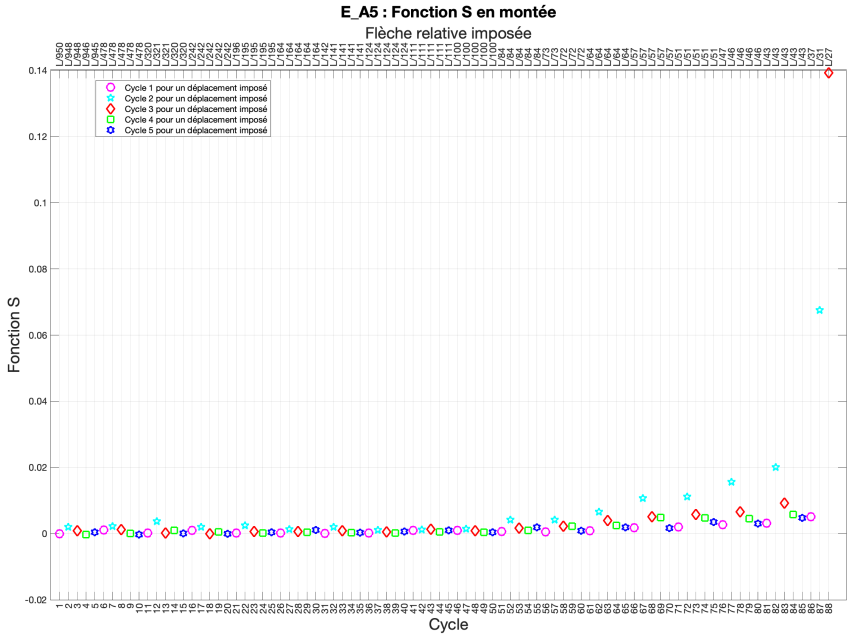


Figure M.365 – Fonction S en montée de l'éprouvette E_A5 de la batterie 5

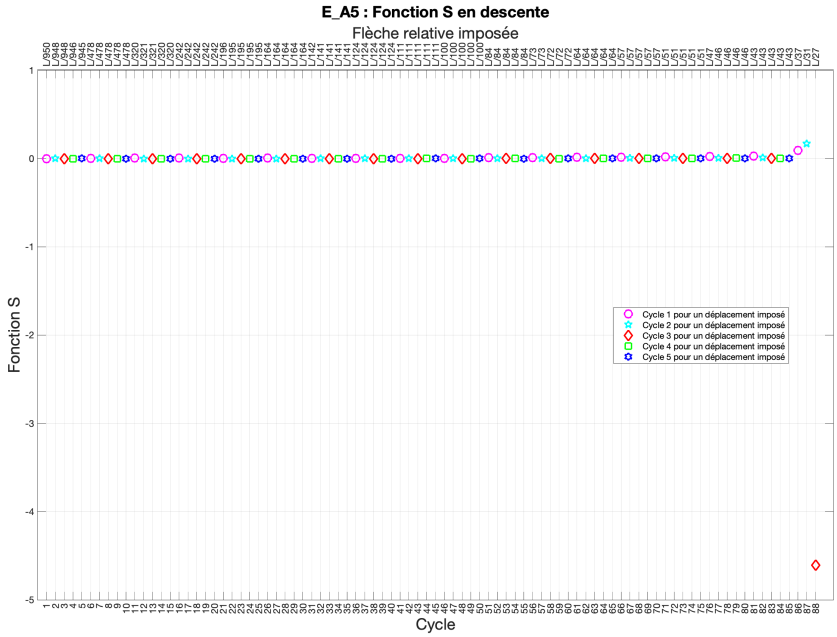


Figure M.366 – Fonction S en descente de l'éprouvette E_A5 de la batterie 5

Éprouvette E_A6

Global

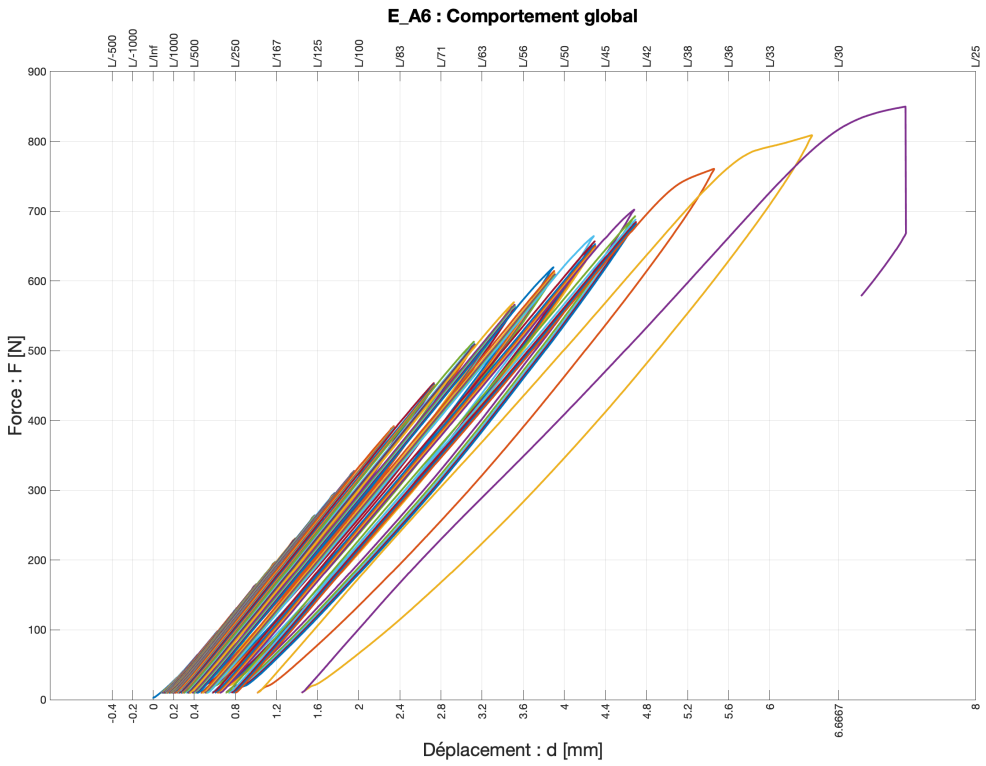


FIGURE M.367 – Comportement global de l'éprouvette E_A6 de la batterie 5

Déplacement résiduel

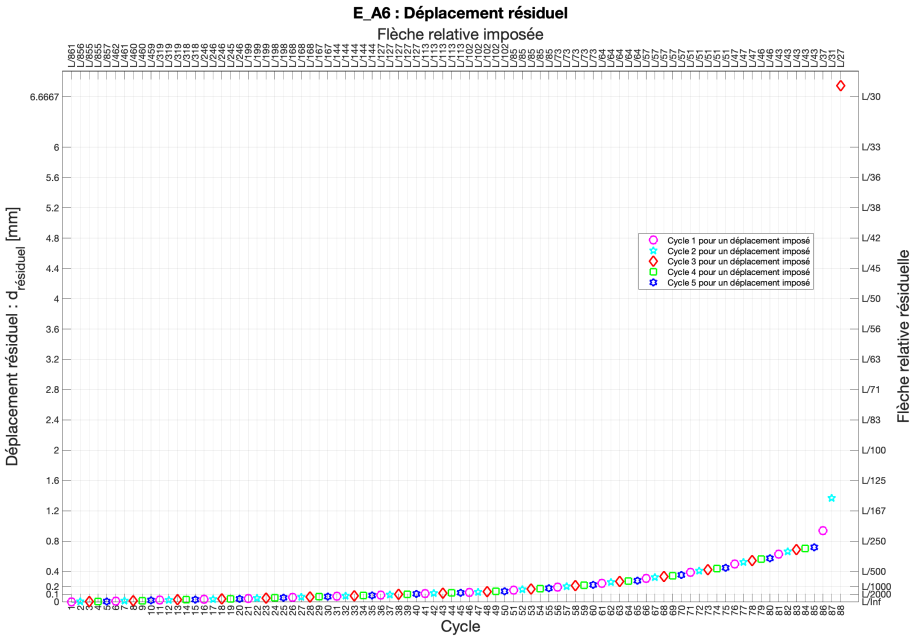


Figure M.368 – Déplacement résiduel de l'éprouvette E_A6 de la batterie 5

Force maximale

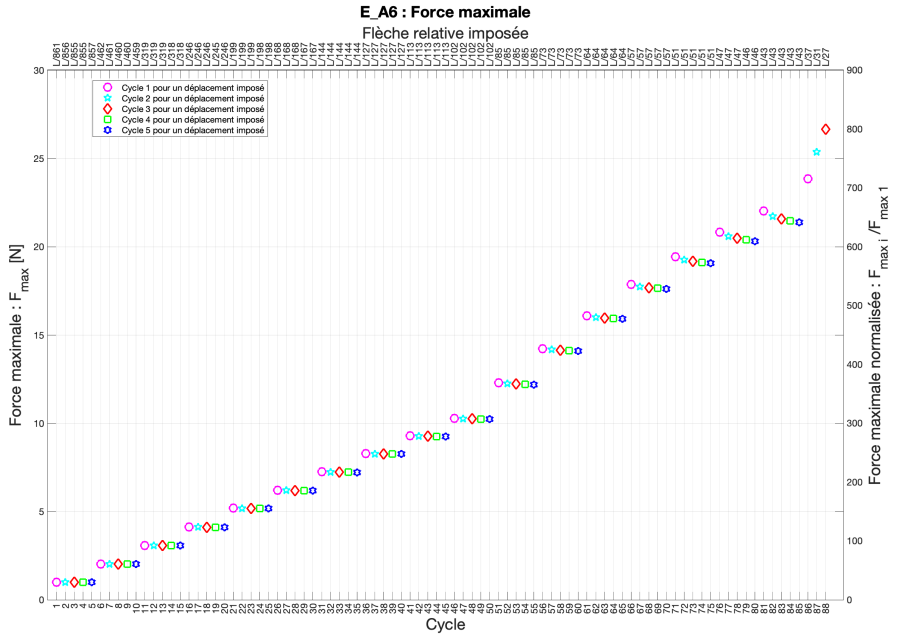


Figure M.369 – Force maximale de l'éprouvette E_A6 de la batterie 5

Module de Young

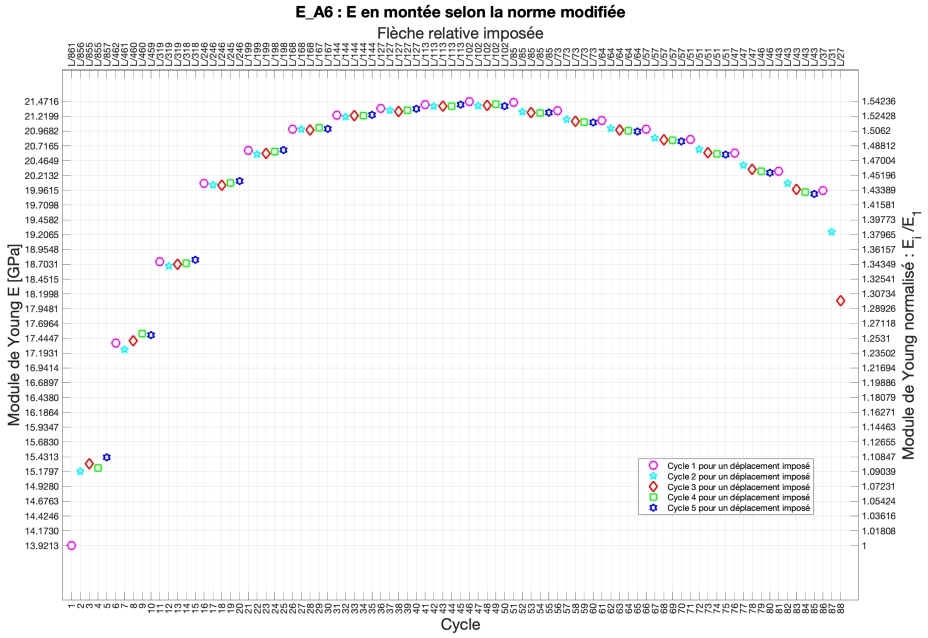


FIGURE M.370 – Module de Young en montée de l'éprouvette E_A6 de la batterie 5

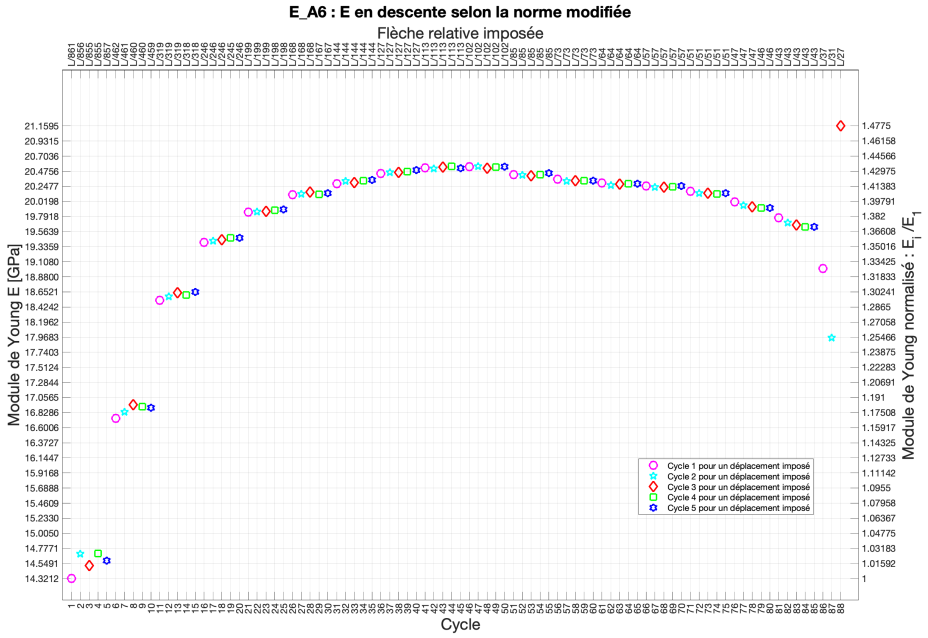


FIGURE M.371 – Module de Young en descente de l'éprouvette E_A6 de la batterie 5

Rigidité flexionnelle

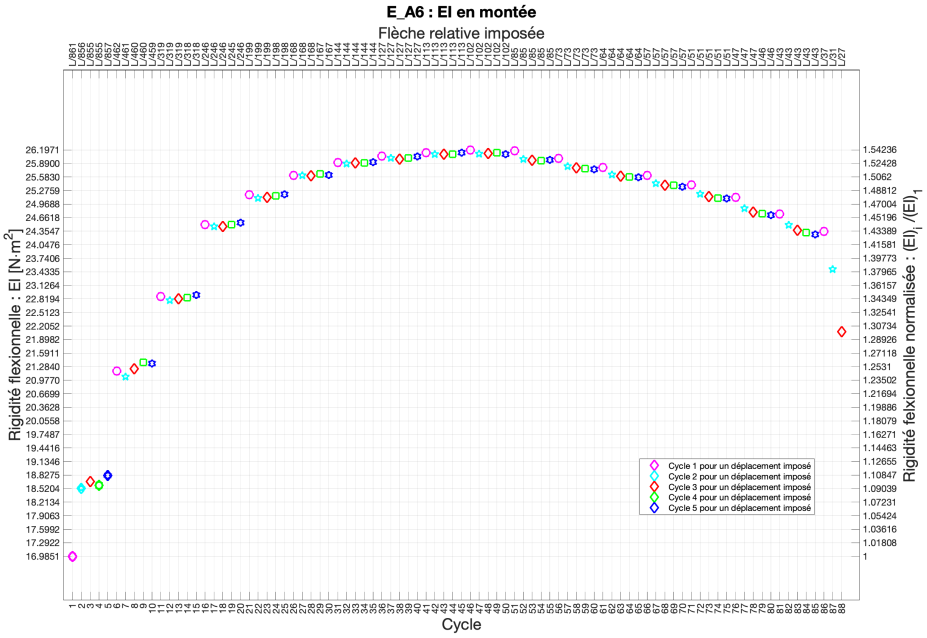


Figure M.372 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette E_A6 de la batterie 5

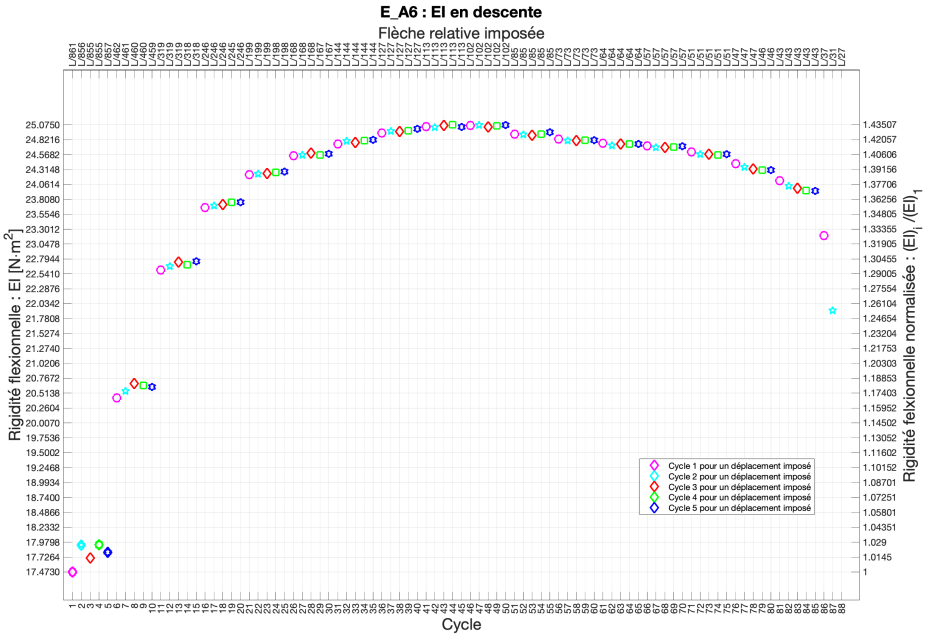


Figure M.373 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette E_A6 de la batterie 5

Fonction S

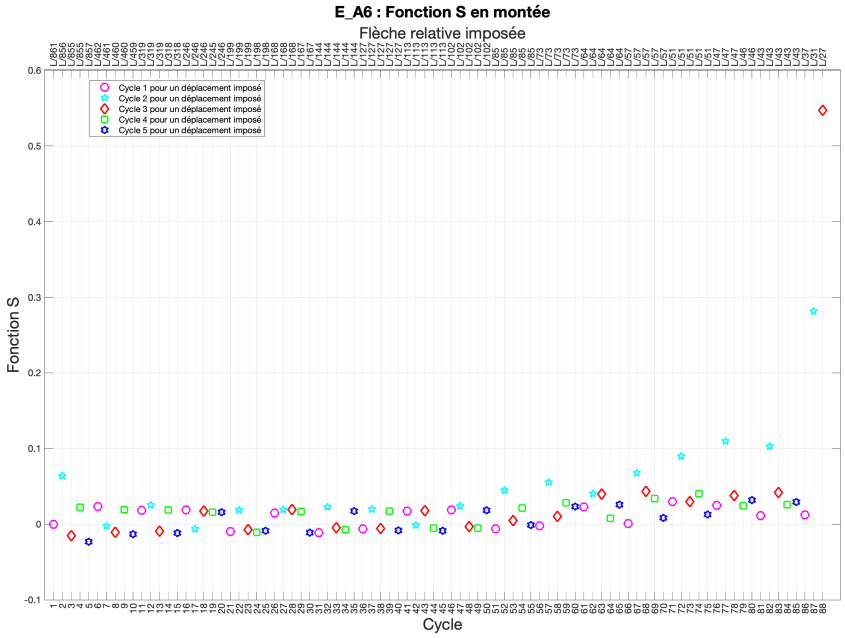


FIGURE M.374 – Fonction S en montée de l'éprouvette E_A6 de la batterie 5

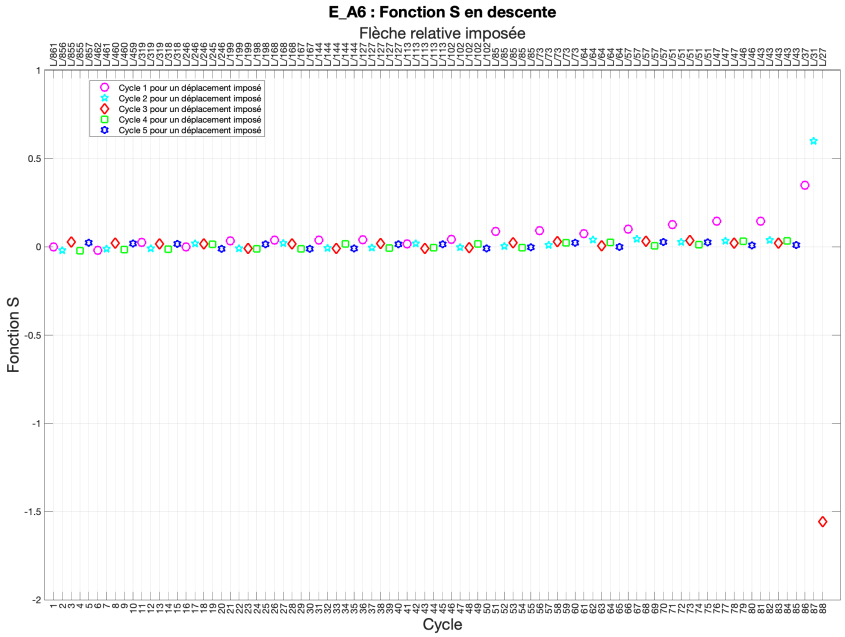


FIGURE M.375 – Fonction S en descente de l'éprouvette E_A6 de la batterie 5

Éprouvette E_B1

Global

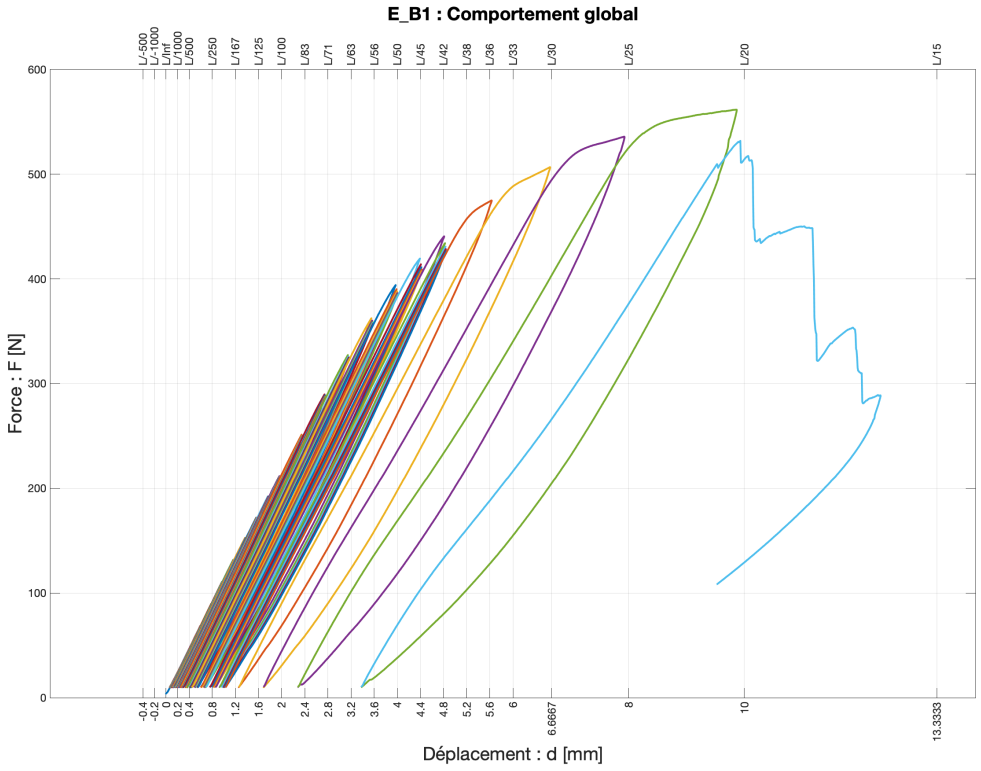


Figure M.376 – Comportement global de l'éprouvette E_B1 de la batterie 5

Déplacement résiduel

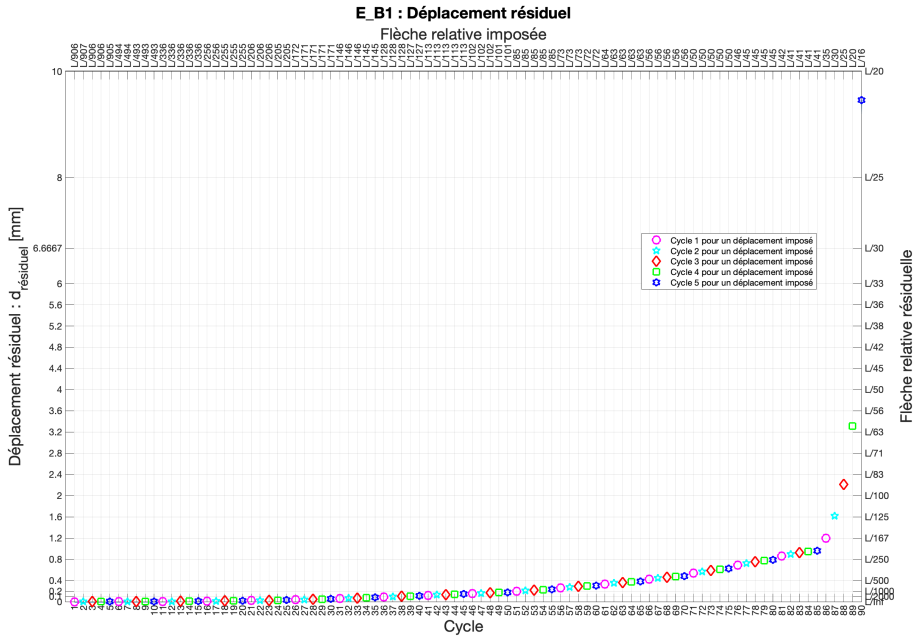


FIGURE M.377 – Déplacement résiduel de l'éprouvette E_B1 de la batterie 5

Force maximale

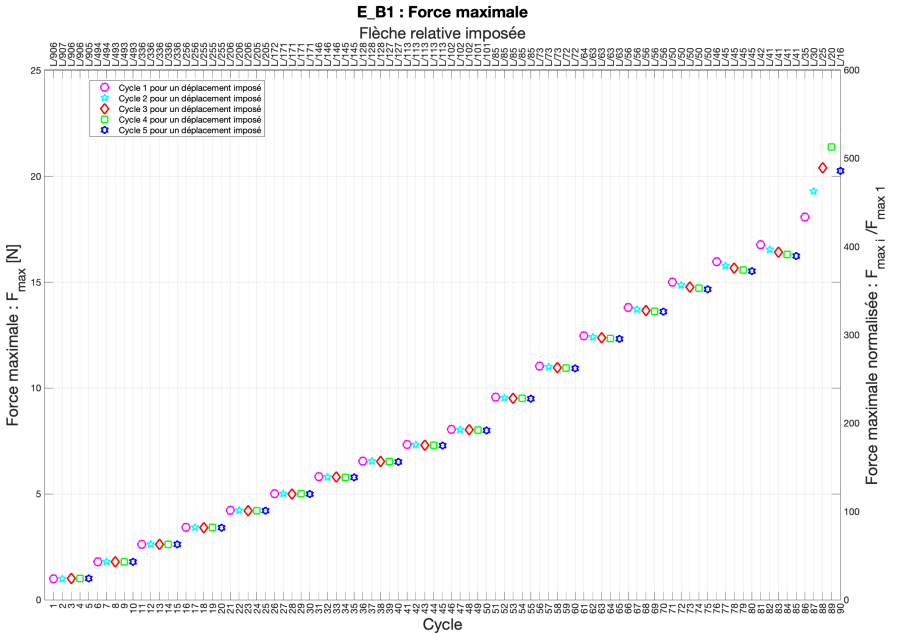


FIGURE M.378 – Force maximale de l'éprouvette E_B1 de la batterie 5

Module de Young

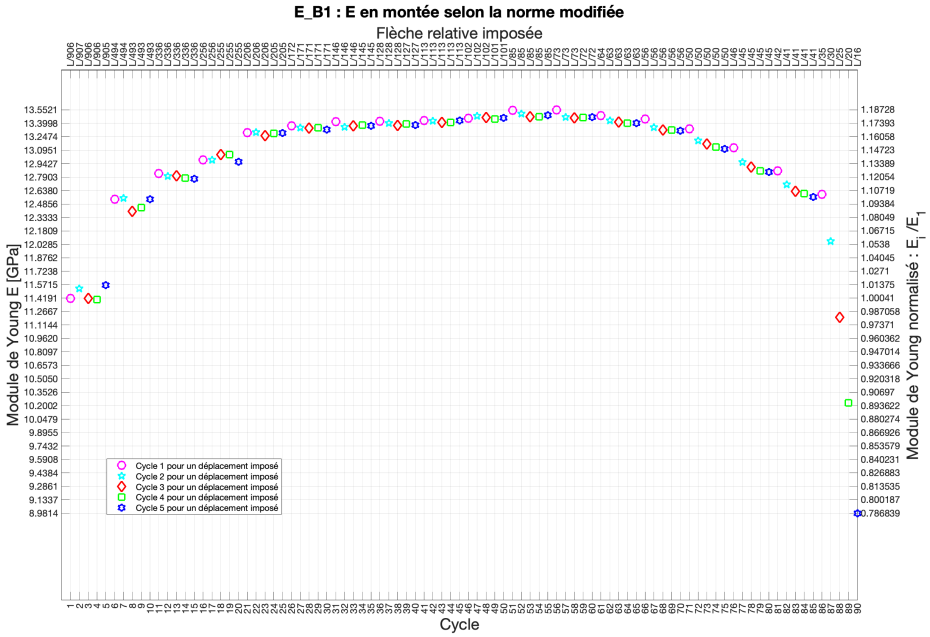


Figure M.379 – Module de Young en montée de l'éprouvette E_B1 de la batterie 5

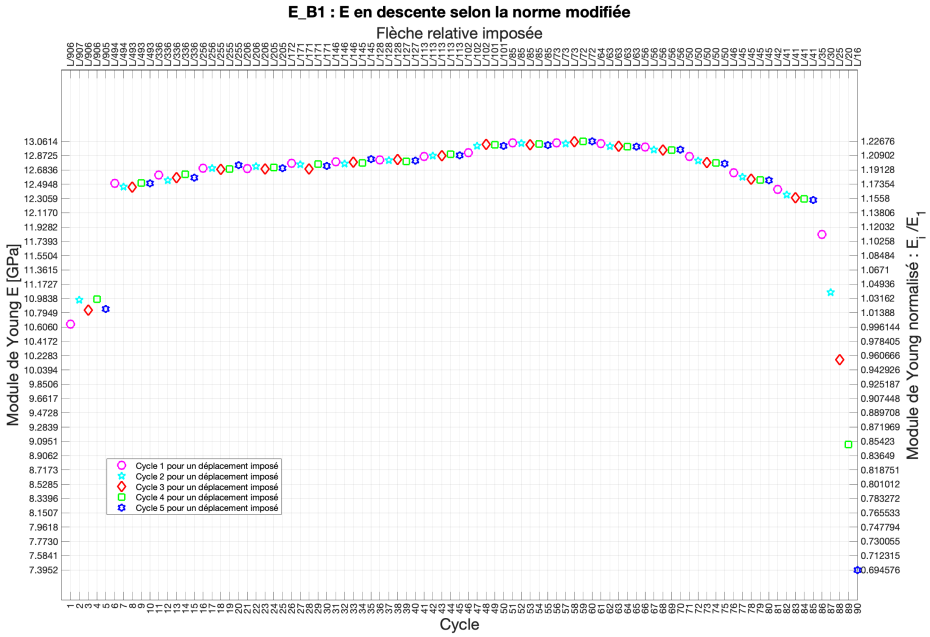


Figure M.380 – Module de Young en descente de l'éprouvette E_B1 de la batterie 5

Rigidité flexionnelle

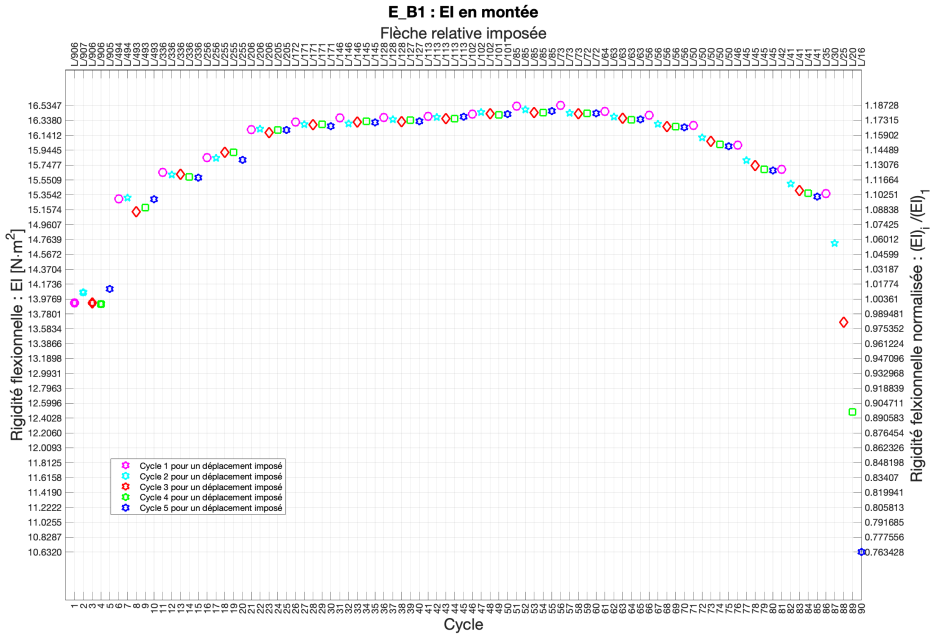


FIGURE M.381 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette E_B1 de la batterie 5

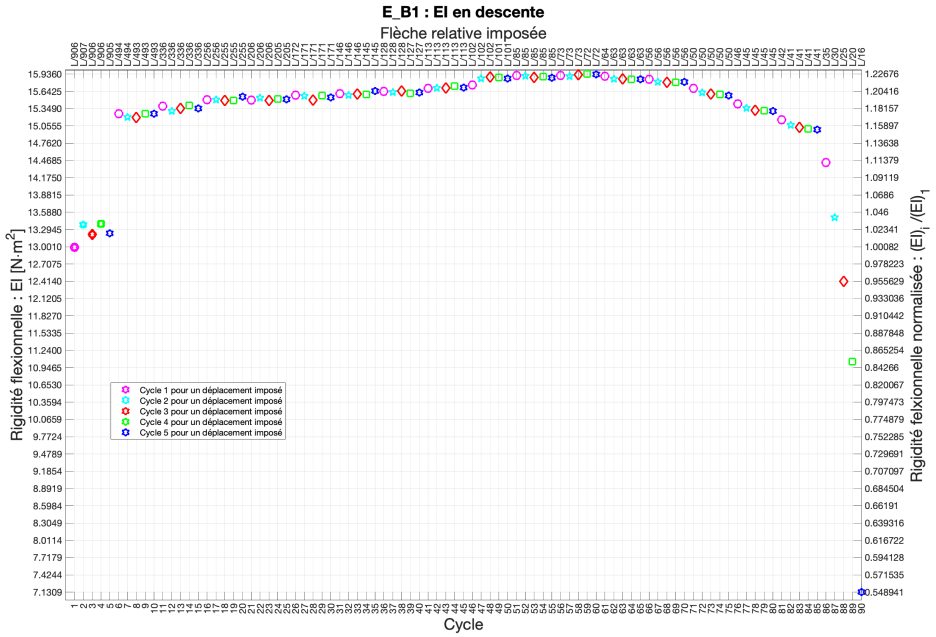


FIGURE M.382 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette E_B1 de la batterie 5

Fonction S

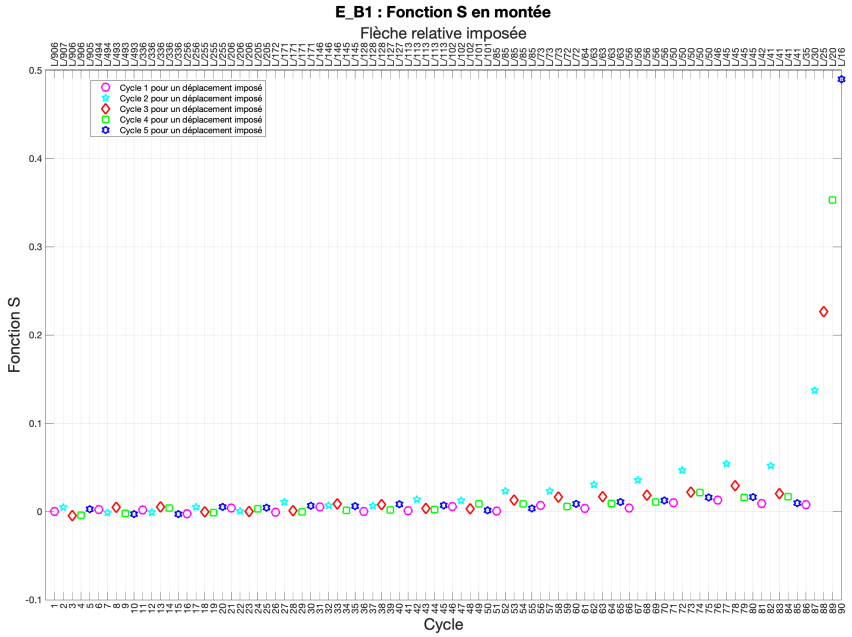


Figure M.383 – Fonction S en montée de l'éprouvette E_B1 de la batterie 5

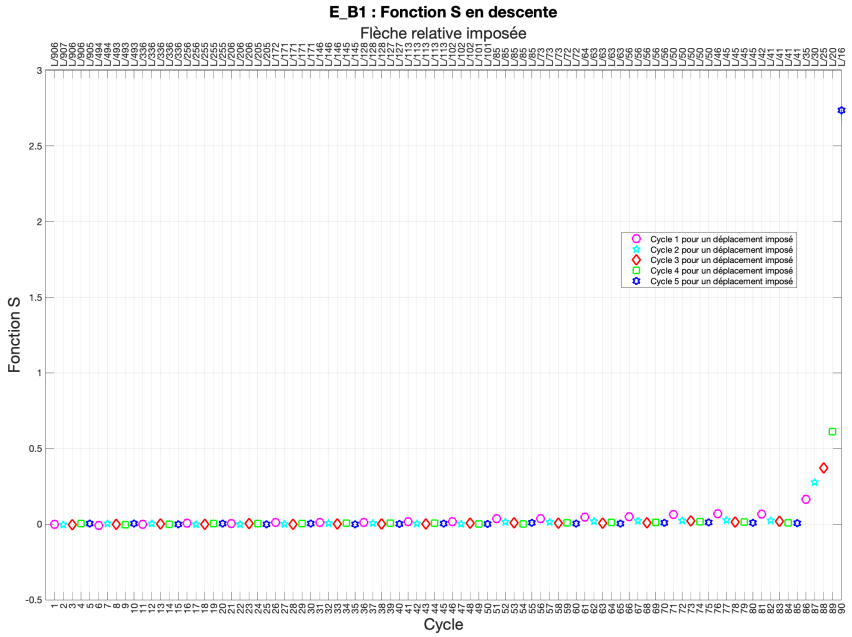


Figure M.384 – Fonction S en descente de l'éprouvette E_B1 de la batterie 5

Éprouvette E_B3

Global

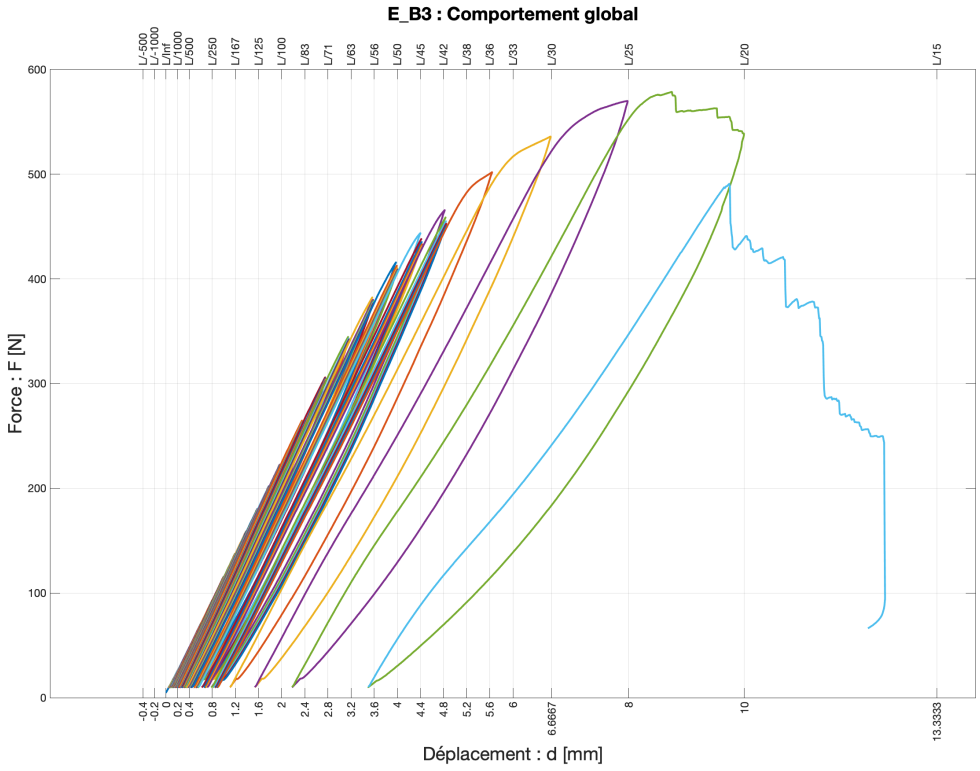


FIGURE M.385 – Comportement global de l'éprouvette E_B3 de la batterie 5

Déplacement résiduel

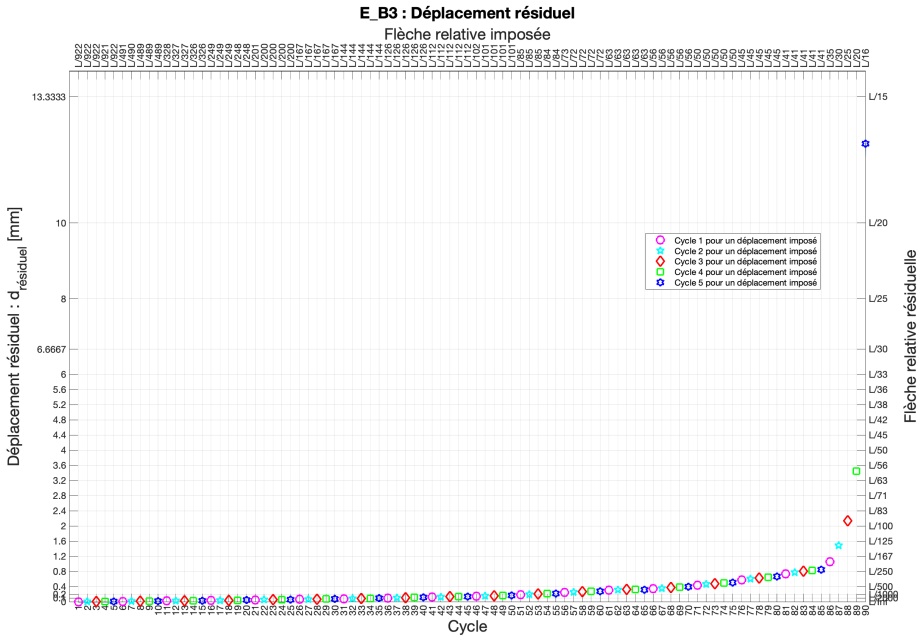


Figure M.386 – Déplacement résiduel de l'éprouvette E_B3 de la batterie 5

Force maximale

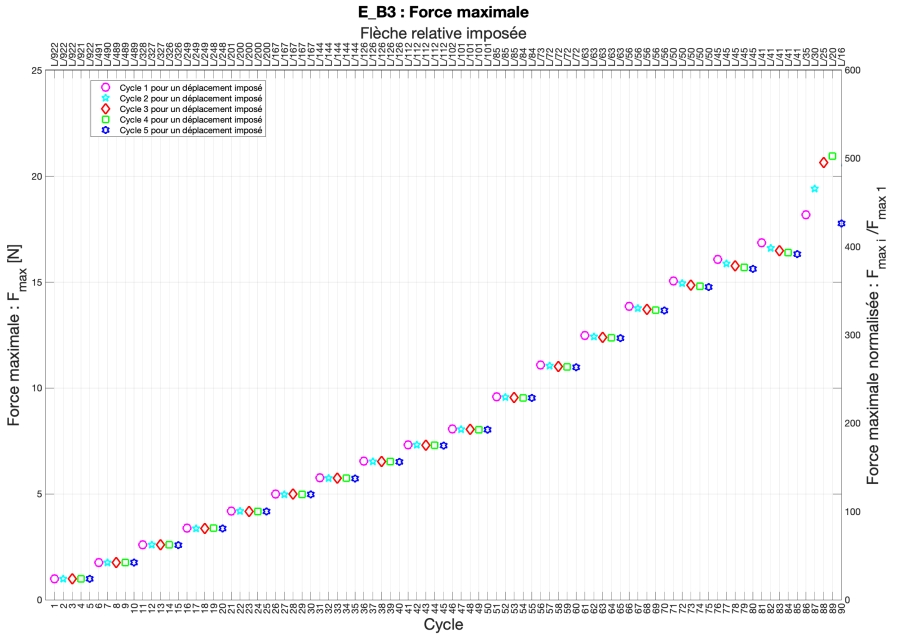


Figure M.387 – Force maximale de l'éprouvette E_B3 de la batterie 5

Module de Young

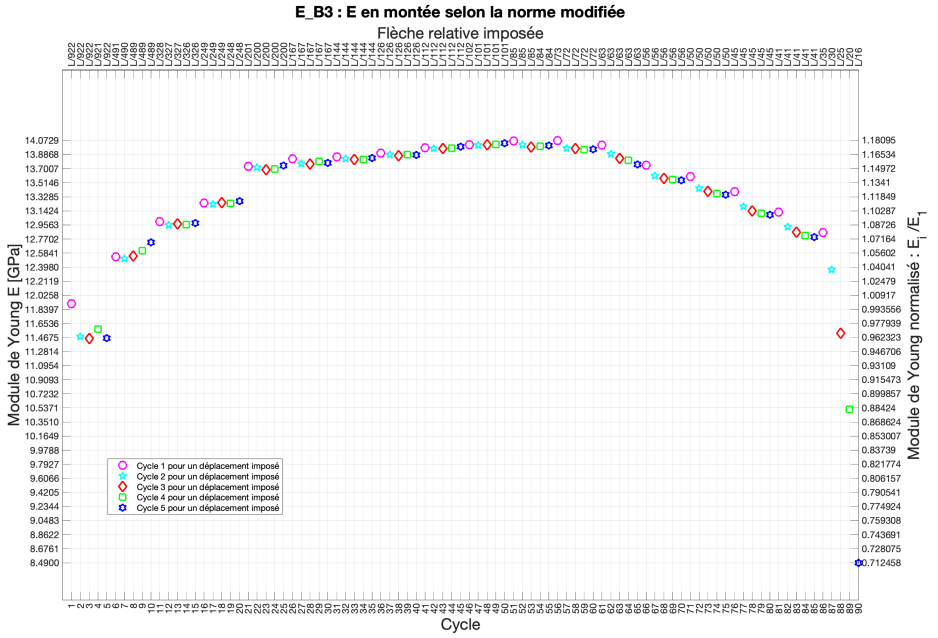


FIGURE M.388 – Module de Young en montée de l'éprouvette E_B3 de la batterie 5

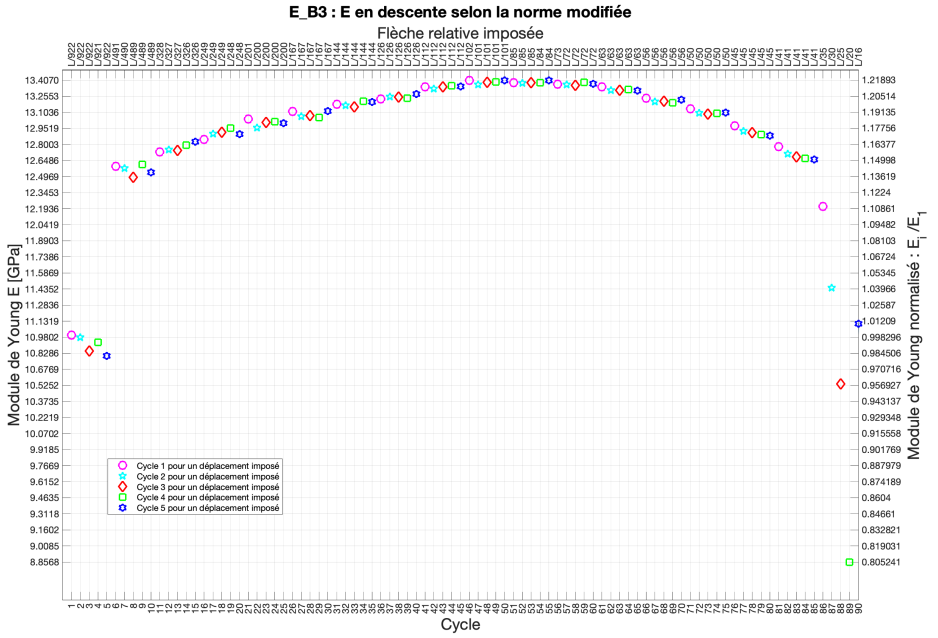


FIGURE M.389 – Module de Young en descente de l'éprouvette E_B3 de la batterie 5

Rigidité flexionnelle

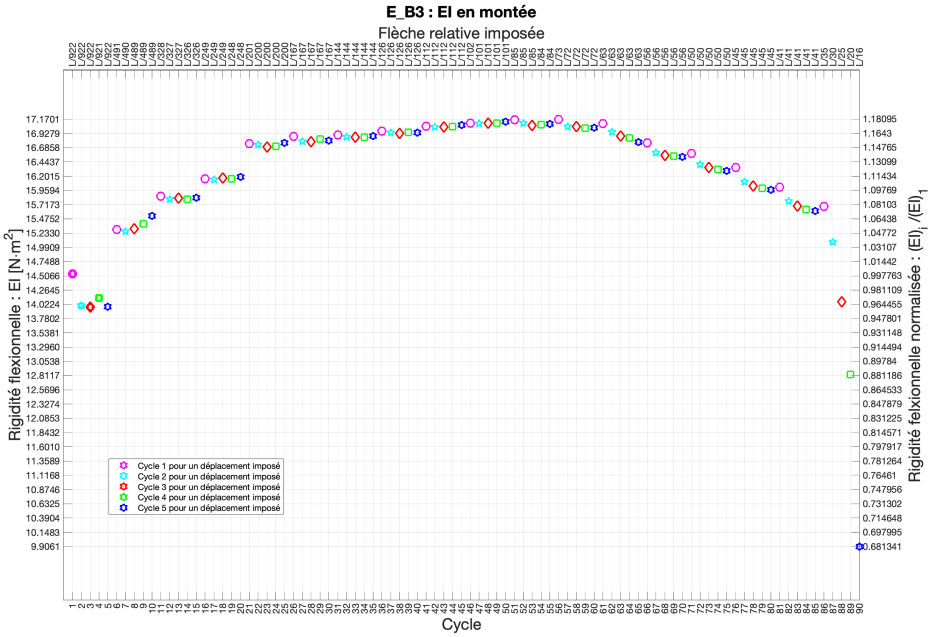


Figure M.390 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette E_B3 de la batterie 5

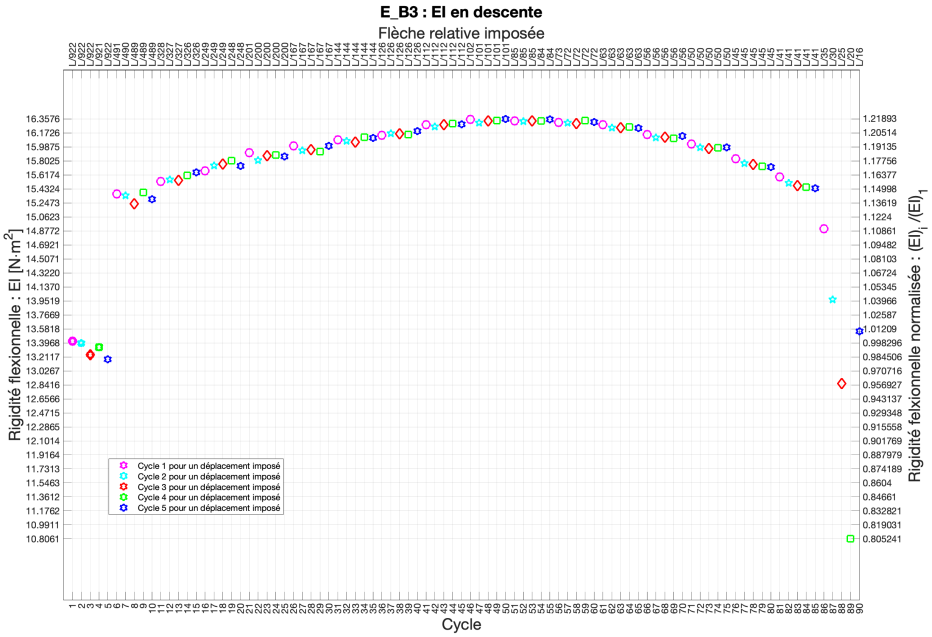


Figure M.391 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette E_B3 de la batterie 5

Fonction S

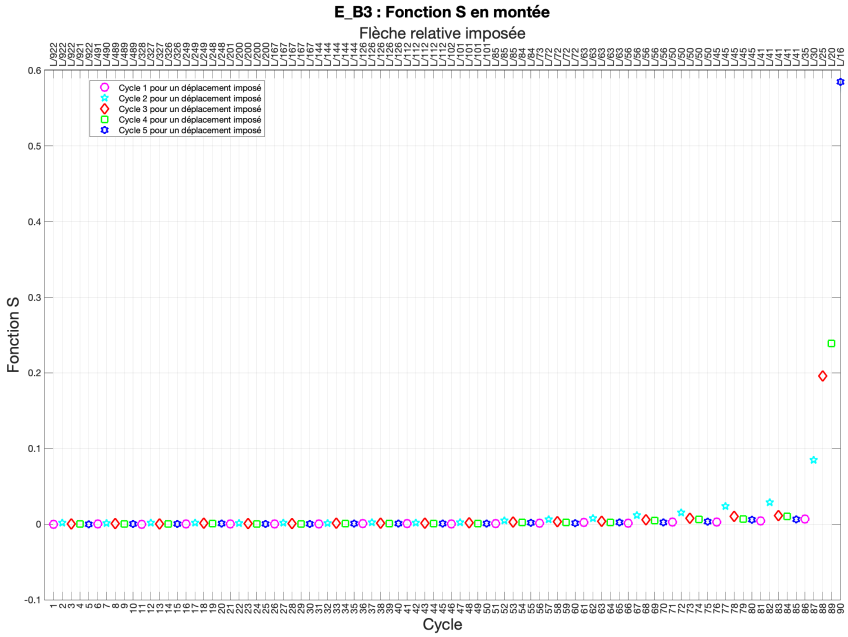


FIGURE M.392 – Fonction S en montée de l'éprouvette E_B3 de la batterie 5

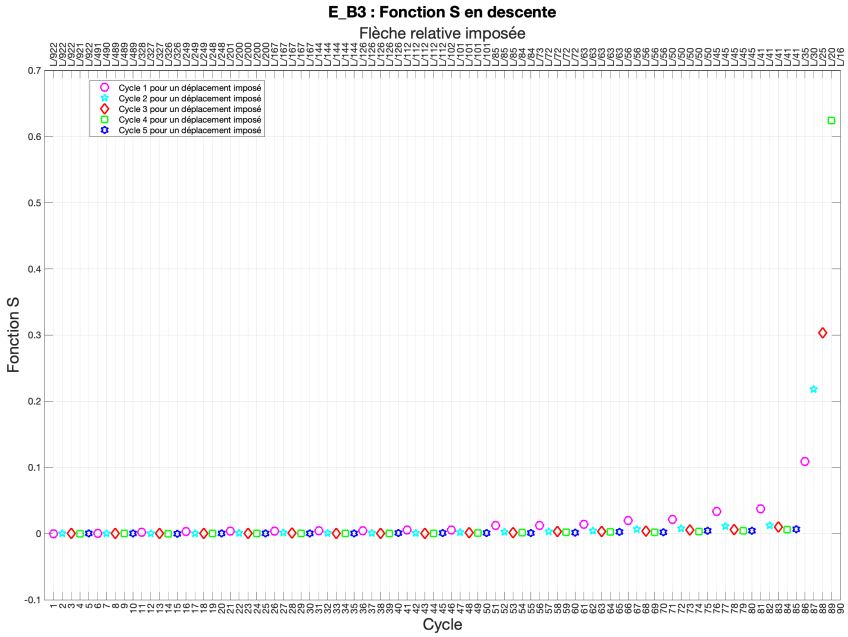


FIGURE M.393 – Fonction S en descente de l'éprouvette E_B3 de la batterie 5

Éprouvette E_B4

Global

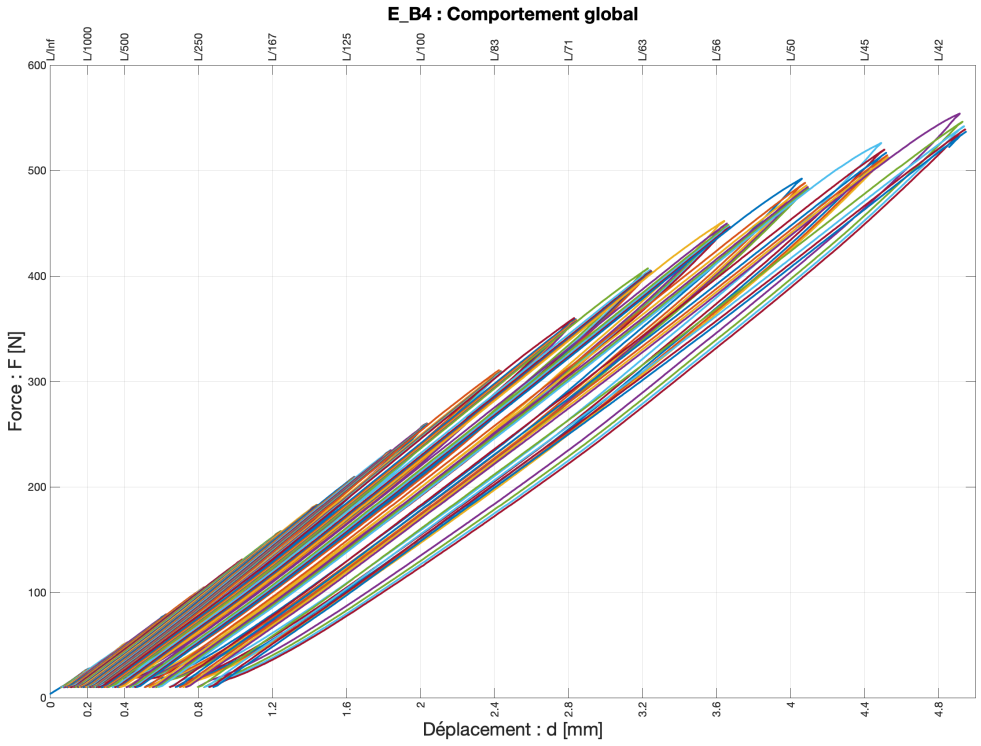


Figure M.394 – Comportement global de l'éprouvette E_B4 de la batterie 5

Déplacement résiduel

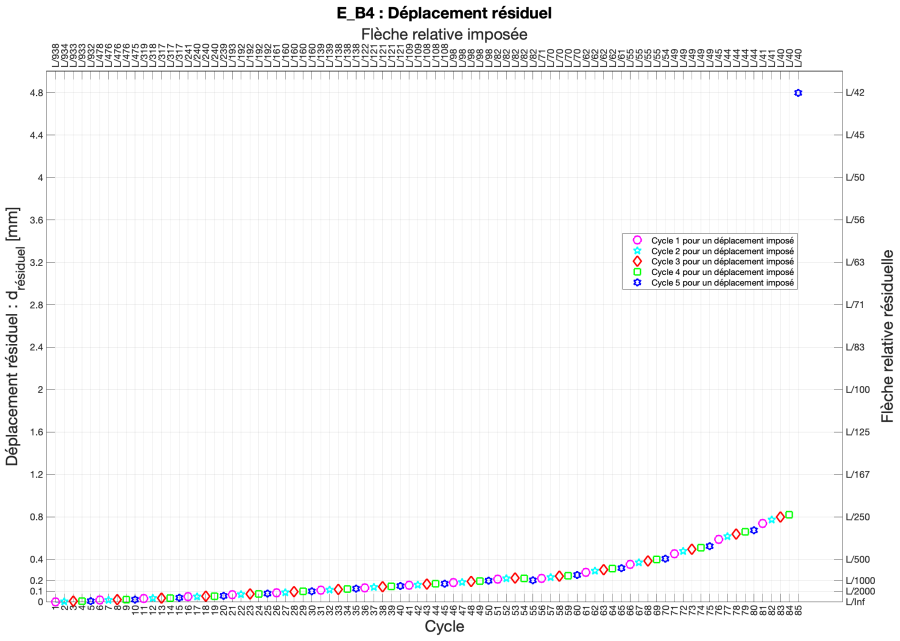


FIGURE M.395 – Déplacement résiduel de l'éprouvette E_B4 de la batterie 5

Force maximale

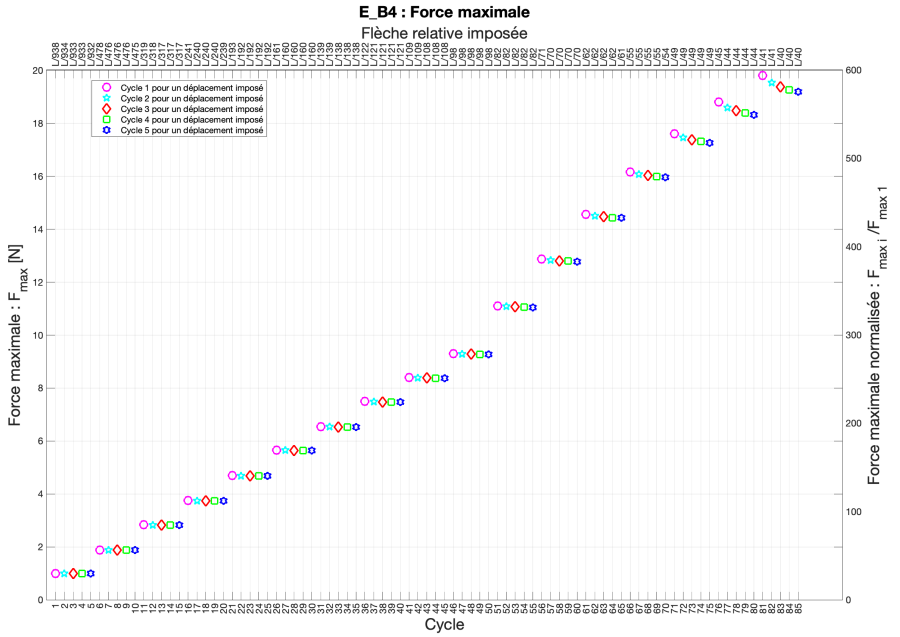


FIGURE M.396 – Force maximale de l'éprouvette E_B4 de la batterie 5

Module de Young

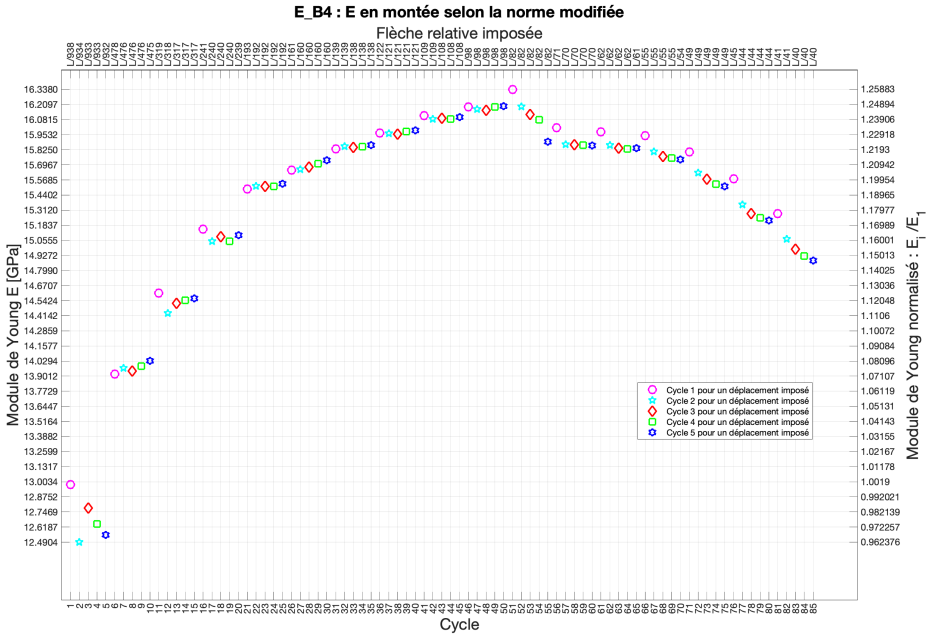


Figure M.397 – Module de Young en montée de l'éprouvette E_B4 de la batterie 5

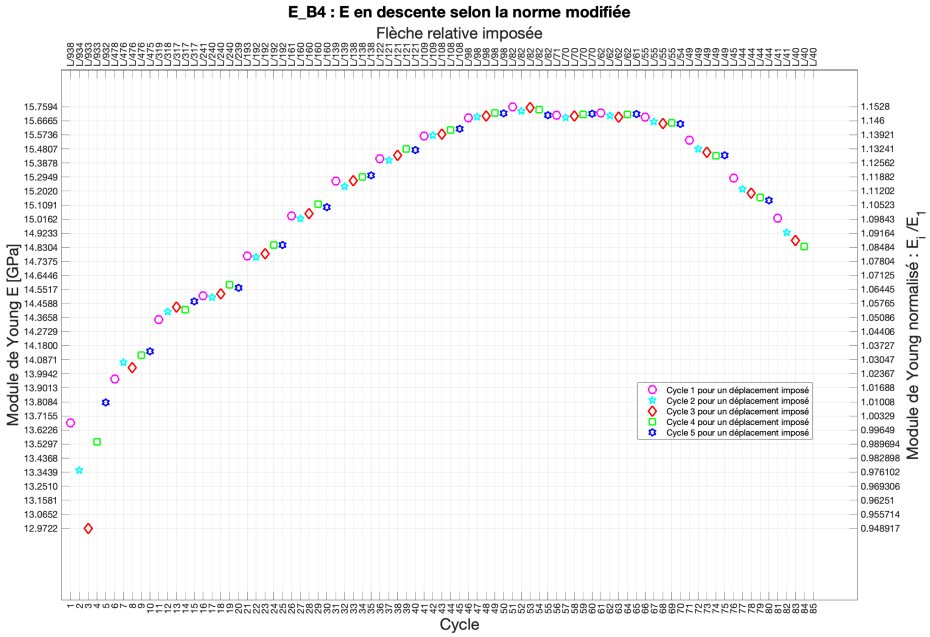


Figure M.398 – Module de Young en descente de l'éprouvette E_B4 de la batterie 5

Rigidité flexionnelle

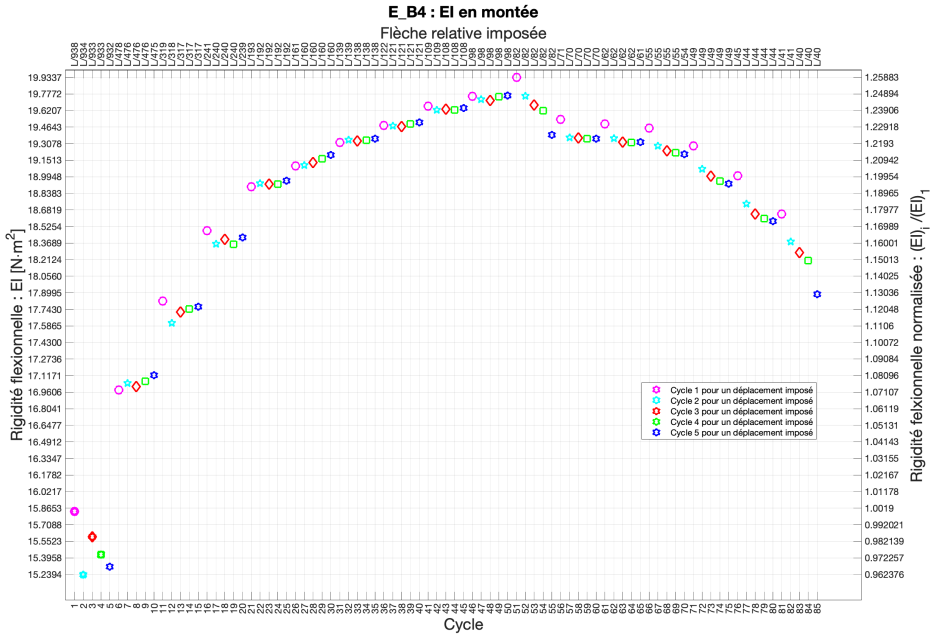


FIGURE M.399 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette E_B4 de la batterie 5

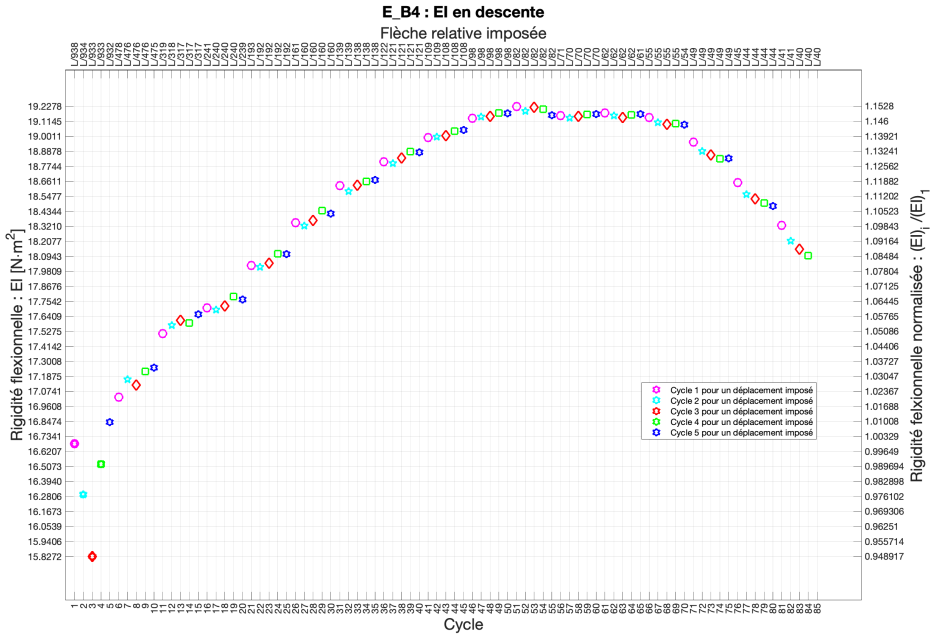


FIGURE M.400 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette E_B4 de la batterie 5

Fonction S

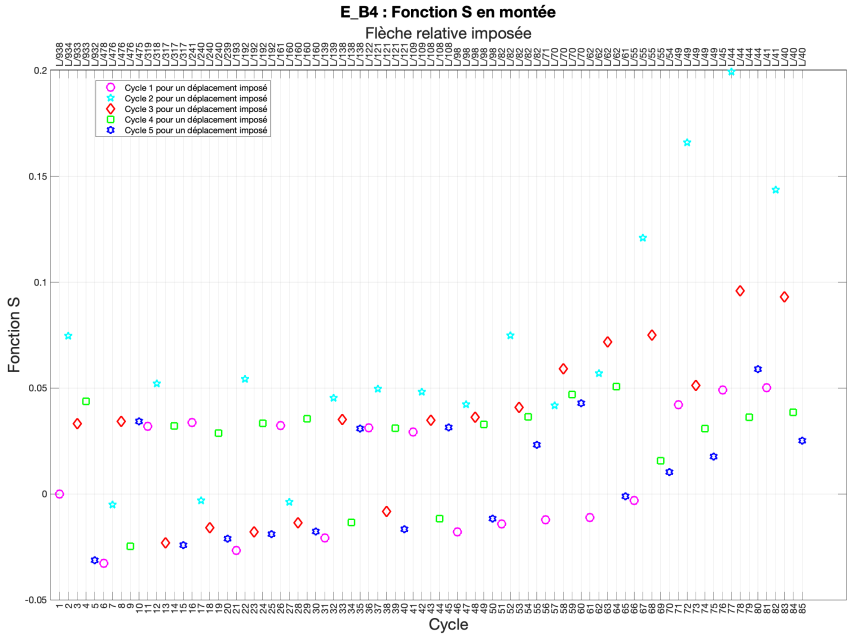


Figure M.401 – Fonction S en montée de l'éprouvette E_B4 de la batterie 5

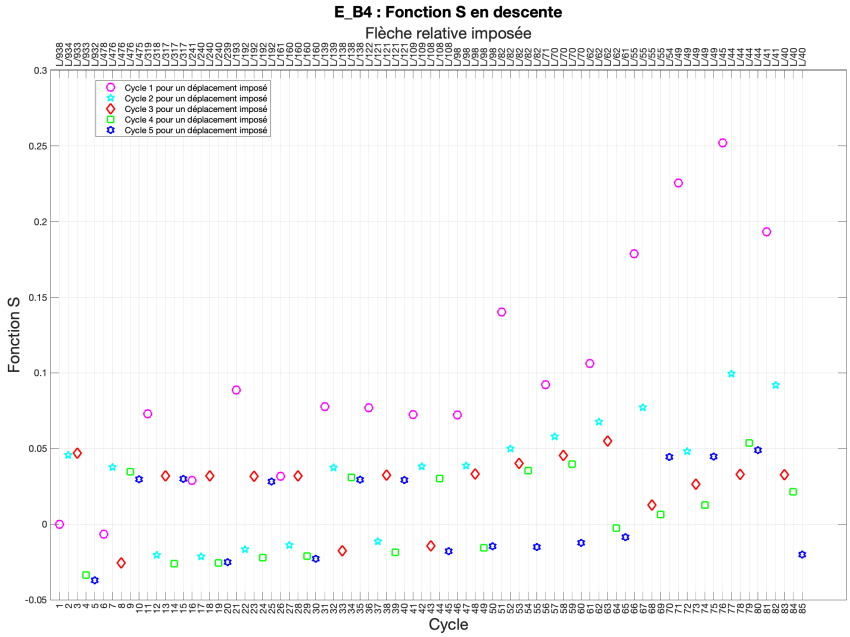


Figure M.402 – Fonction S en descente de l'éprouvette E_B4 de la batterie 5

Éprouvette E_B5

Global

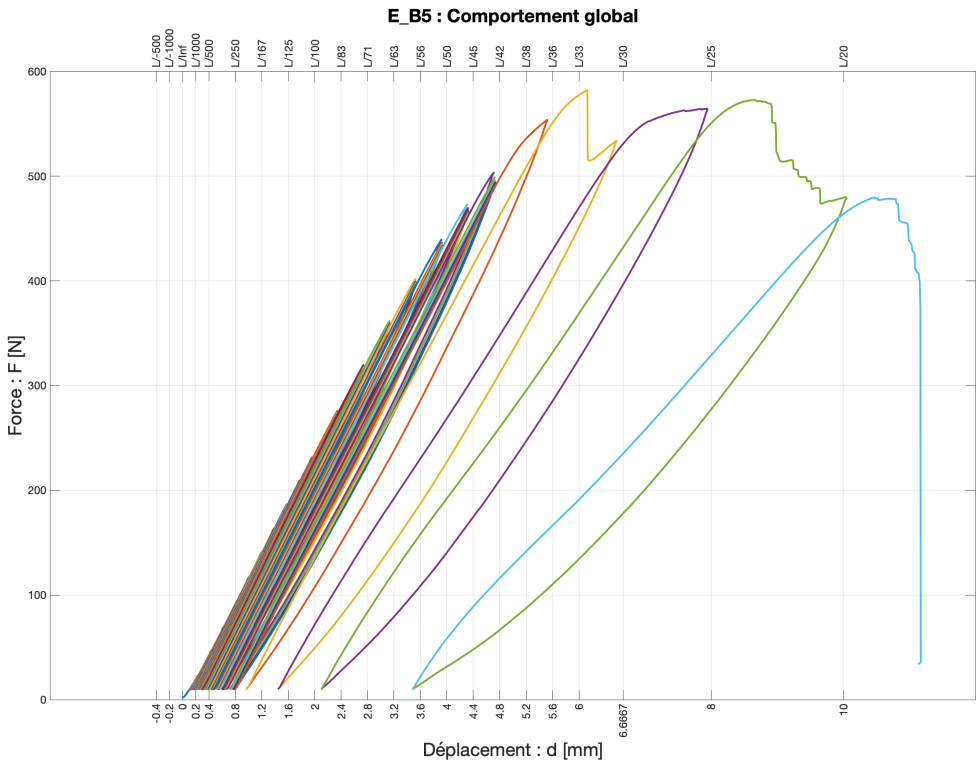


FIGURE M.403 – Comportement global de l'éprouvette E_B5 de la batterie 5

Déplacement résiduel

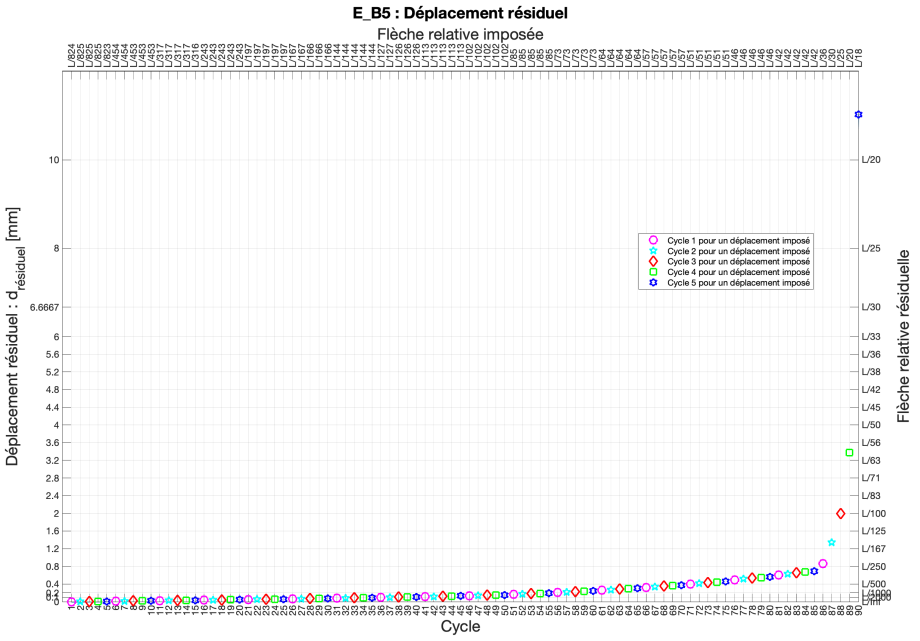


Figure M.404 – Déplacement résiduel de l'éprouvette E_B5 de la batterie 5

Force maximale

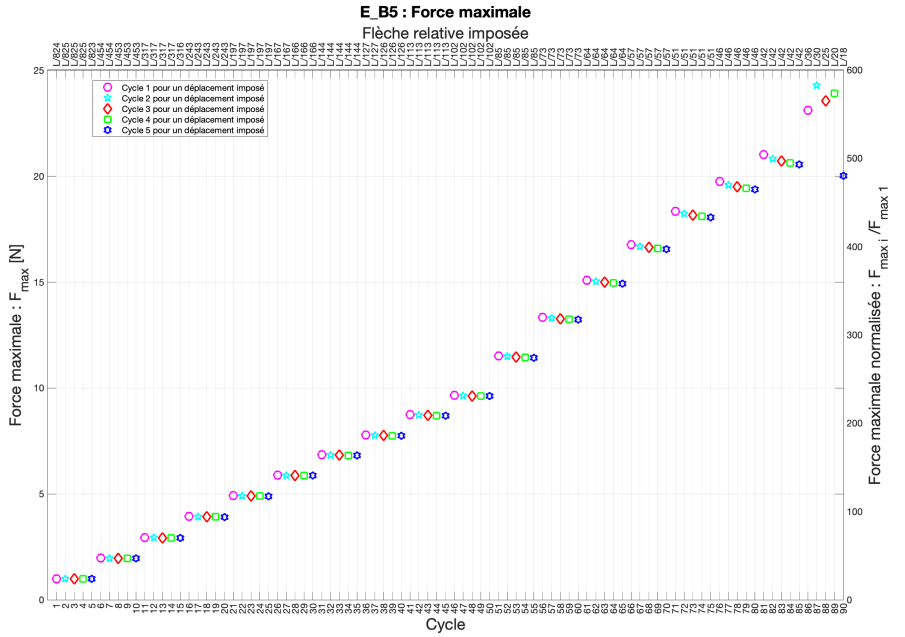


Figure M.405 – Force maximale de l'éprouvette E_B5 de la batterie 5

Module de Young

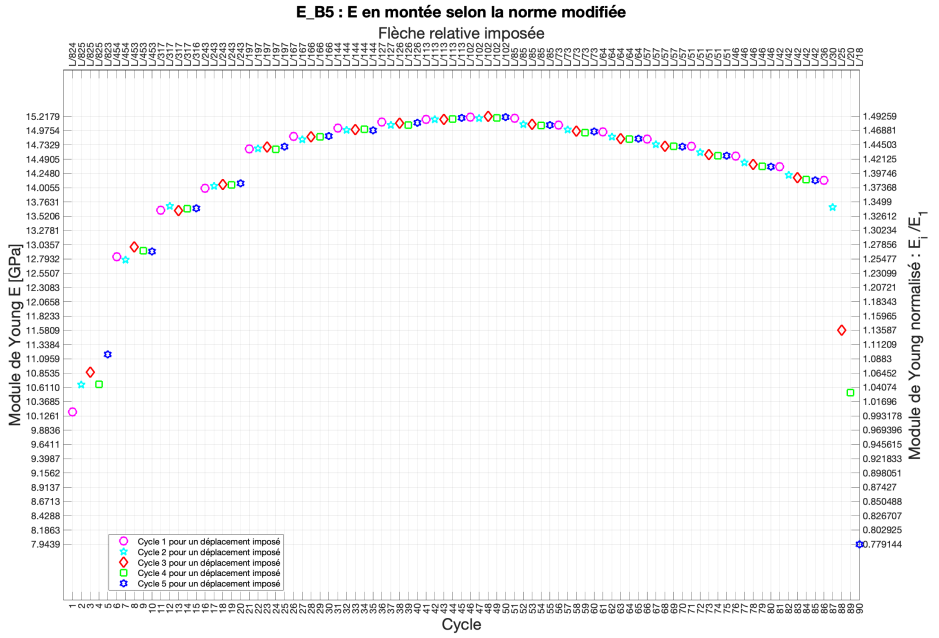


FIGURE M.406 – Module de Young en montée de l'éprouvette E_B5 de la batterie 5

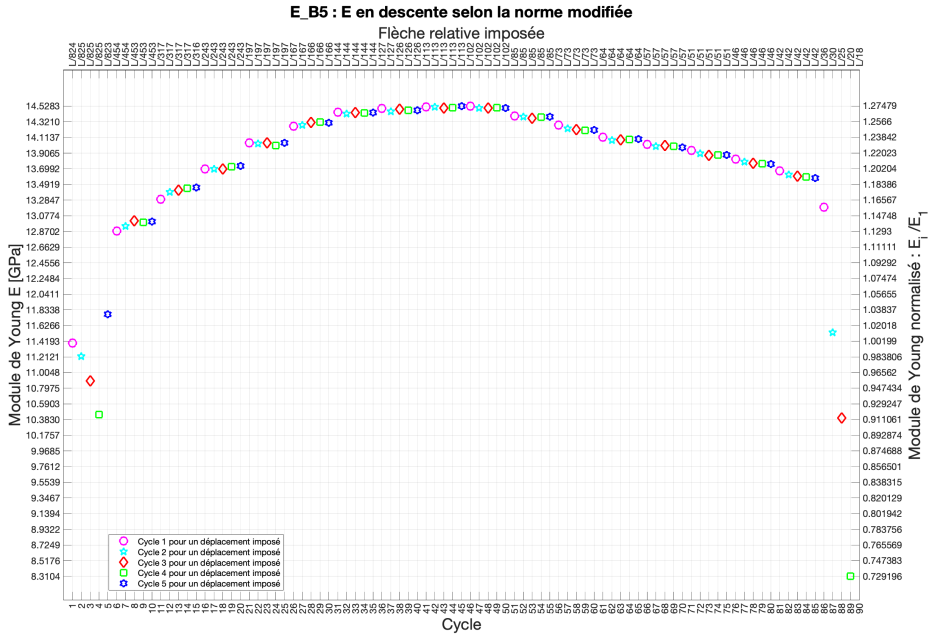


FIGURE M.407 – Module de Young en descente de l'éprouvette E_B5 de la batterie 5

Rigidité flexionnelle

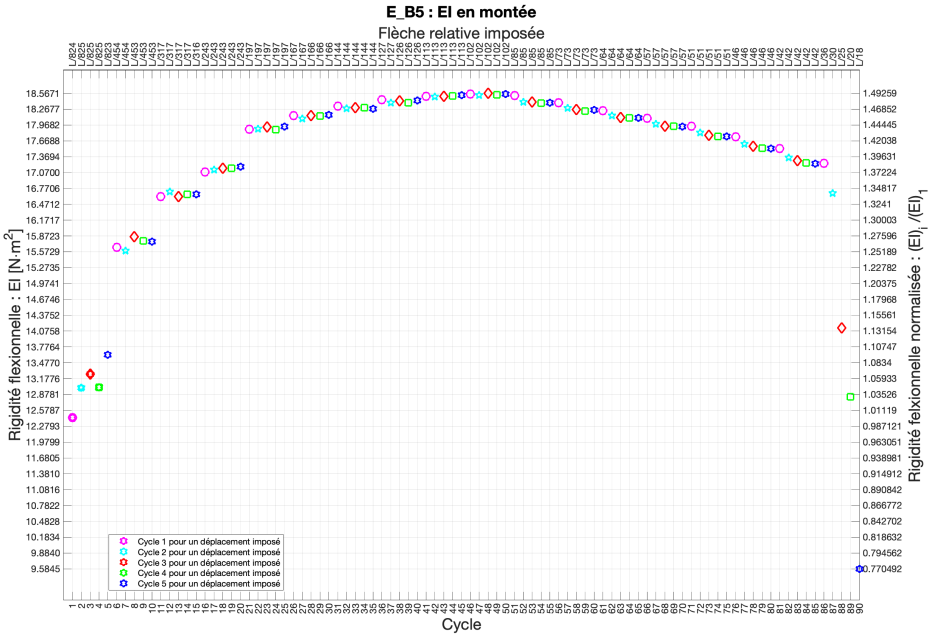


Figure M.408 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette E_B5 de la batterie 5

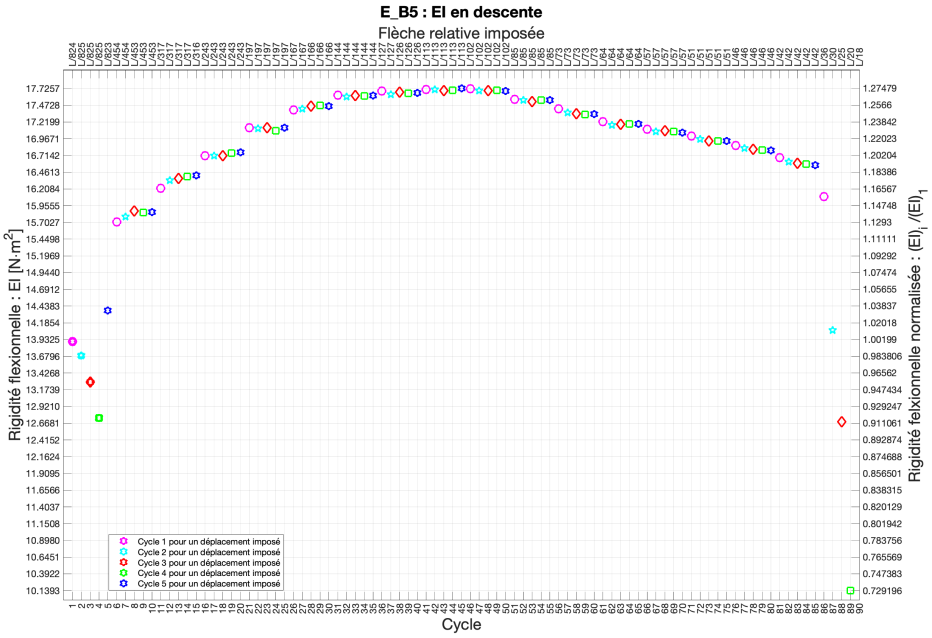


Figure M.409 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette E_B5 de la batterie 5

Fonction S

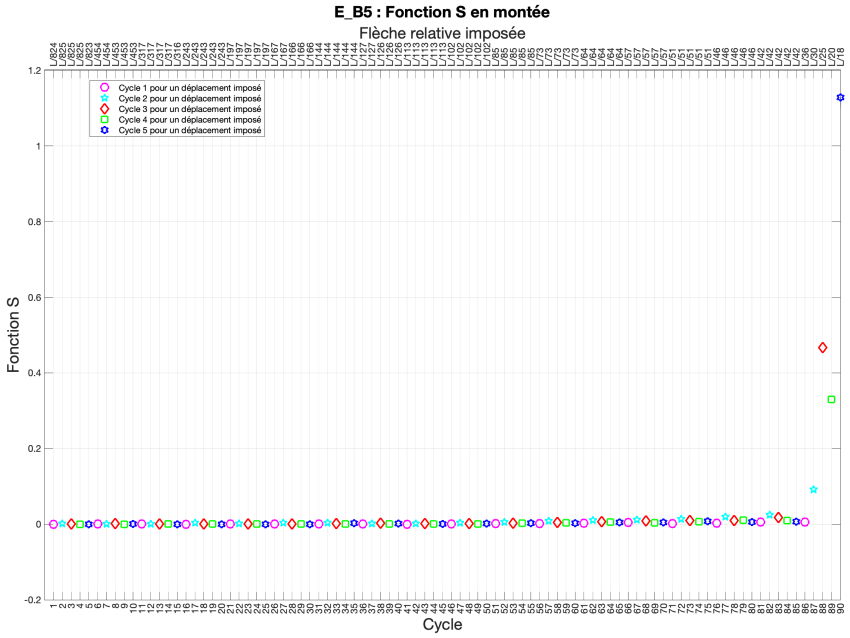


FIGURE M.410 – Fonction S en montée de l'éprouvette E_B5 de la batterie 5

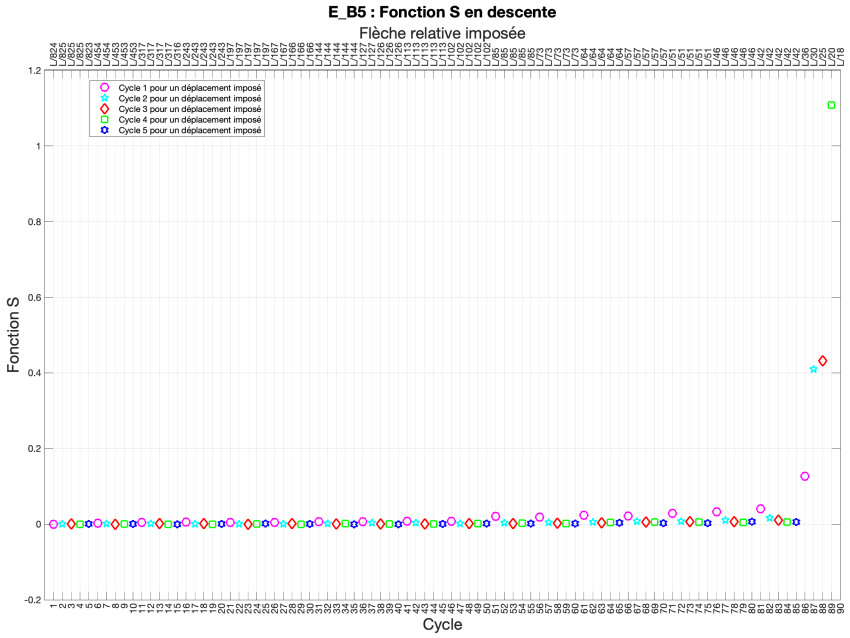


FIGURE M.411 – Fonction S en descente de l'éprouvette E_B5 de la batterie 5

Éprouvette E_C3

Global

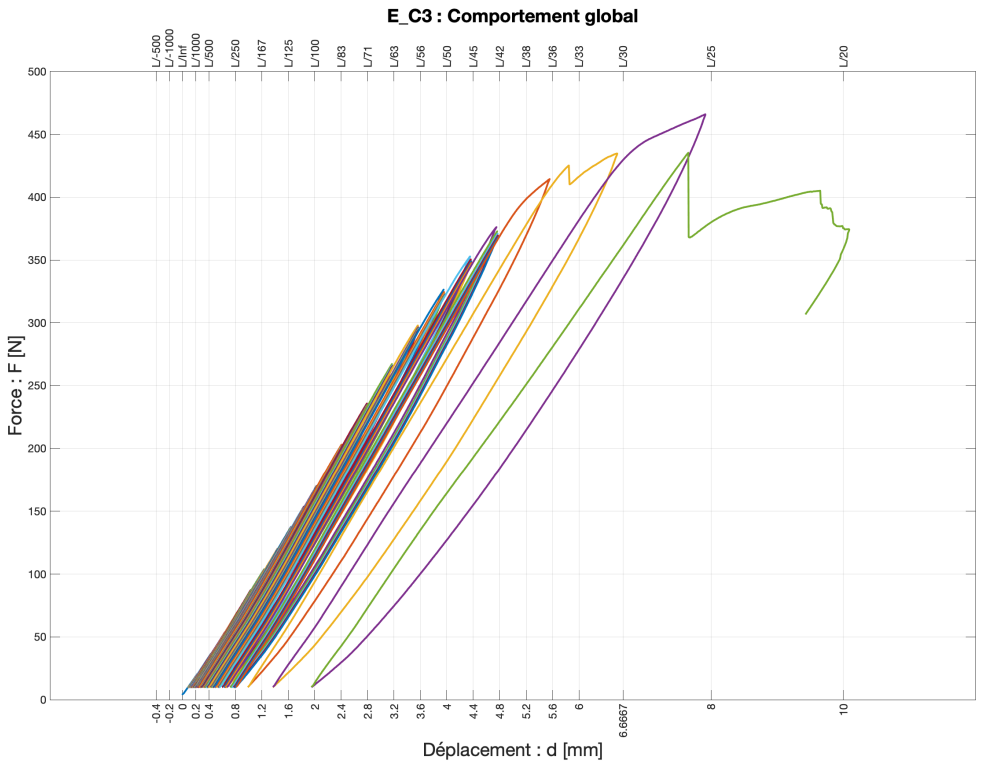


Figure M.412 – Comportement global de l'éprouvette E_C3 de la batterie 5

Déplacement résiduel

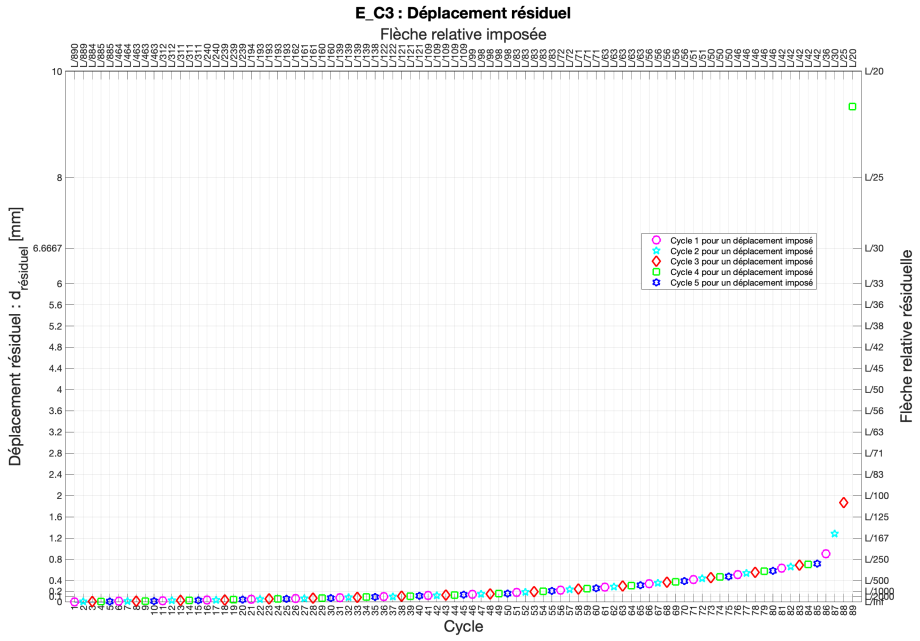


FIGURE M.413 – Déplacement résiduel de l'éprouvette E_C3 de la batterie 5

Force maximale

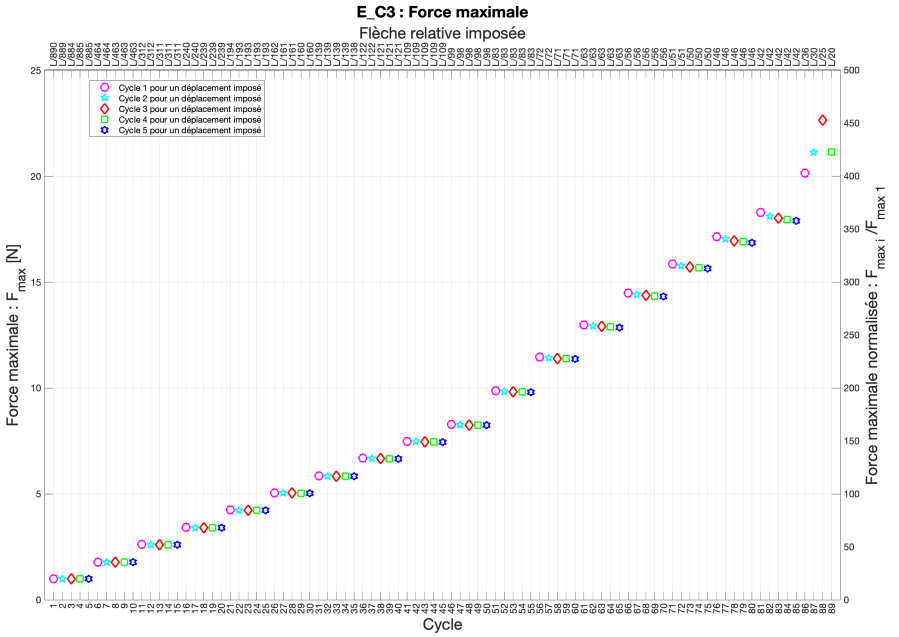


FIGURE M.414 – Force maximale de l'éprouvette E_C3 de la batterie 5

Module de Young

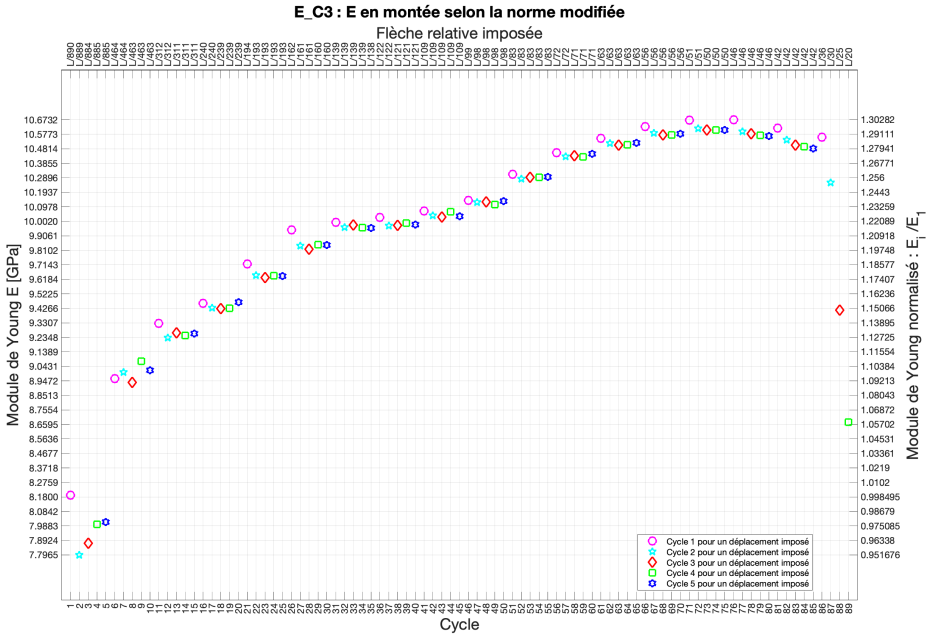


Figure M.415 – Module de Young en montée de l'éprouvette E_C3 de la batterie 5

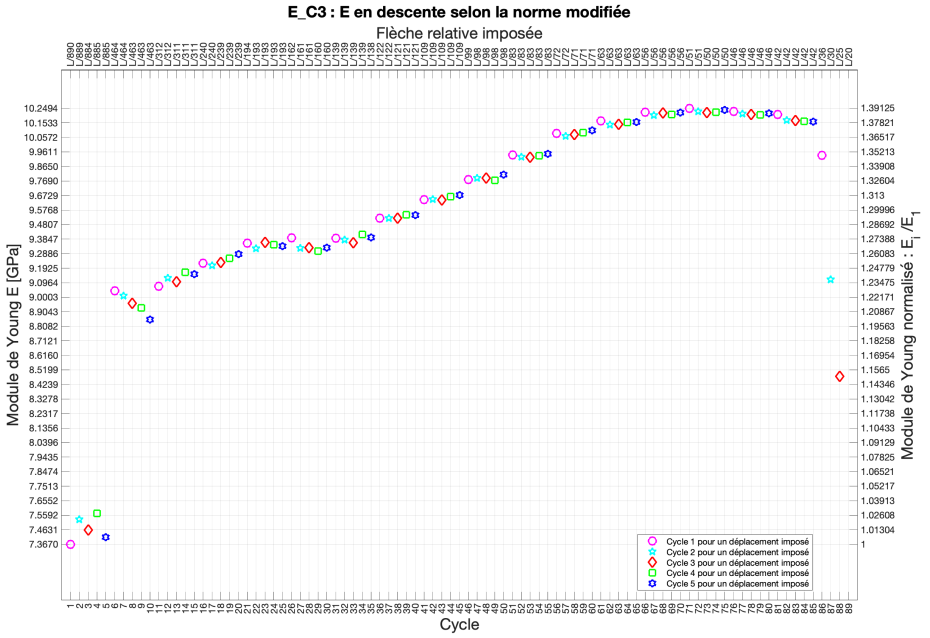


Figure M.416 – Module de Young en descente de l'éprouvette E_C3 de la batterie 5

Rigidité flexionnelle

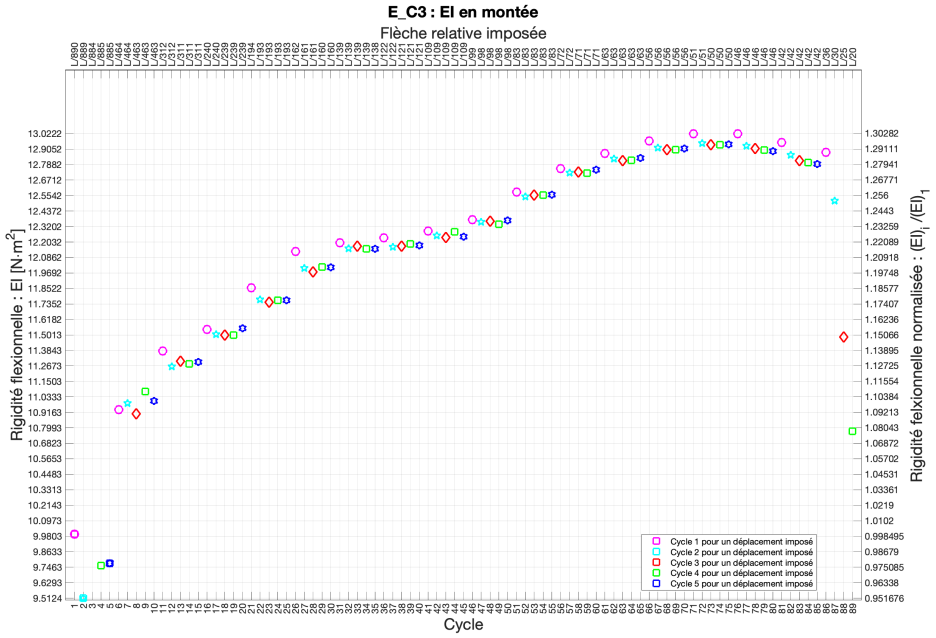


FIGURE M.417 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette E_C3 de la batterie 5

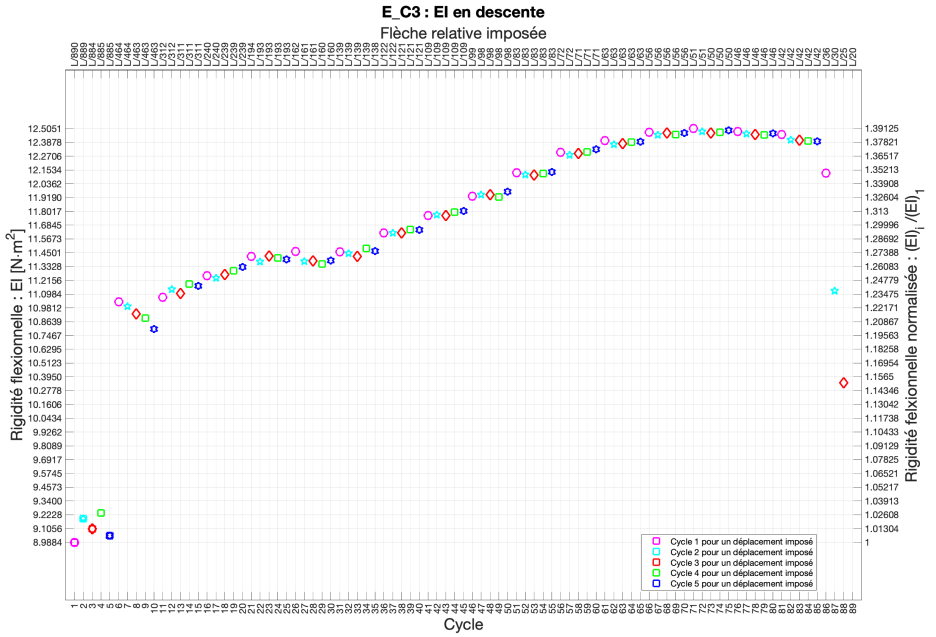


FIGURE M.418 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette E_C3 de la batterie 5

Fonction S

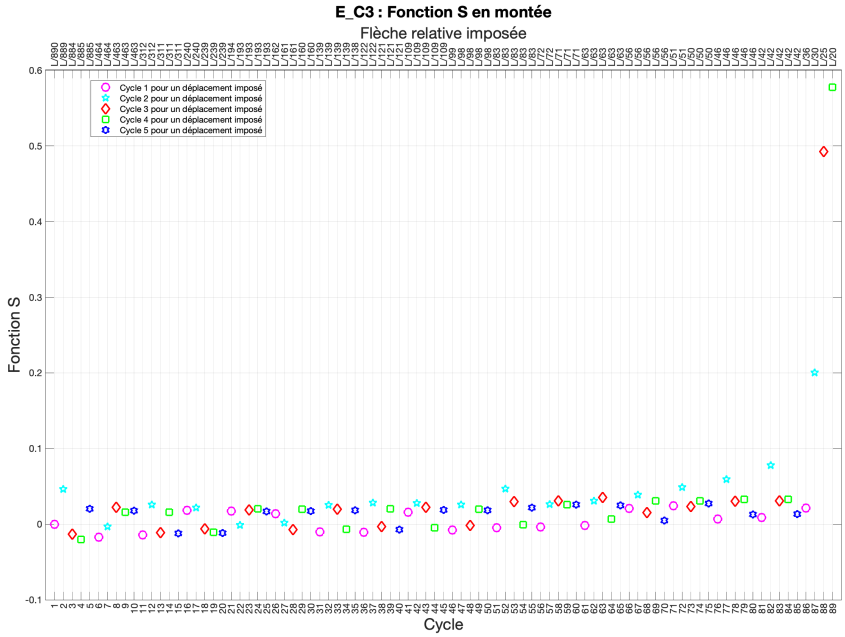


Figure M.419 – Fonction S en montée de l'éprouvette E_C3 de la batterie 5

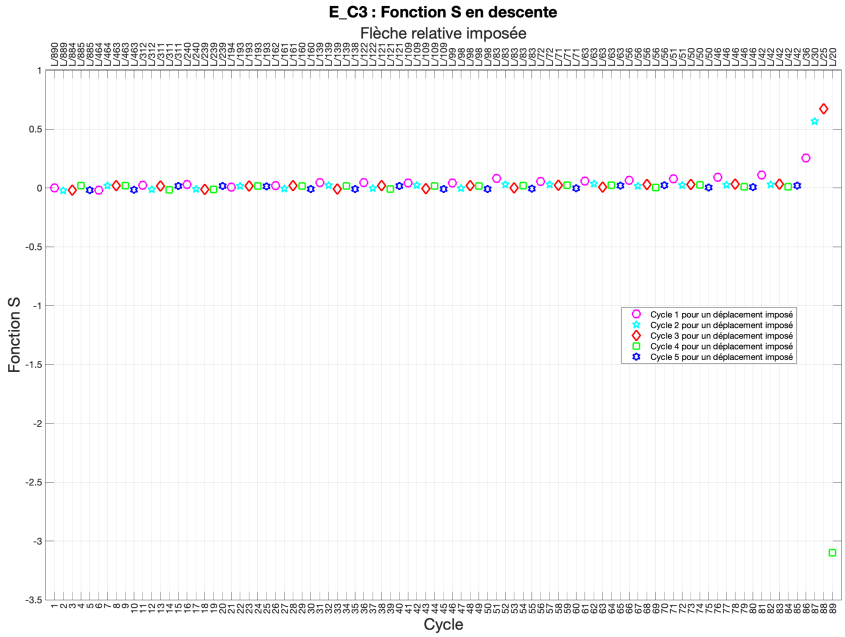


Figure M.420 – Fonction S en descente de l'éprouvette E_C3 de la batterie 5

Éprouvette E_C4

Global

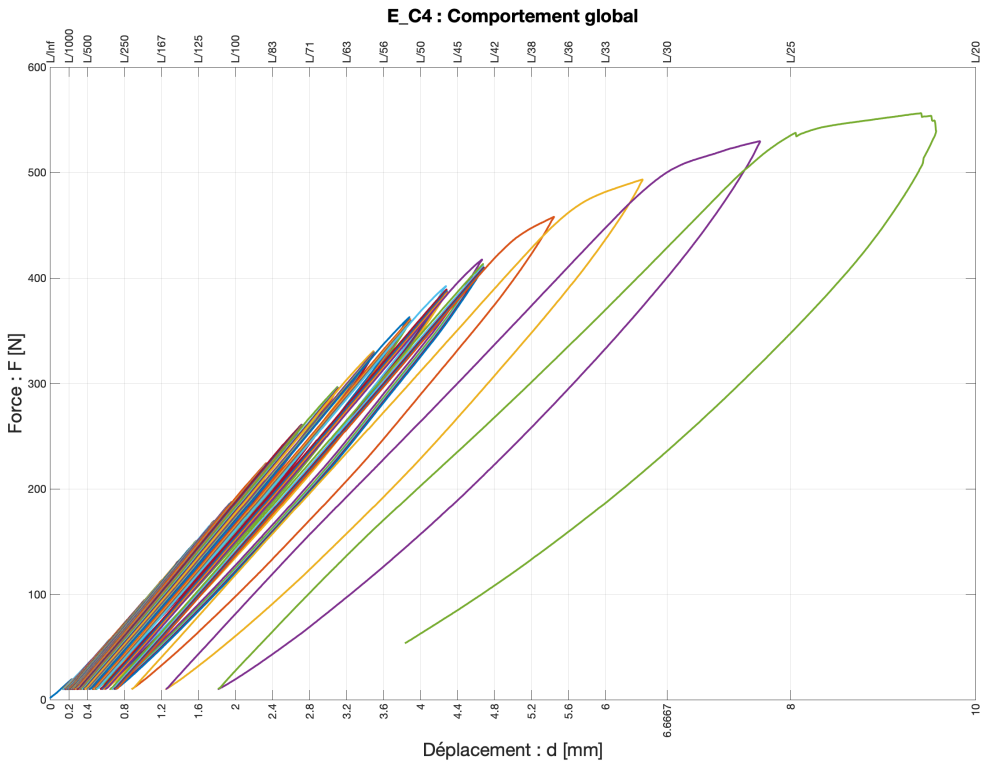


FIGURE M.421 – Comportement global de l'éprouvette E_C4 de la batterie 5

Déplacement résiduel

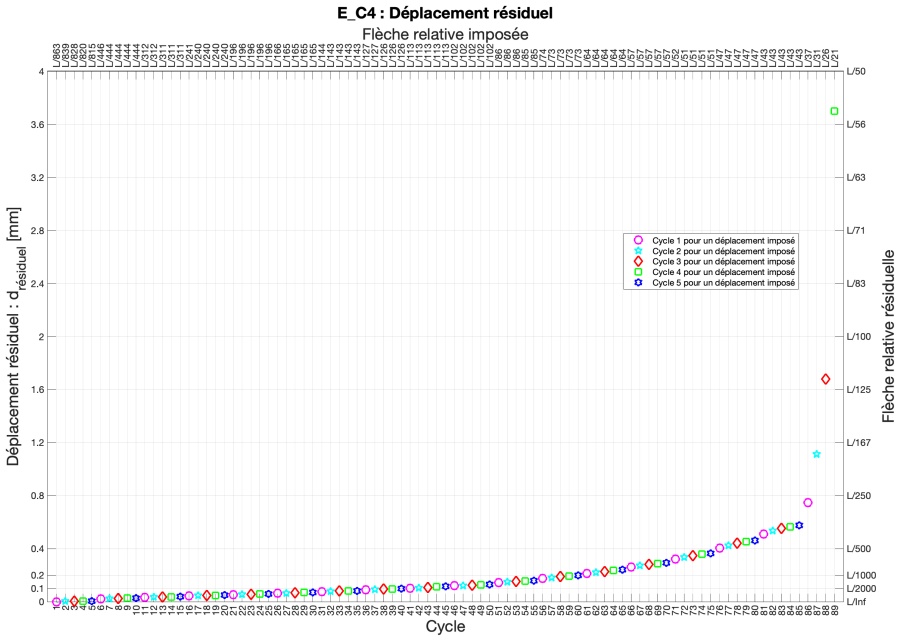


Figure M.422 – Déplacement résiduel de l'éprouvette E_C4 de la batterie 5

Force maximale

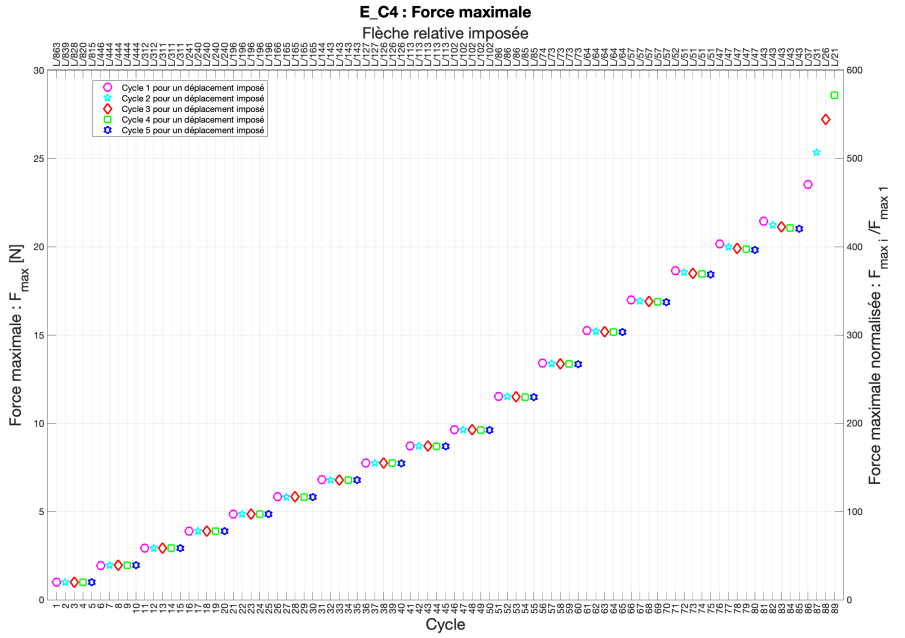


Figure M.423 – Force maximale de l'éprouvette E_C4 de la batterie 5

Module de Young

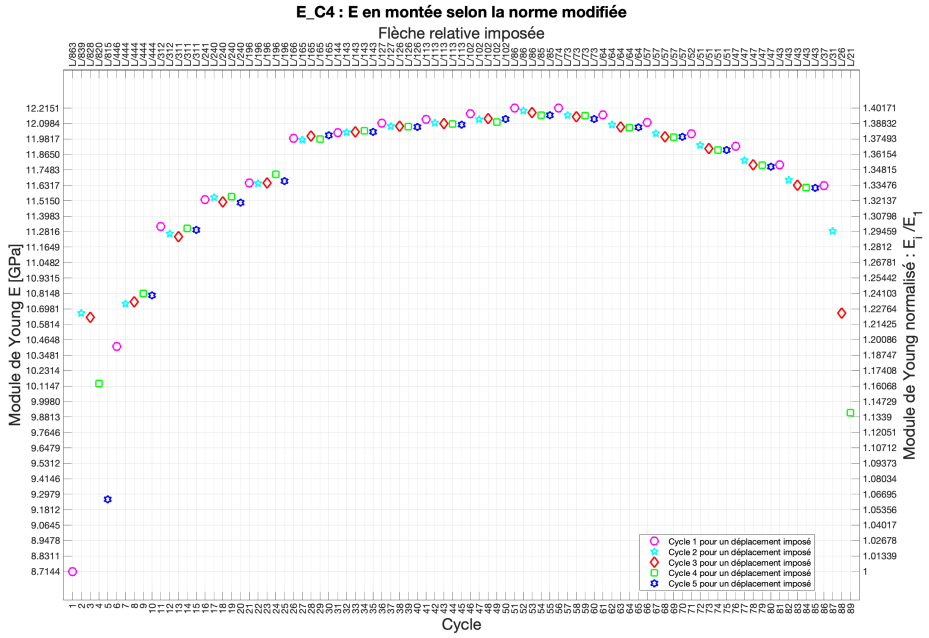


FIGURE M.424 – Module de Young en montée de l'éprouvette E_C4 de la batterie 5

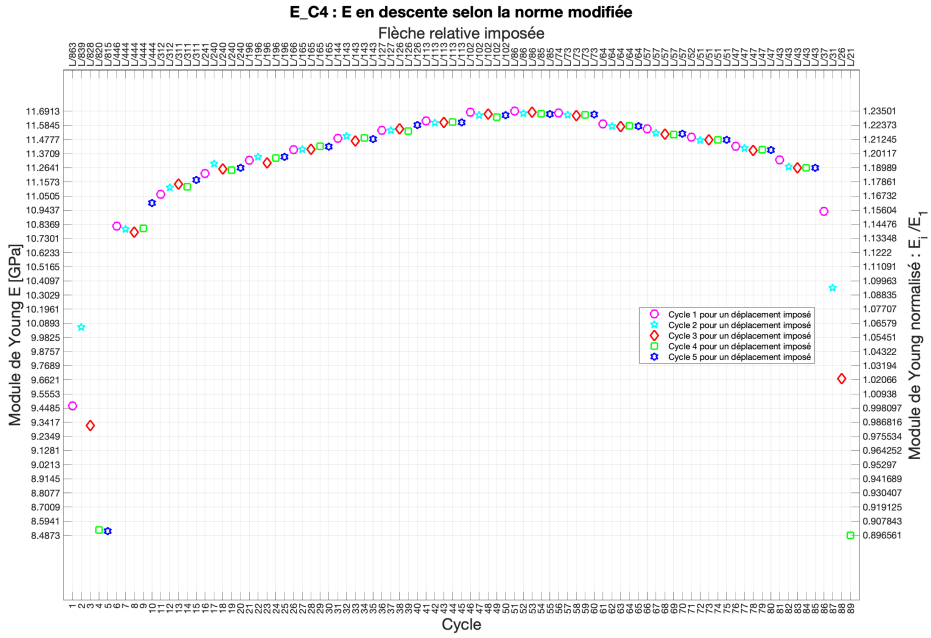


FIGURE M.425 – Module de Young en descente de l'éprouvette E_C4 de la batterie 5

Rigidité flexionnelle

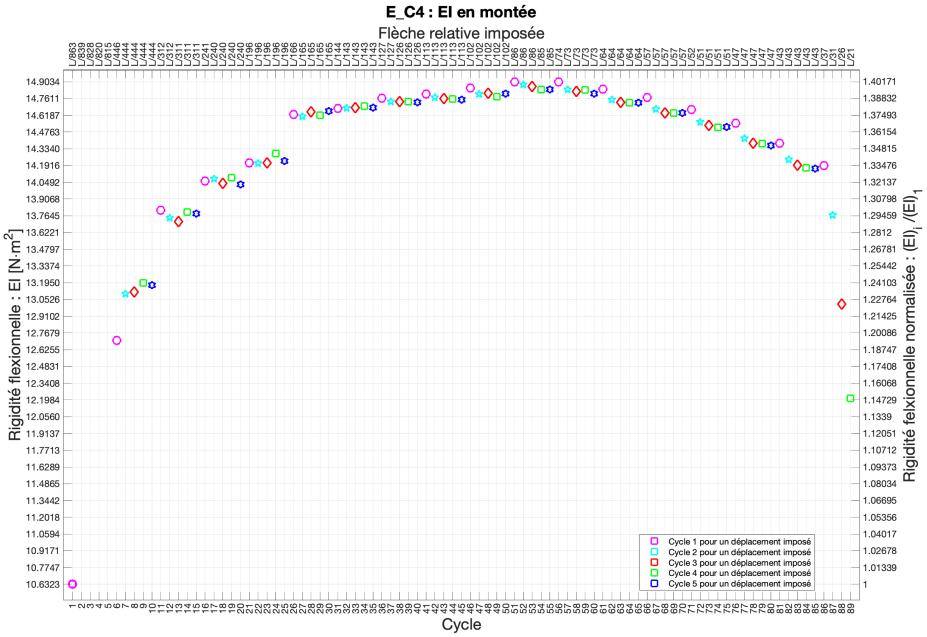


Figure M.426 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette E_C4 de la batterie 5

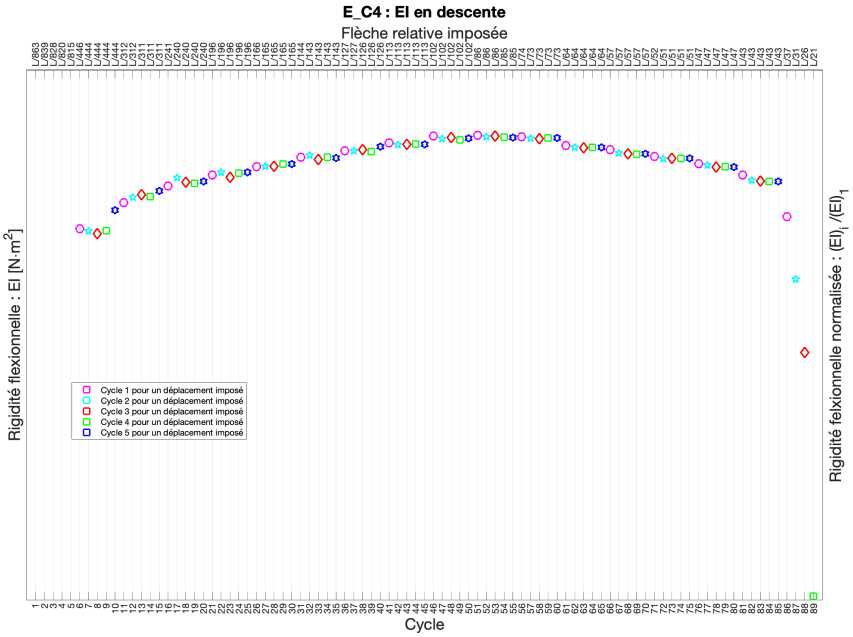


Figure M.427 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette E_C4 de la batterie 5

Fonction S

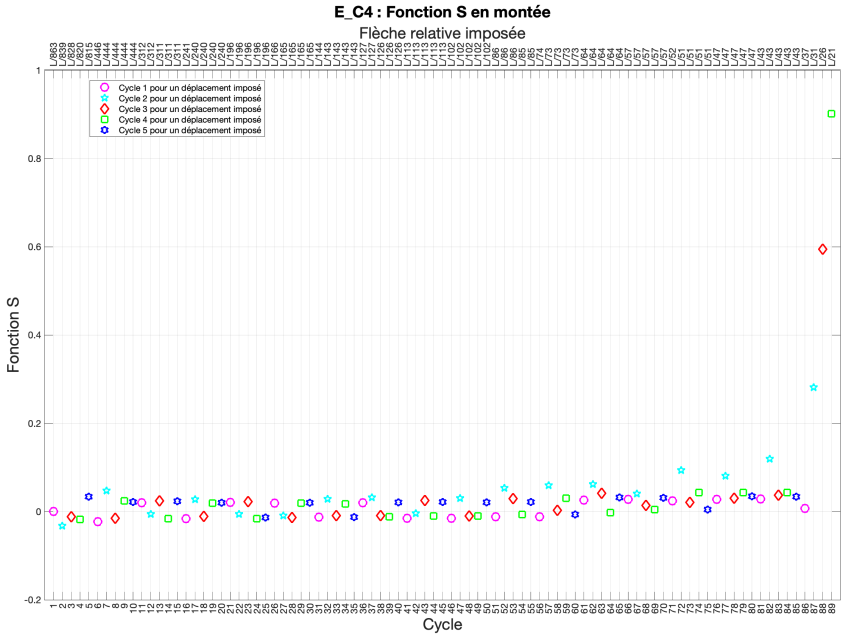


FIGURE M.428 – Fonction S en montée de l'éprouvette E_C4 de la batterie 5

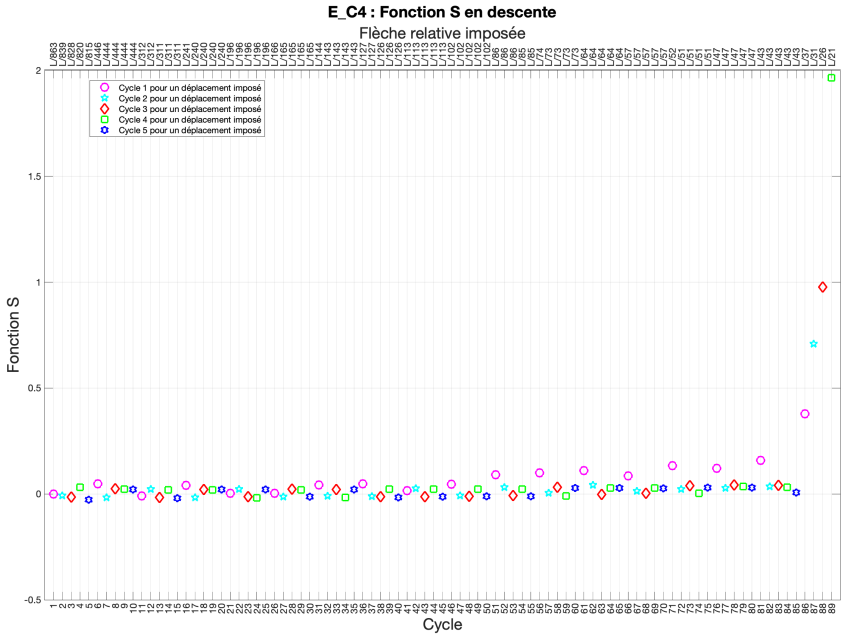


FIGURE M.429 – Fonction S en descente de l'éprouvette E_C4 de la batterie 5

Éprouvette E_C5

Global

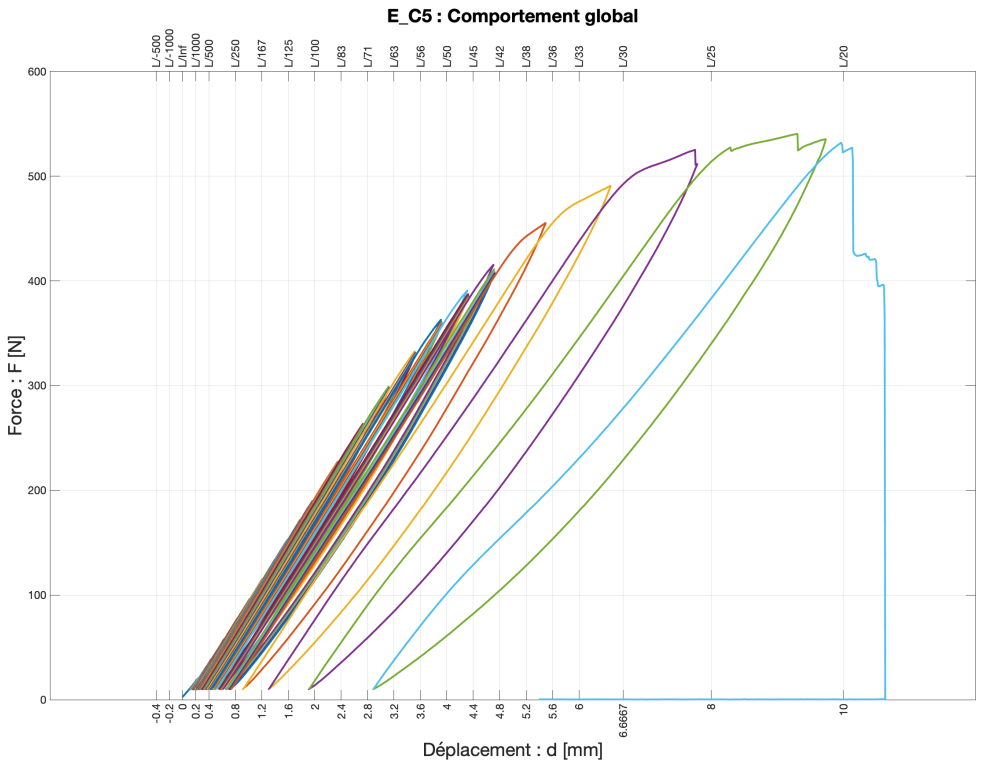


Figure M.430 – Comportement global de l'éprouvette E_C5 de la batterie 5

Déplacement résiduel

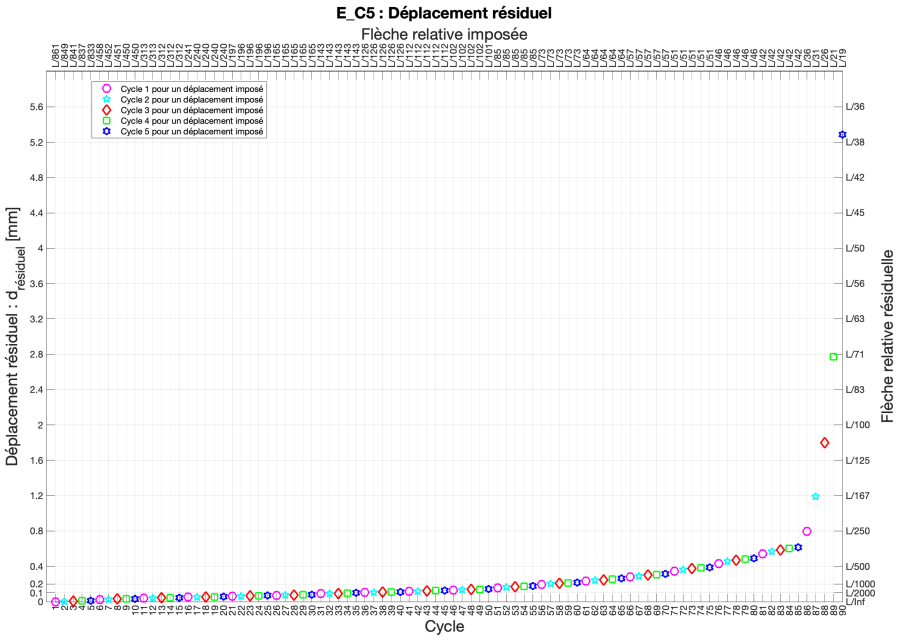


FIGURE M.431 – Déplacement résiduel de l'éprouvette E_C5 de la batterie 5

Force maximale

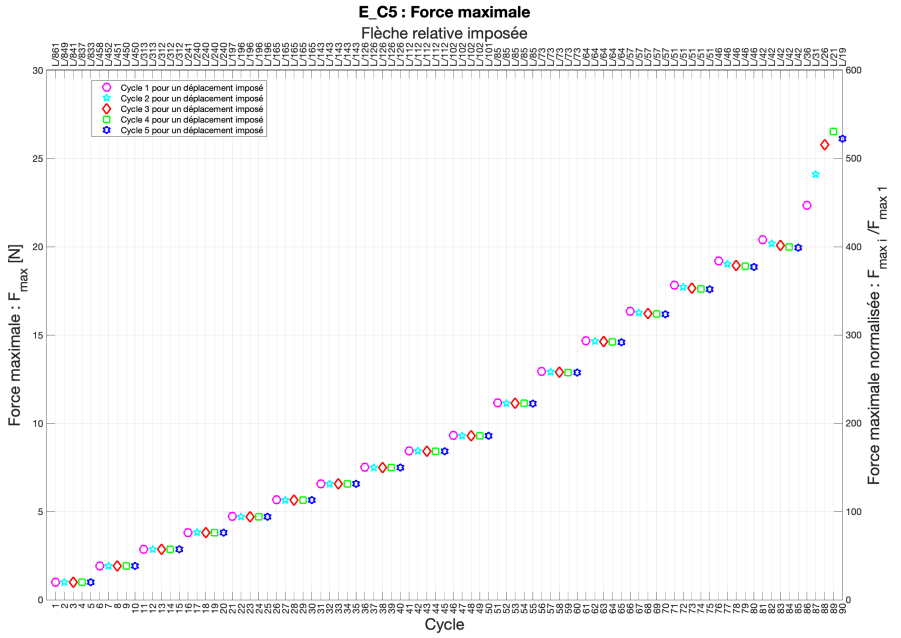


FIGURE M.432 – Force maximale de l'éprouvette E_C5 de la batterie 5

Module de Young

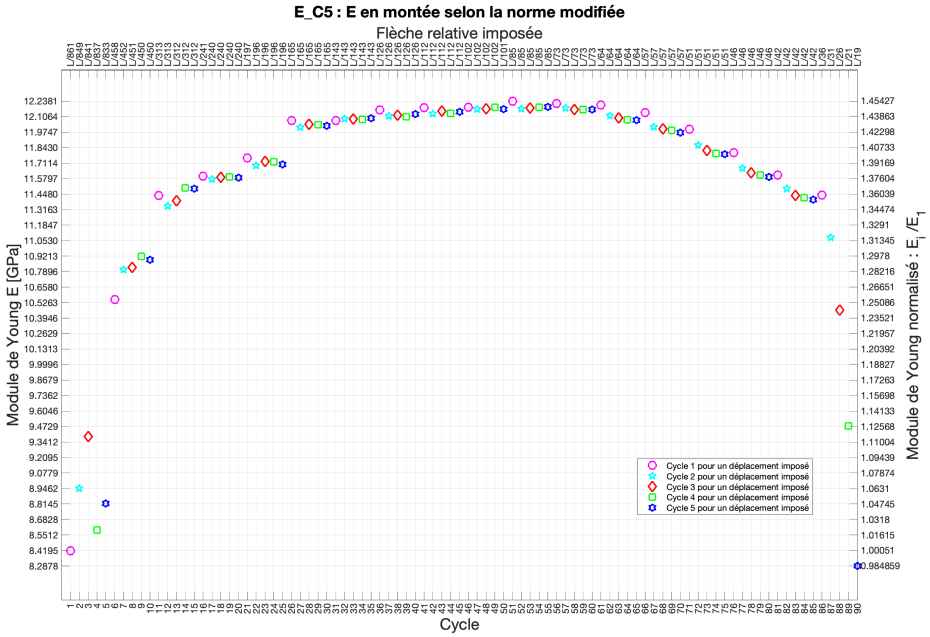


Figure M.433 – Module de Young en montée de l'éprouvette E_C5 de la batterie 5

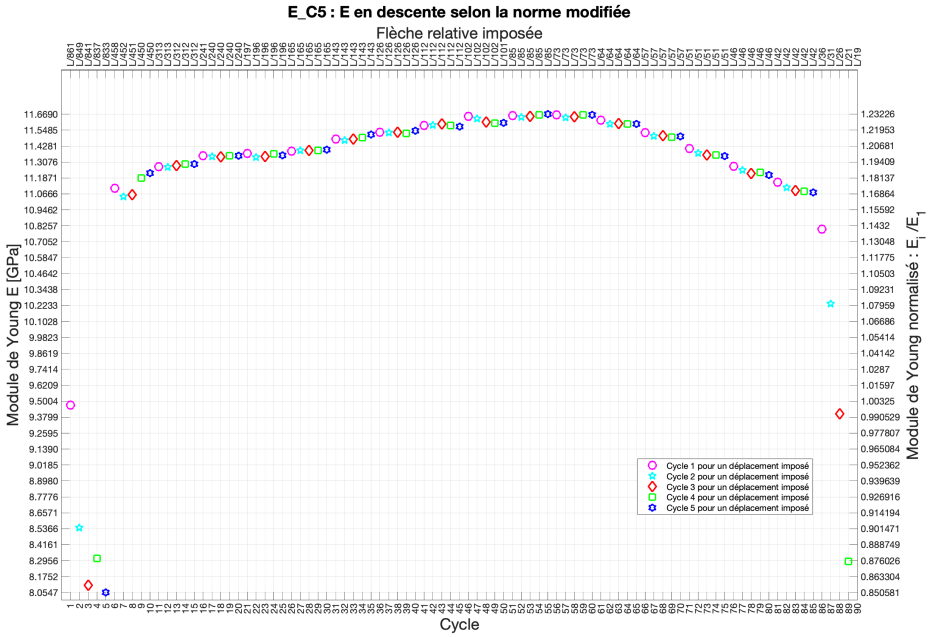


Figure M.434 – Module de Young en descente de l'éprouvette E_C5 de la batterie 5

Rigidité flexionnelle

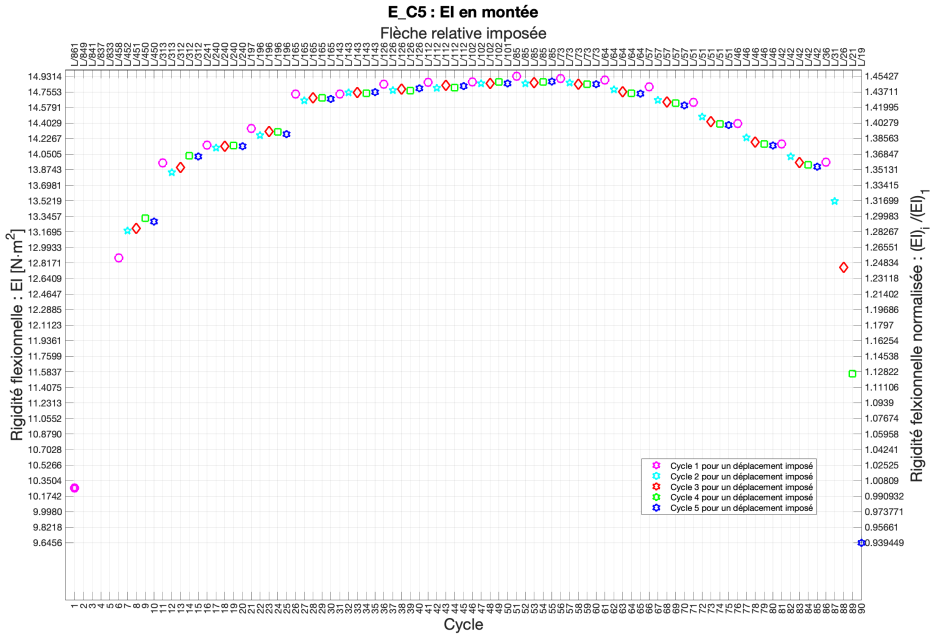


FIGURE M.435 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette E_C5 de la batterie 5

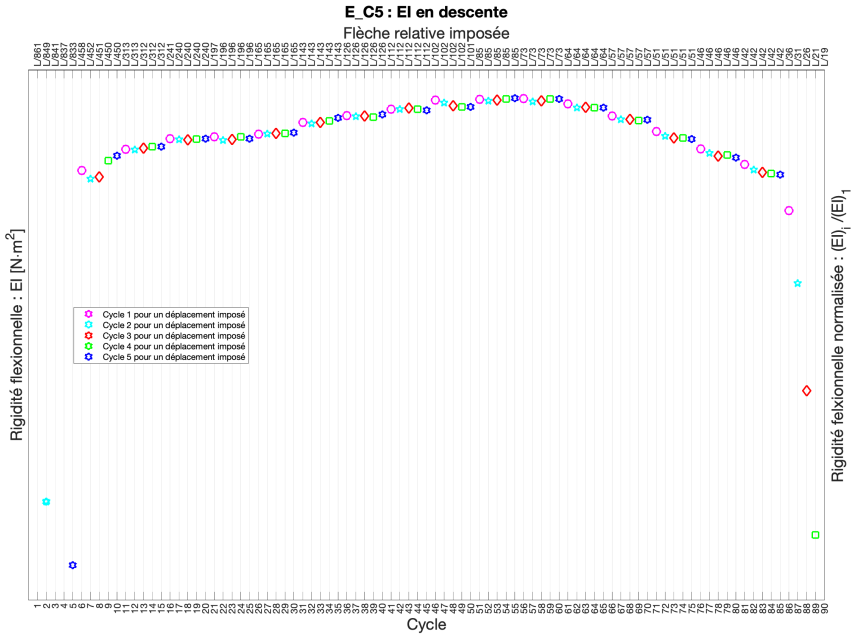


FIGURE M.436 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette E_C5 de la batterie 5

Fonction S

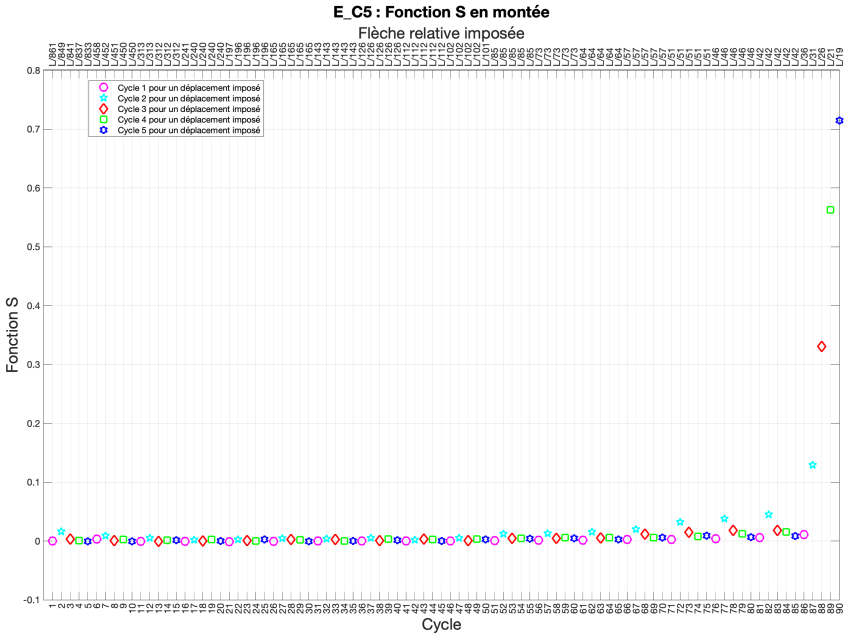


Figure M.437 – Fonction S en montée de l'éprouvette E_C5 de la batterie 5

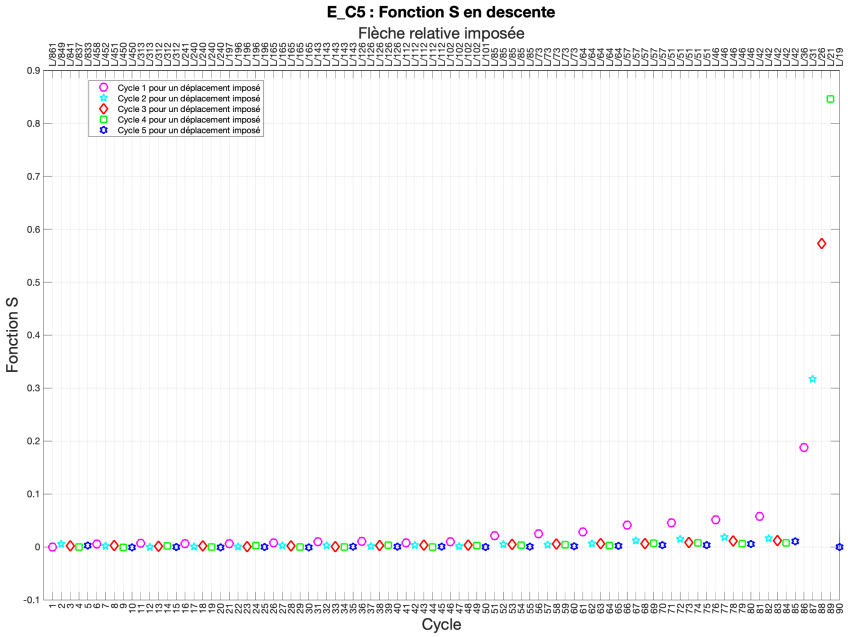


Figure M.438 – Fonction S en descente de l'éprouvette E_C5 de la batterie 5

M.6 Batterie 6 : Chargement statique : ZwickRoell

Éprouvette F_A2_1

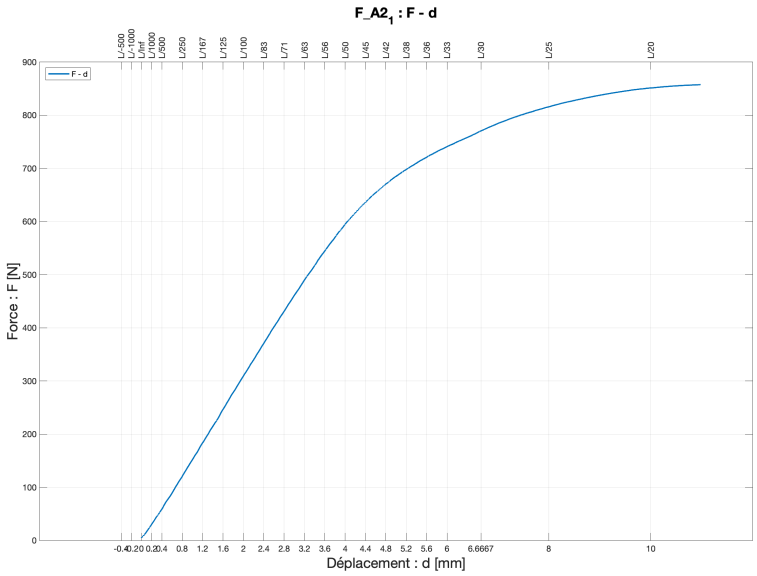


FIGURE M.439 – Comportement global de l'éprouvette F_A2_1 de la batterie 6

Éprouvette F_A3_1

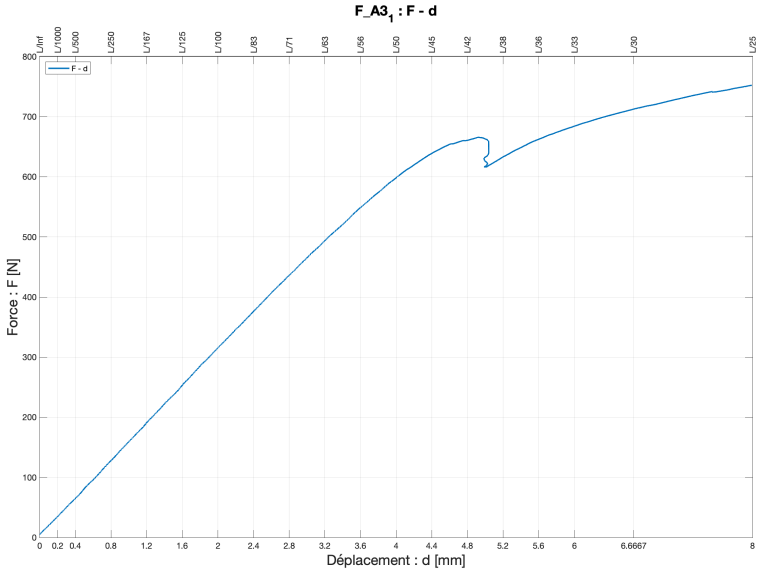


FIGURE M.440 – Comportement global de l'éprouvette F_A3_1 de la batterie 6

Éprouvette F_B2_1

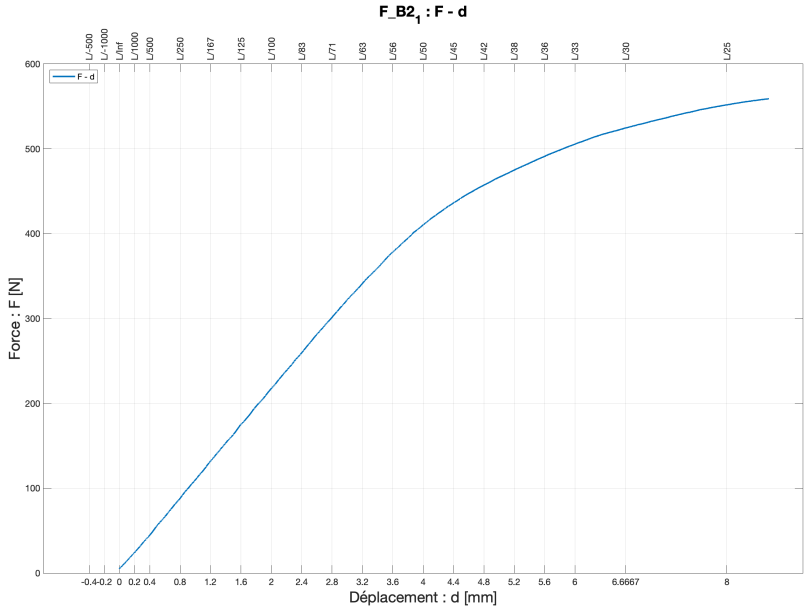


Figure M.441 – Comportement global de l'éprouvette F_B2_1 de la batterie 6

Éprouvette F_B2_2

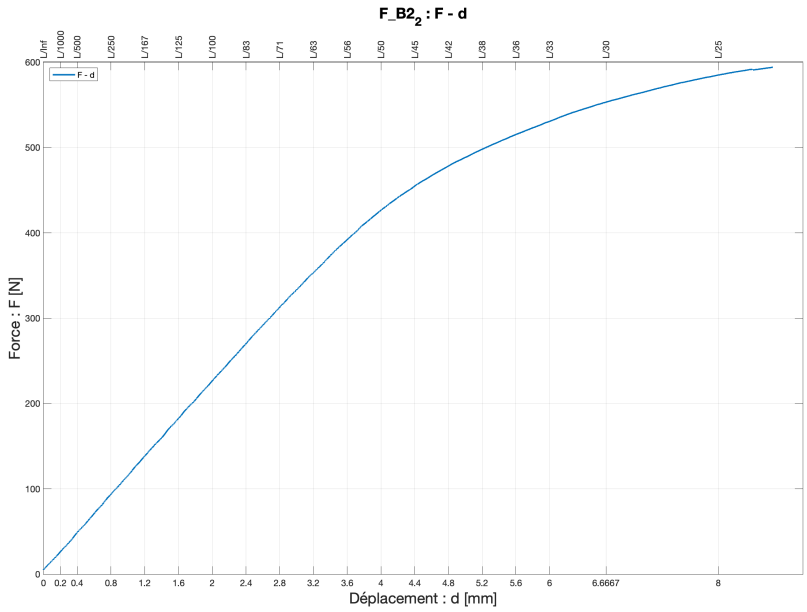


Figure M.442 – Comportement global de l'éprouvette F_B2_2 de la batterie 6

Éprouvette F_B6_1

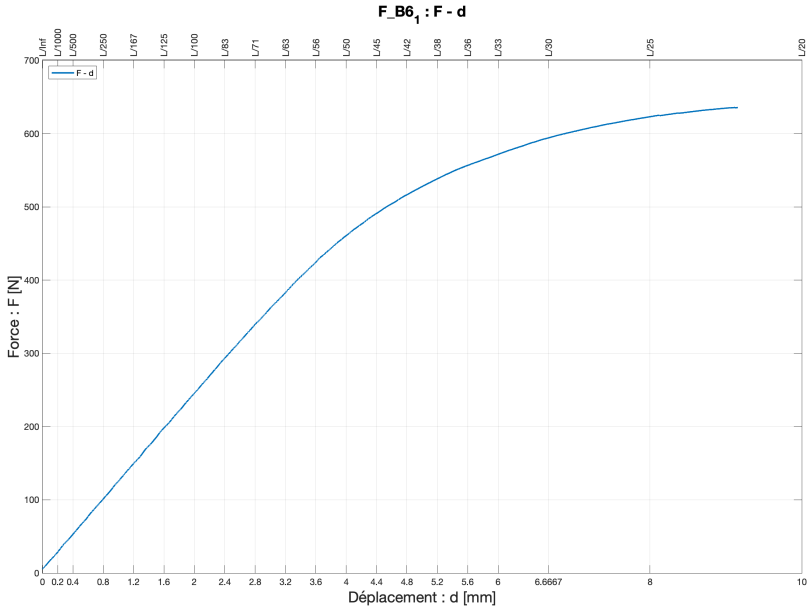


FIGURE M.443 – Comportement global de l'éprouvette F_B6_1 de la batterie 6

Éprouvette F_C1_1

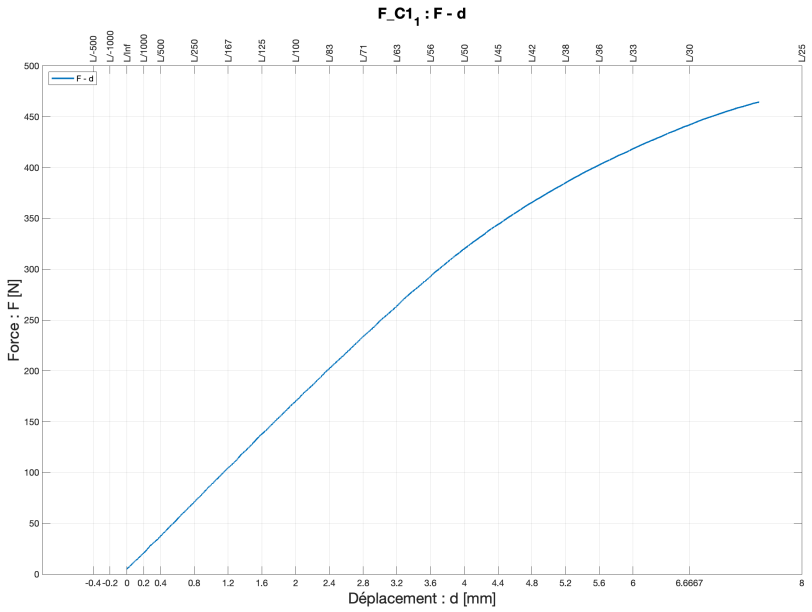


FIGURE M.444 – Comportement global de l'éprouvette F_C1_1 de la batterie 6

Éprouvette F_C2_1

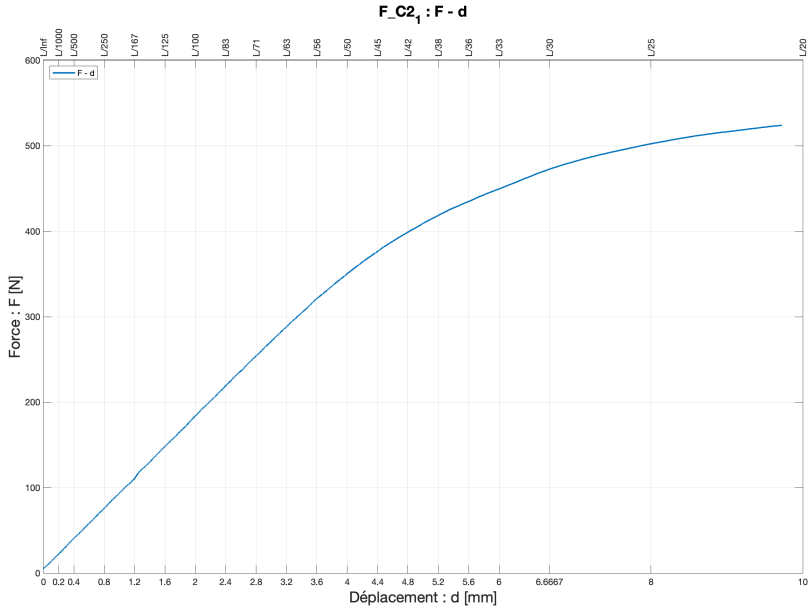


Figure M.445 – Comportement global de l'éprouvette F_C2_1 de la batterie 6

Éprouvette F_C2_2

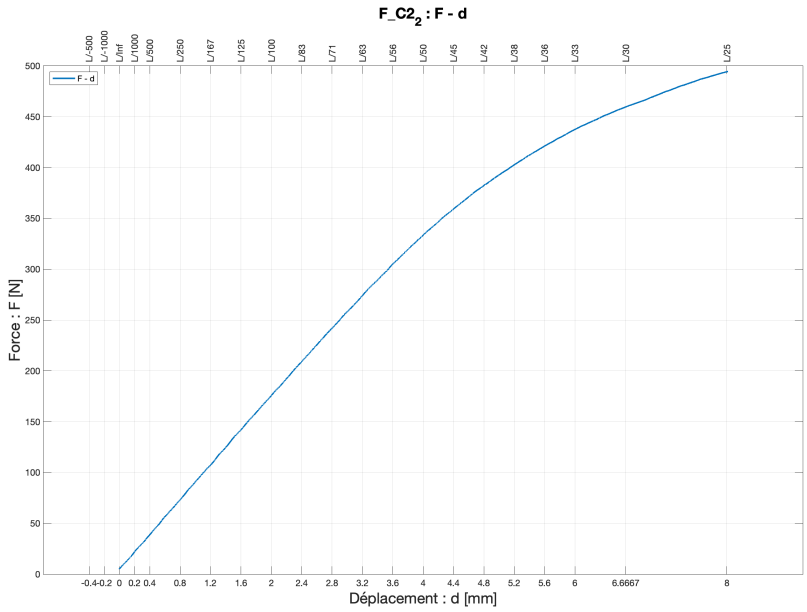


Figure M.446 – Comportement global de l'éprouvette F_C2_2 de la batterie 6

Éprouvette F_C6_1

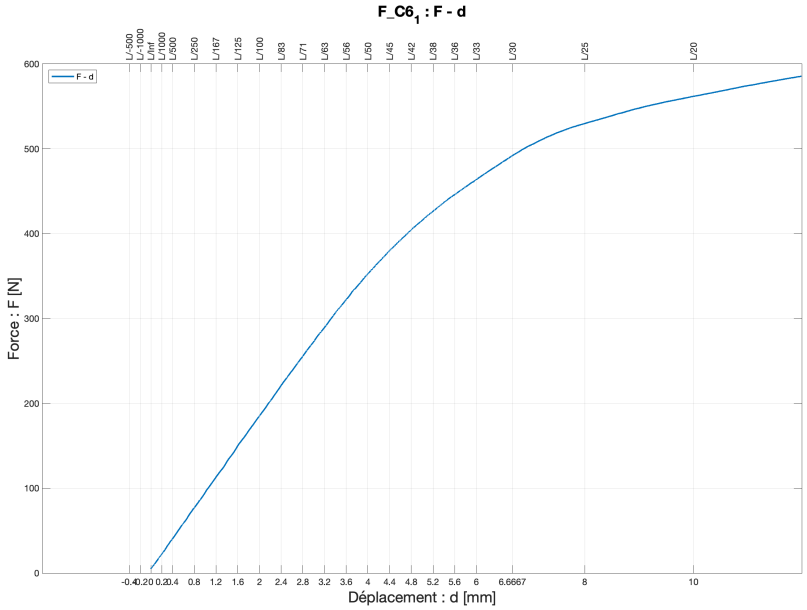


FIGURE M.447 – Comportement global de l'éprouvette F_C6_1 de la batterie 6

Éprouvette F_C6_2

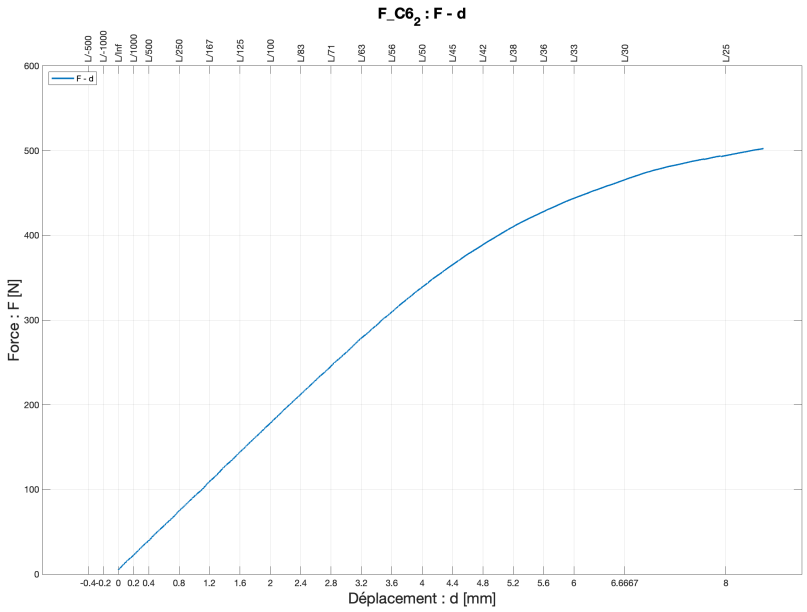


FIGURE M.448 – Comportement global de l'éprouvette F_C6_2 de la batterie 6

M.7 Batterie 7 : Protocole potentiel et délai entre deux cycles

Éprouvette G_A4_dt000

Global

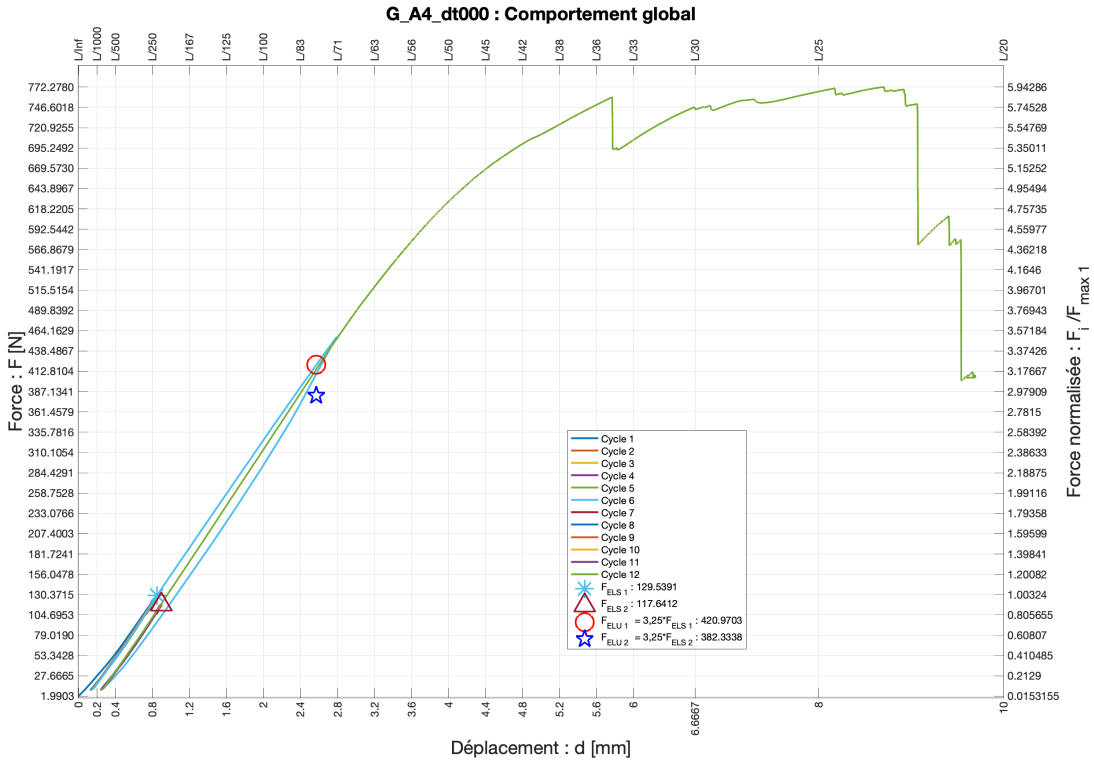


Figure M.449 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_A4_dt000 de la batterie 7

Déplacement résiduel

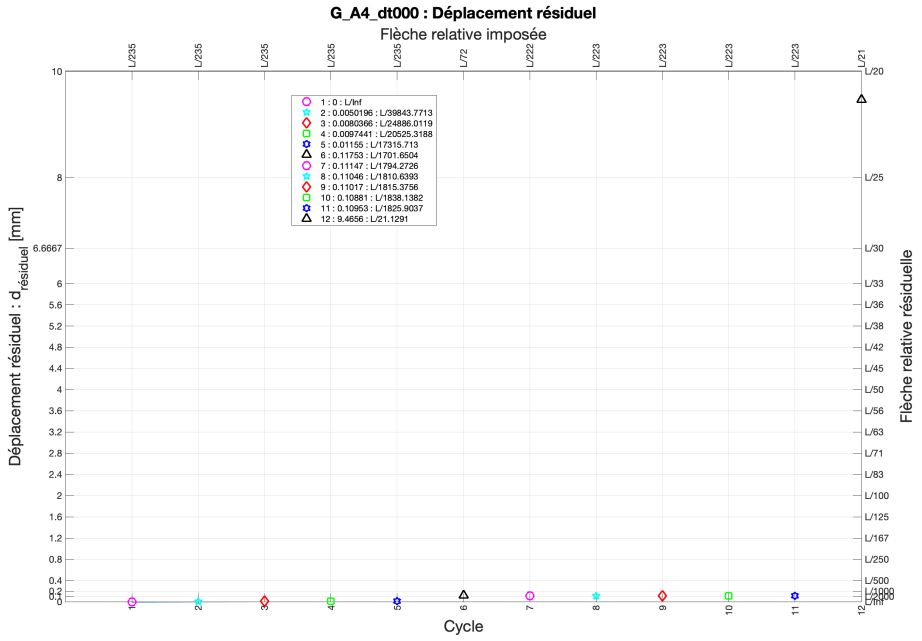


FIGURE M.450 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_A4_dt000 de la batterie 7

Force maximale

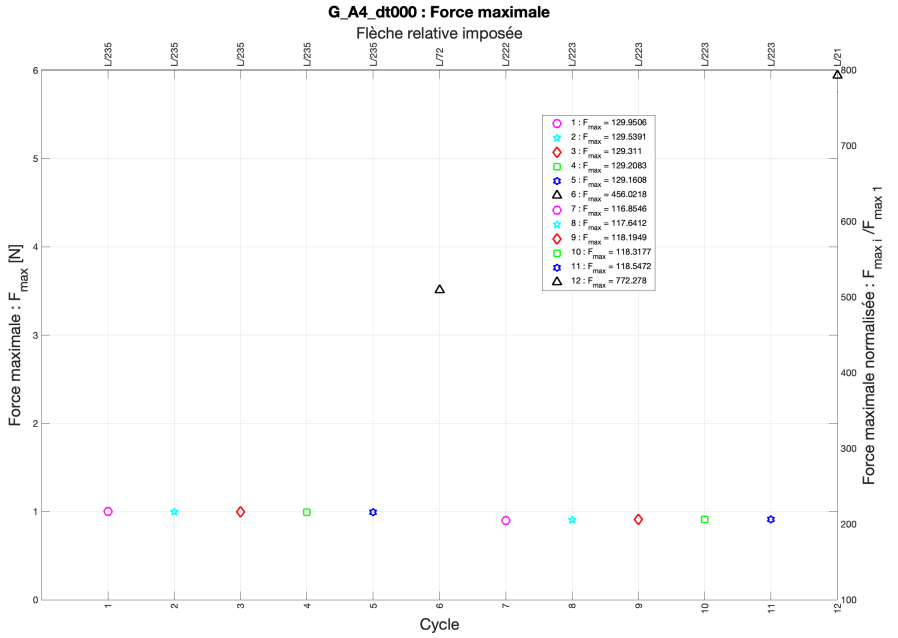


FIGURE M.451 – Force maximale de l'éprouvette G_A4_dt000 de la batterie 7

Module de Young

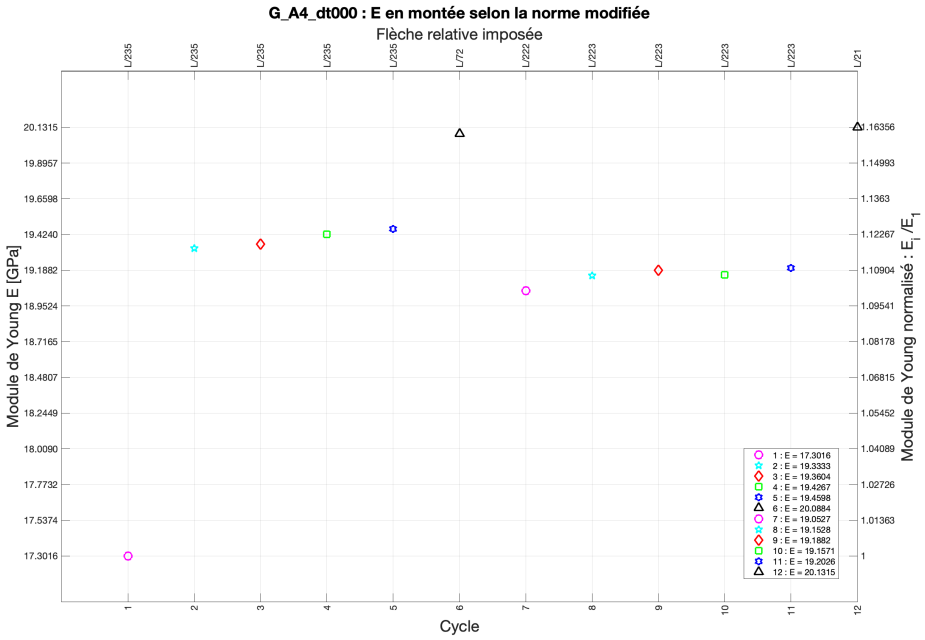


Figure M.452 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_A4_dt000 de la batterie 7

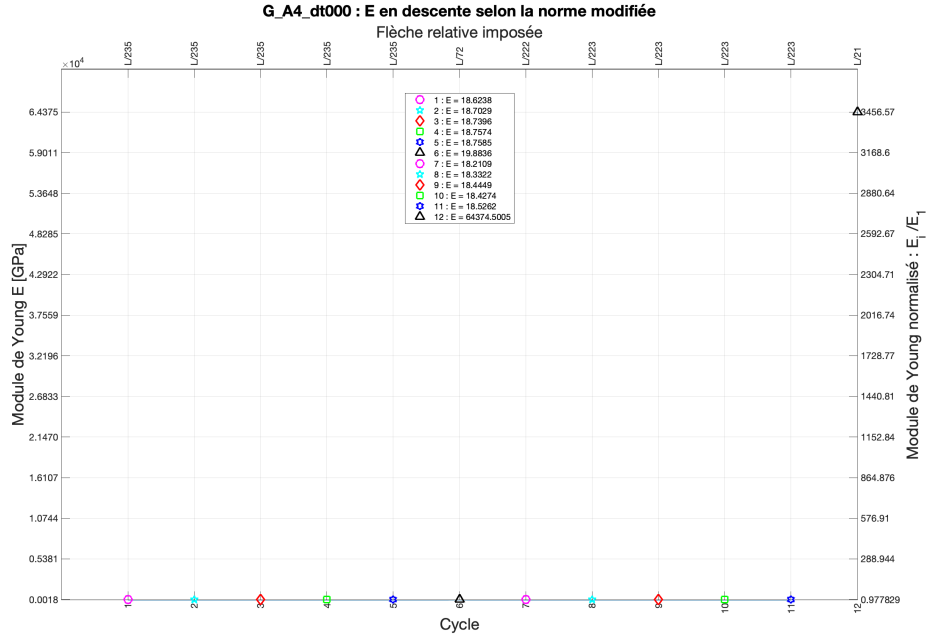


Figure M.453 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_A4_dt000 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

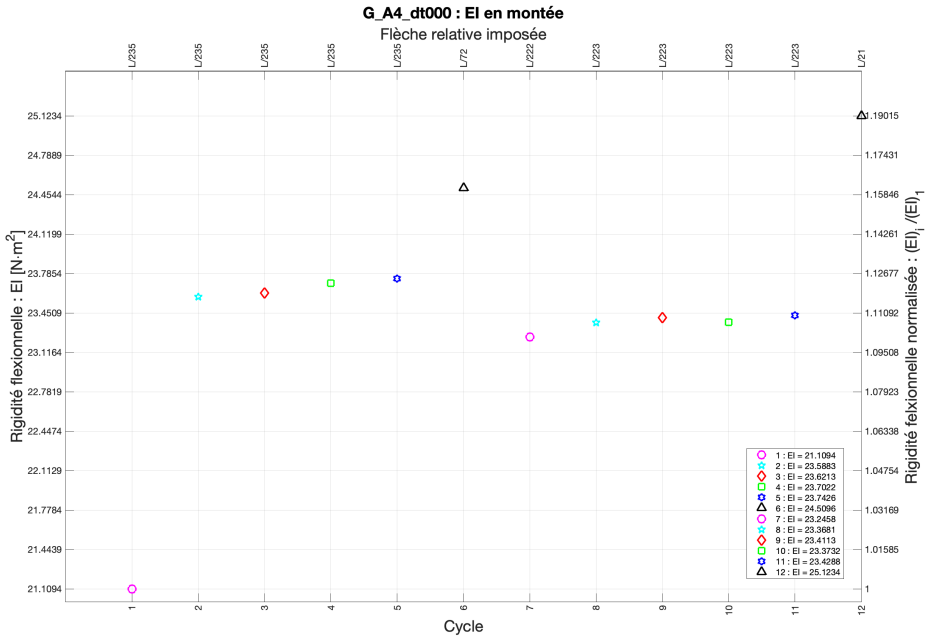


FIGURE M.454 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_A4_dt000 de la batterie 7

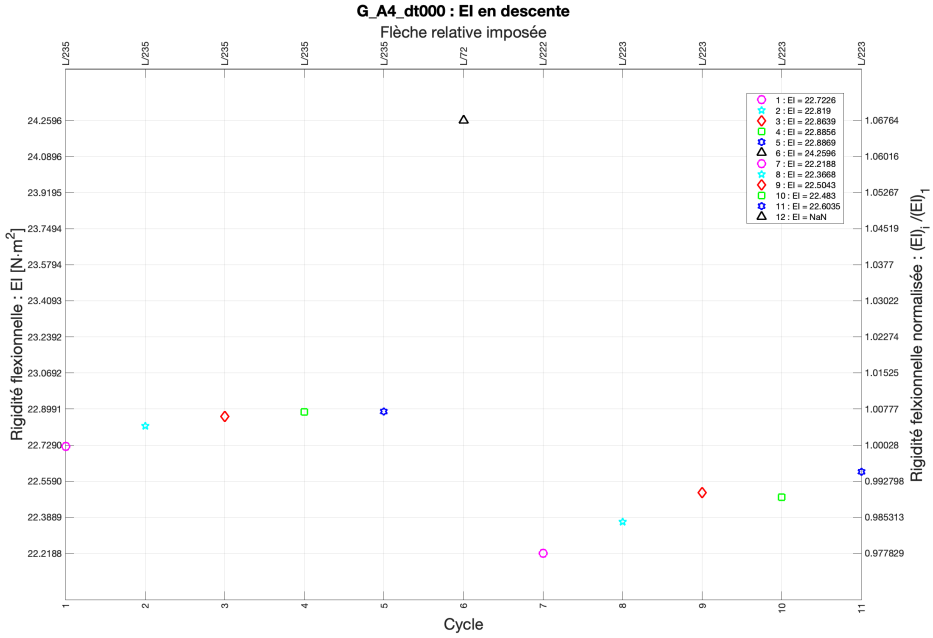


FIGURE M.455 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_A4_dt000 de la batterie 7

Fonction S

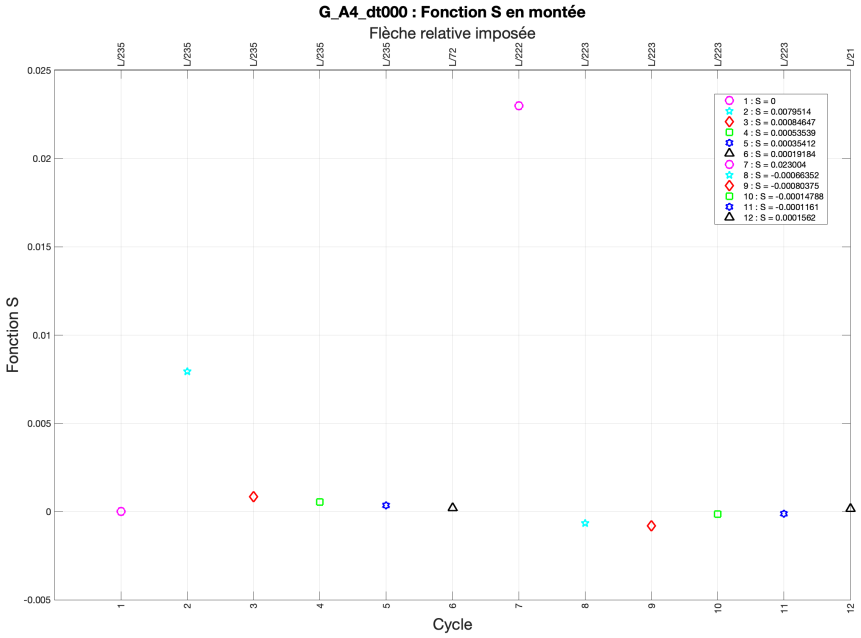


Figure M.456 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_A4_dt000 de la batterie 7

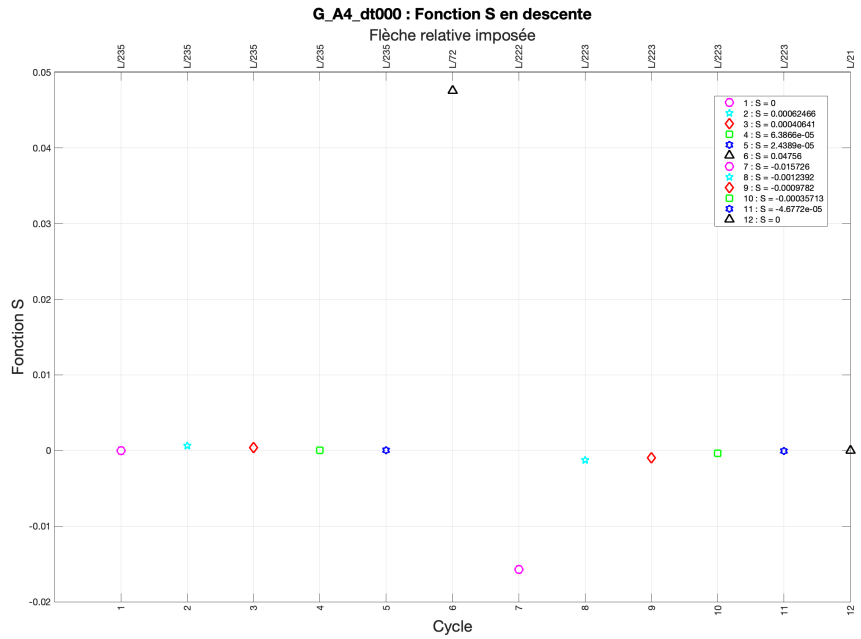


Figure M.457 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_A4_dt000 de la batterie 7

Éprouvette G_A4_dt300

Global

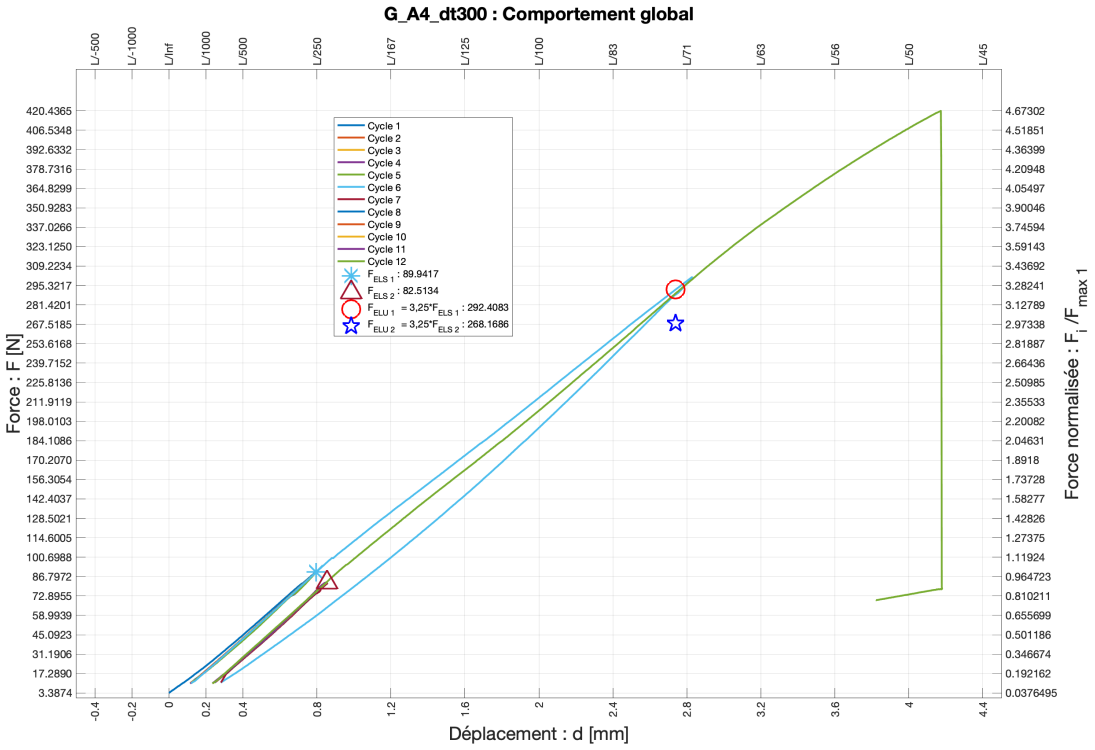


FIGURE M.458 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_A4_dt300 de la batterie 7

Déplacement résiduel

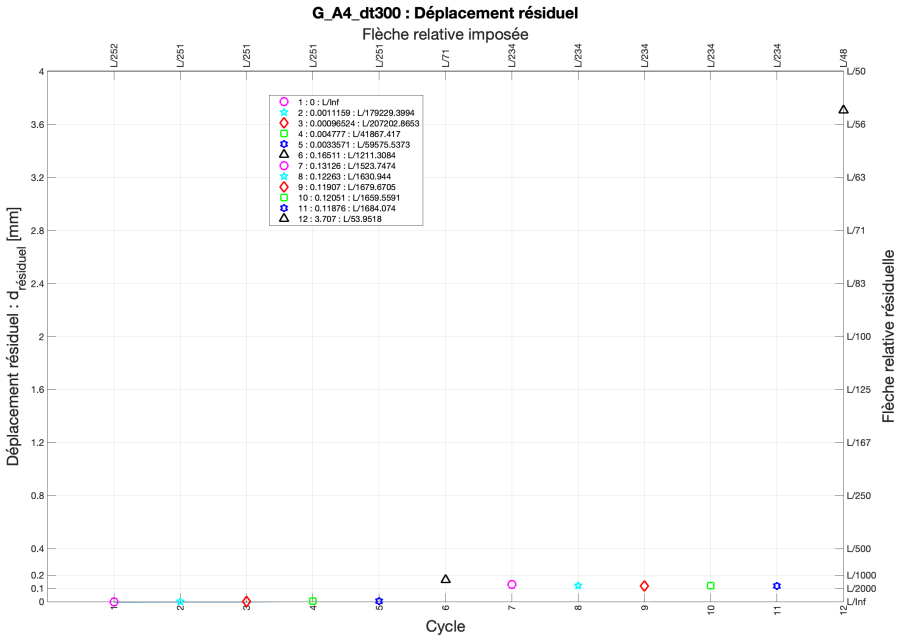


Figure M.459 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_A4_dt300 de la batterie 7

Force maximale

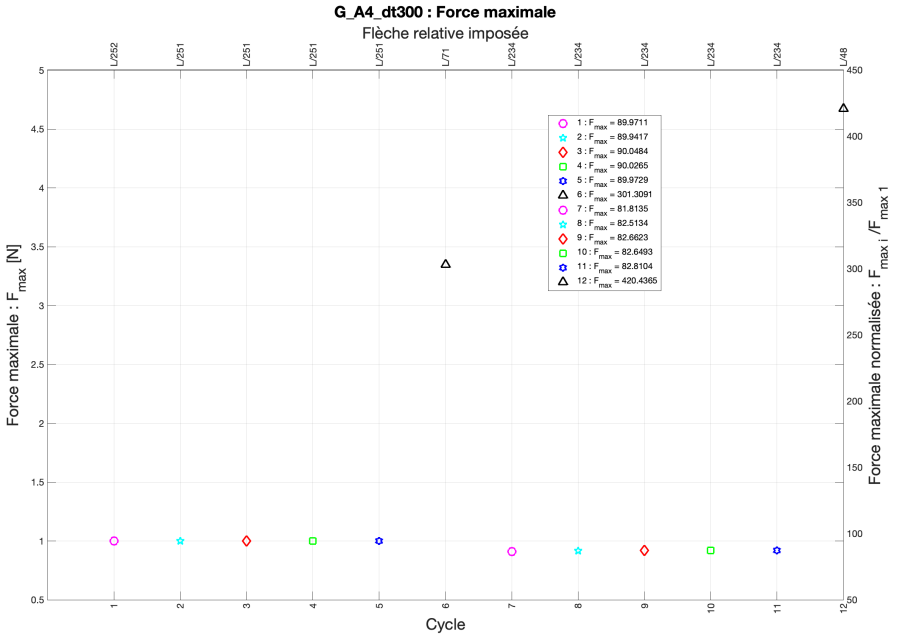


Figure M.460 – Force maximale de l'éprouvette G_A4_dt300 de la batterie 7

Module de Young

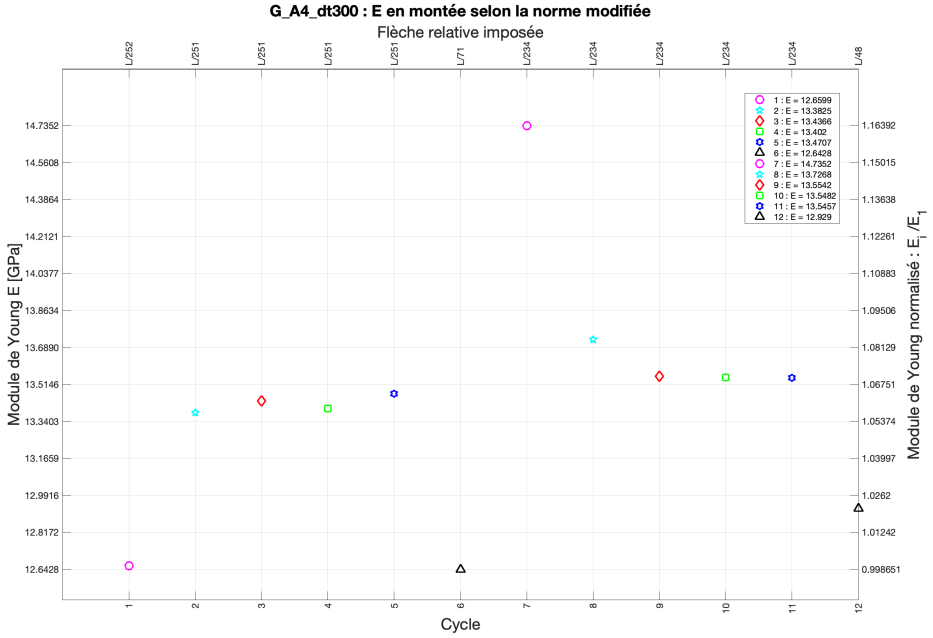


FIGURE M.461 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_A4_dt300 de la batterie 7

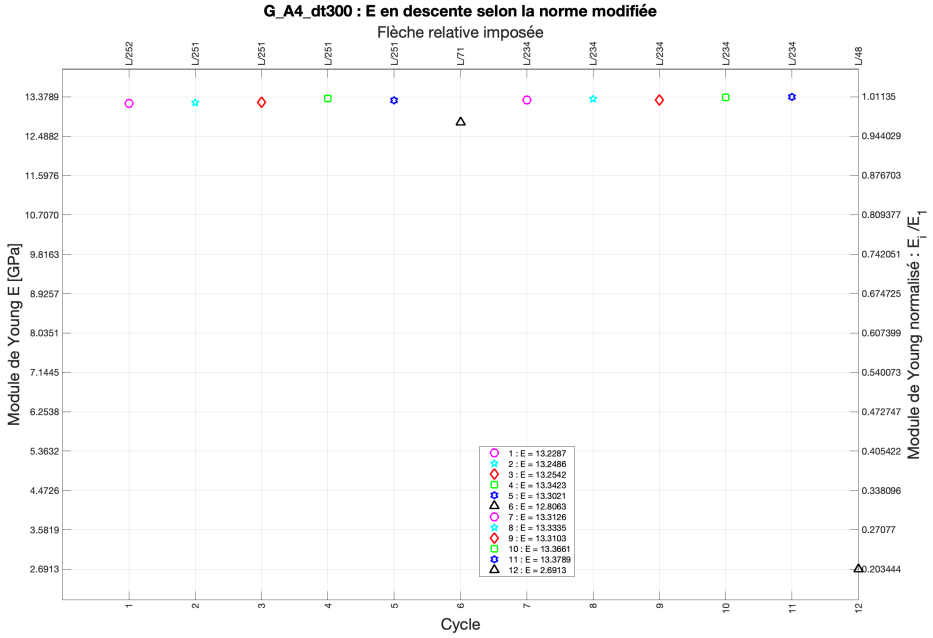


FIGURE M.462 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_A4_dt300 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

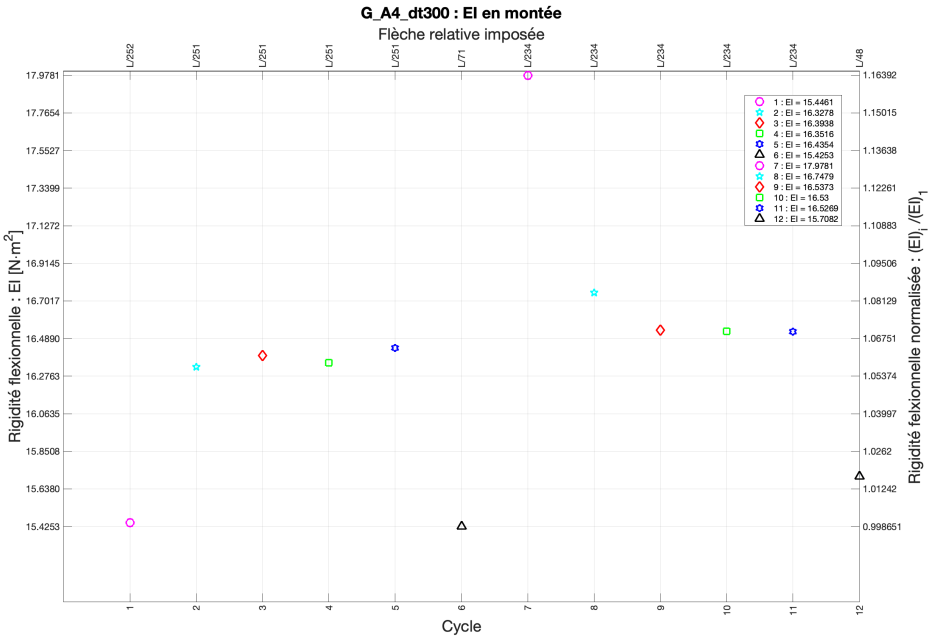


Figure M.463 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_A4_dt300 de la batterie 7

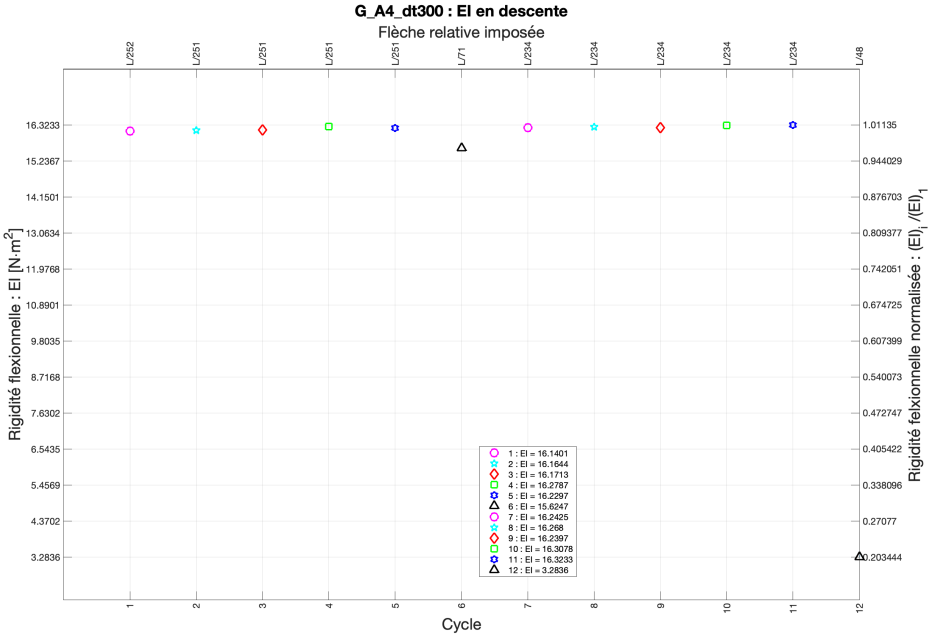


Figure M.464 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_A4_dt300 de la batterie 7

Fonction S

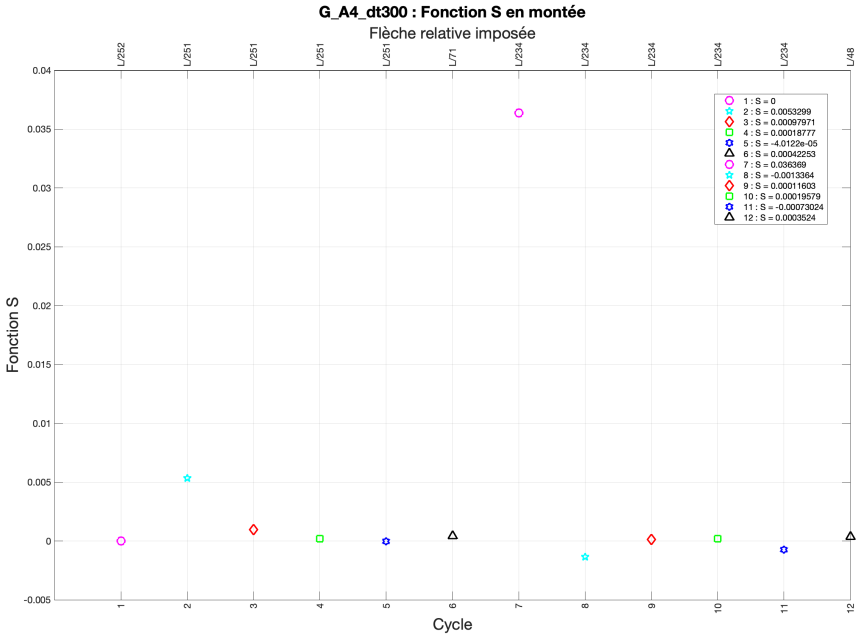


FIGURE M.465 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_A4_dt300 de la batterie 7

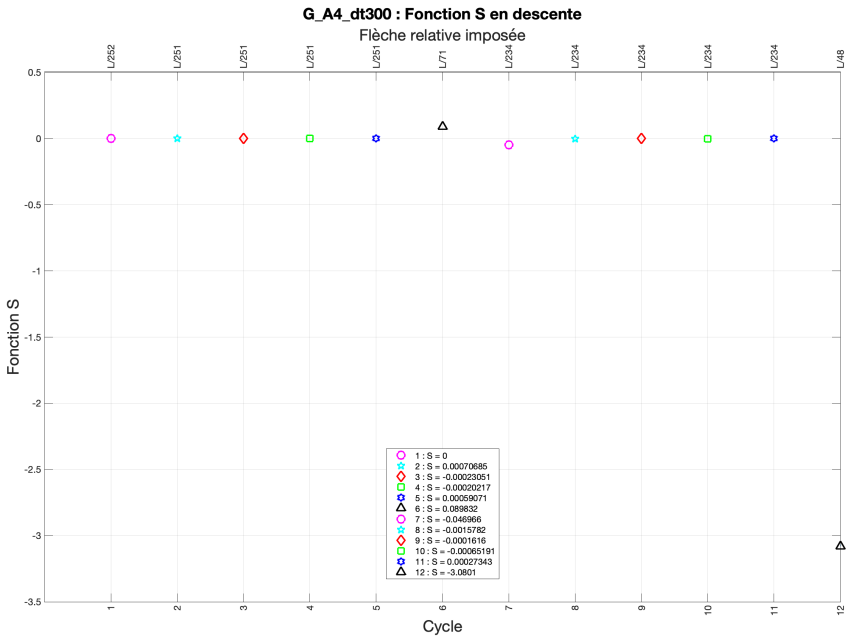


FIGURE M.466 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_A4_dt300 de la batterie 7

Éprouvette G_A5_dt000

Global

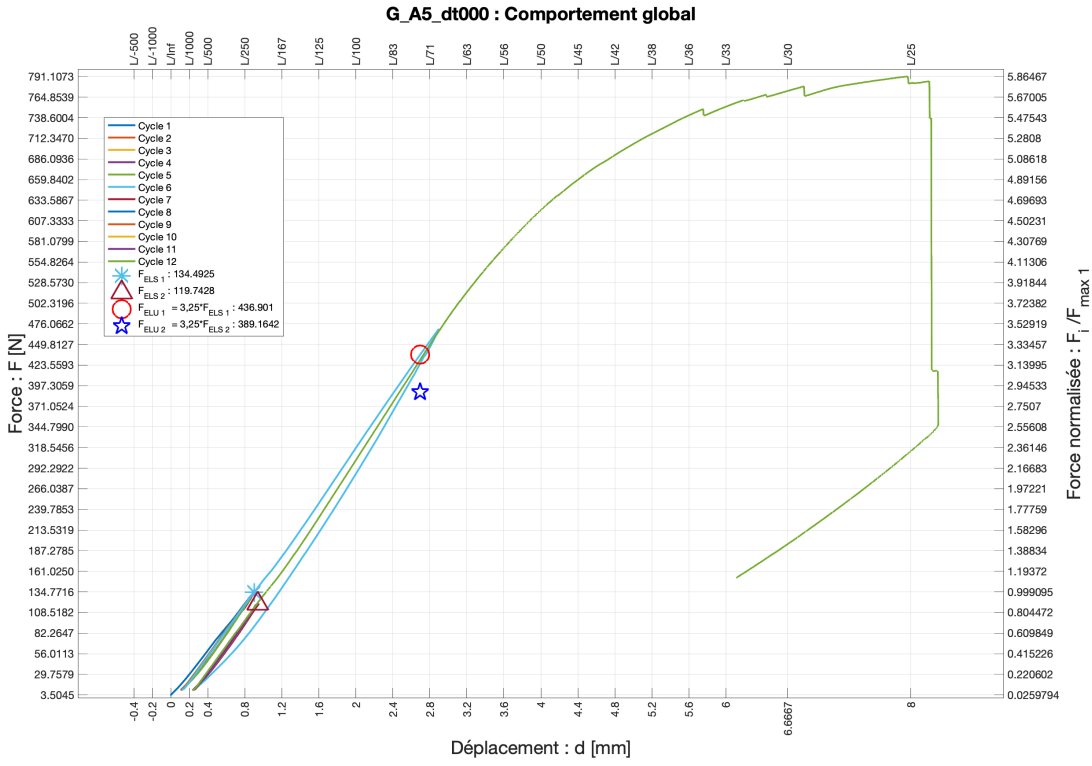


Figure M.467 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_A5_dt000 de la batterie 7

Déplacement résiduel

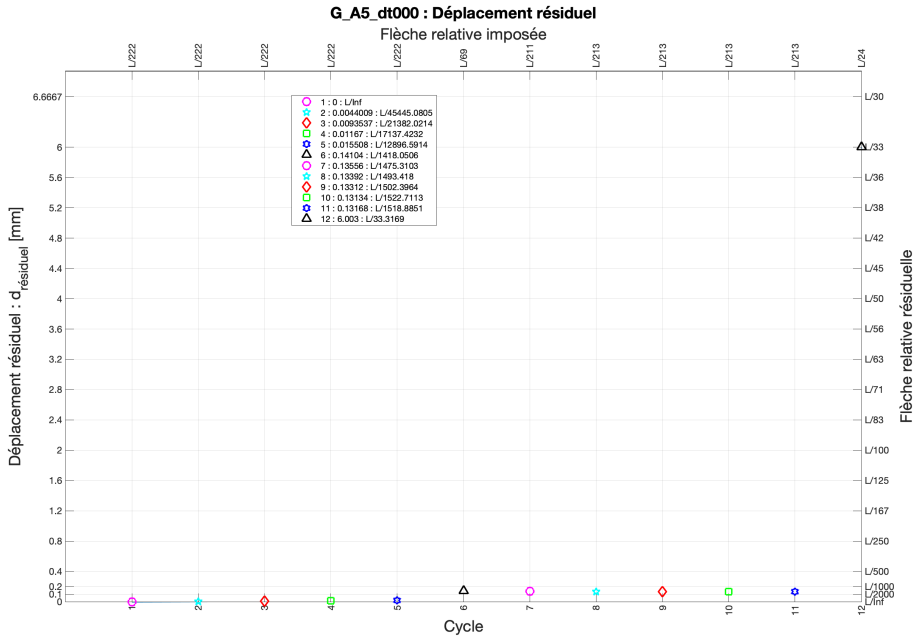


FIGURE M.468 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_A5_dt000 de la batterie 7

Force maximale

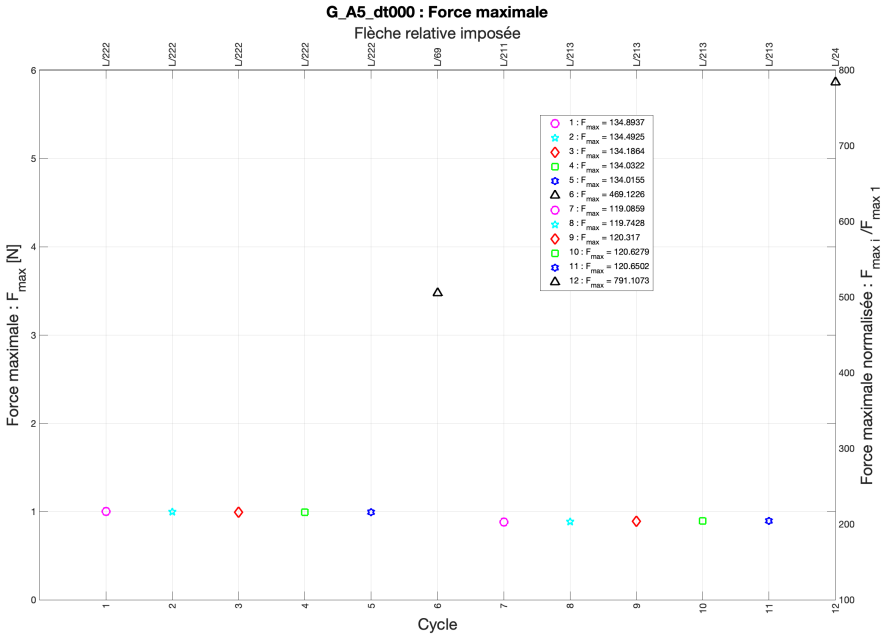


FIGURE M.469 – Force maximale de l'éprouvette G_A5_dt000 de la batterie 7

Module de Young

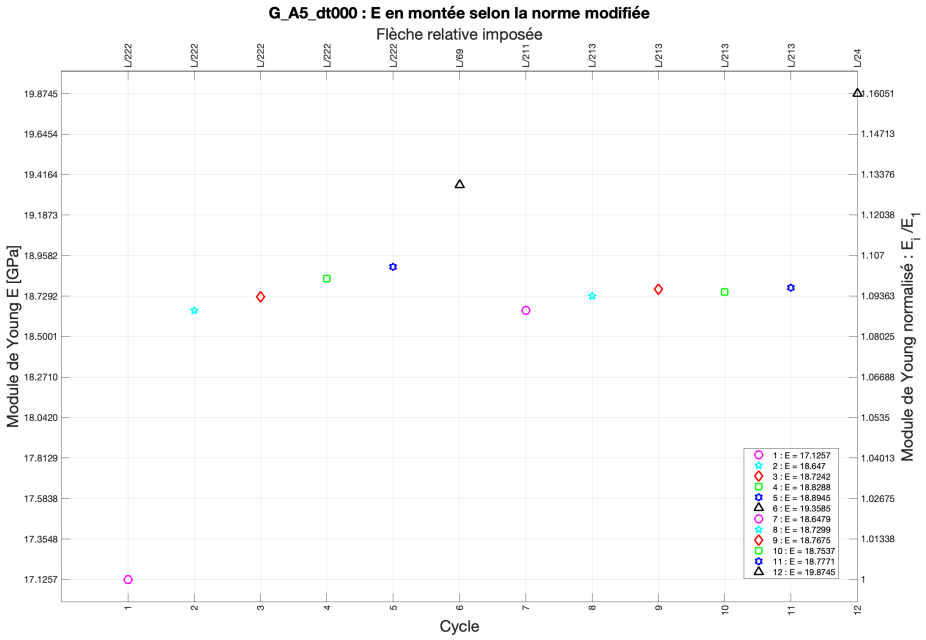


Figure M.470 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_A5_dt000 de la batterie 7

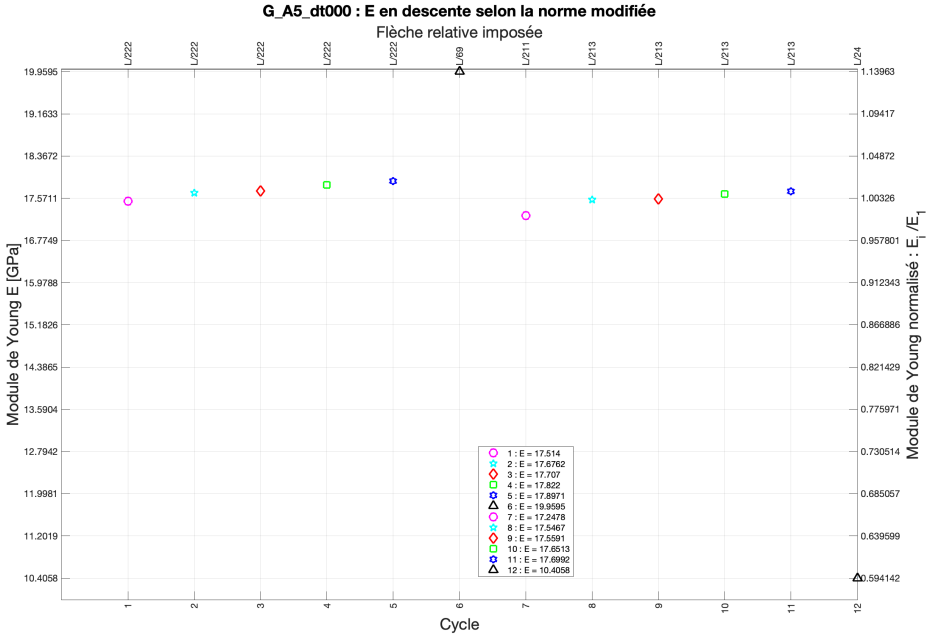


Figure M.471 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_A5_dt000 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

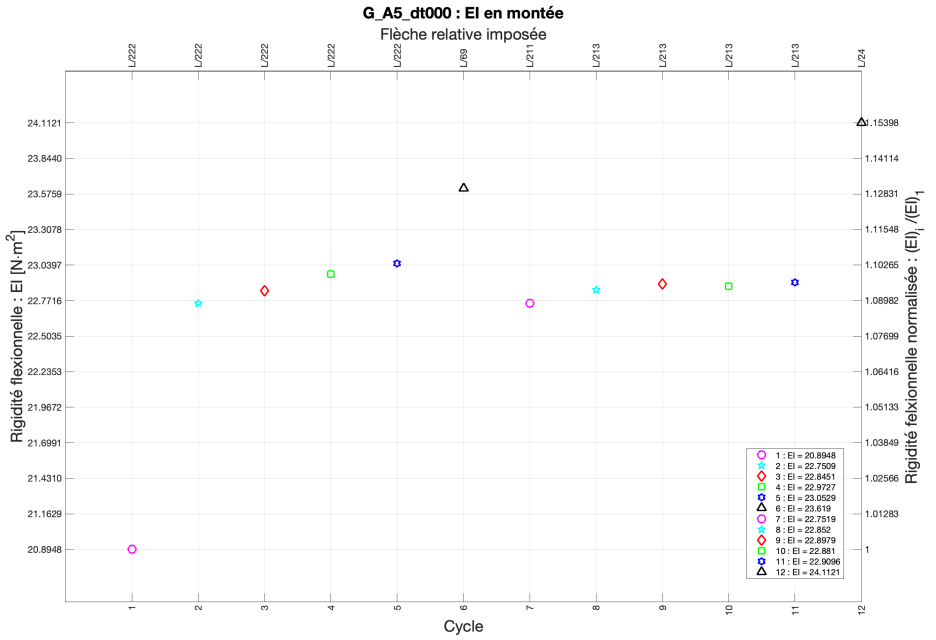


FIGURE M.472 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_A5_dt000 de la batterie 7

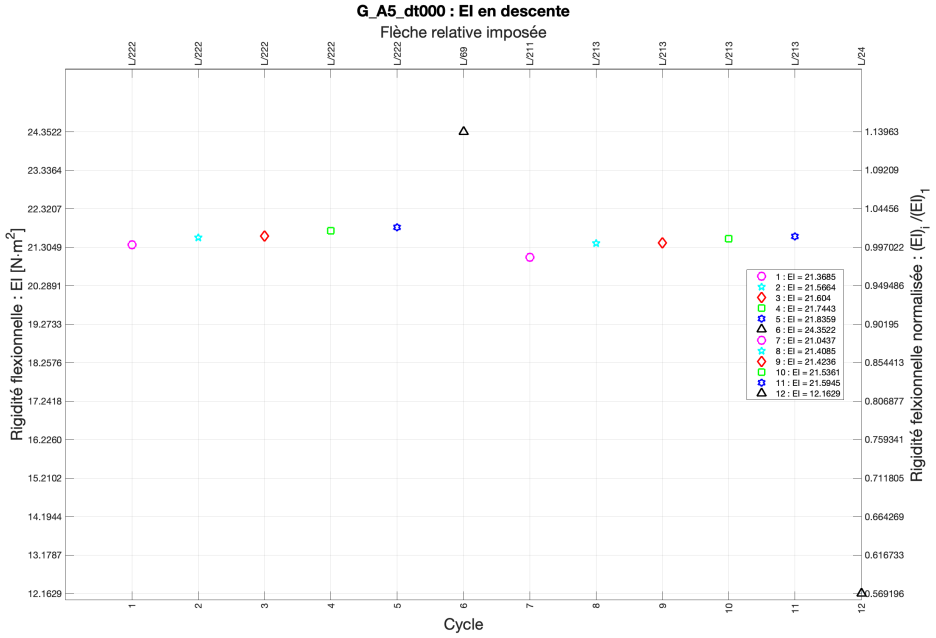


FIGURE M.473 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_A5_dt000 de la batterie 7

Fonction S

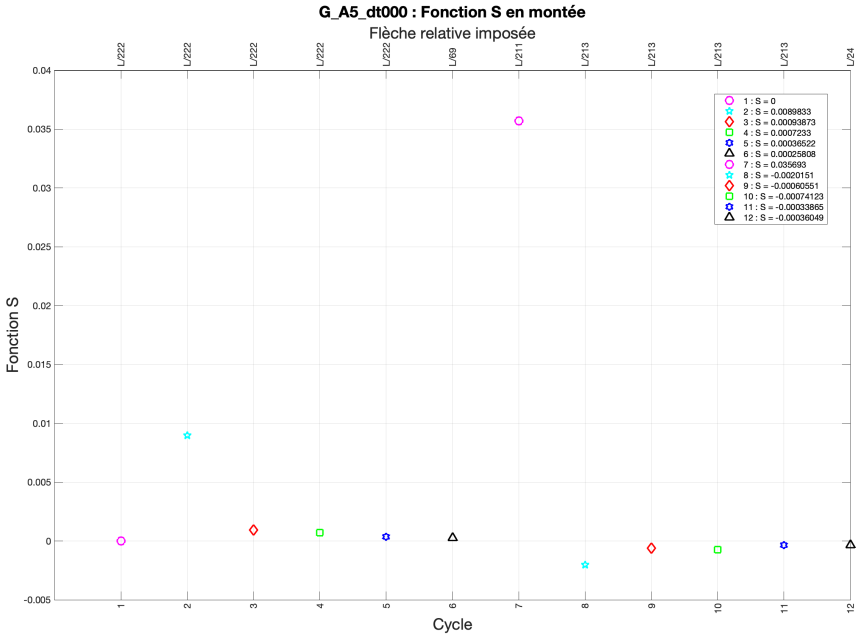


Figure M.474 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_A5_dt000 de la batterie 7

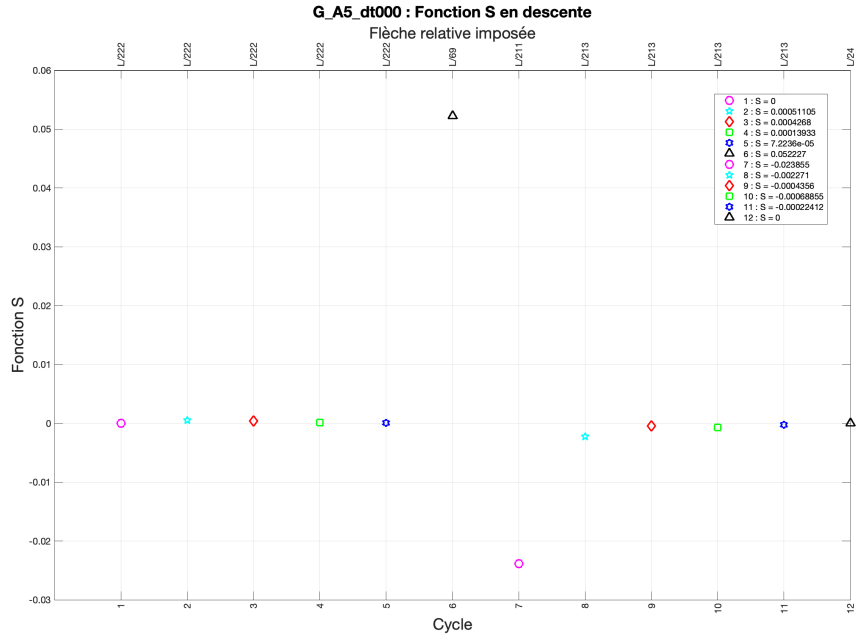


Figure M.475 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_A5_dt000 de la batterie 7

Éprouvette G_A5_dt300

Global

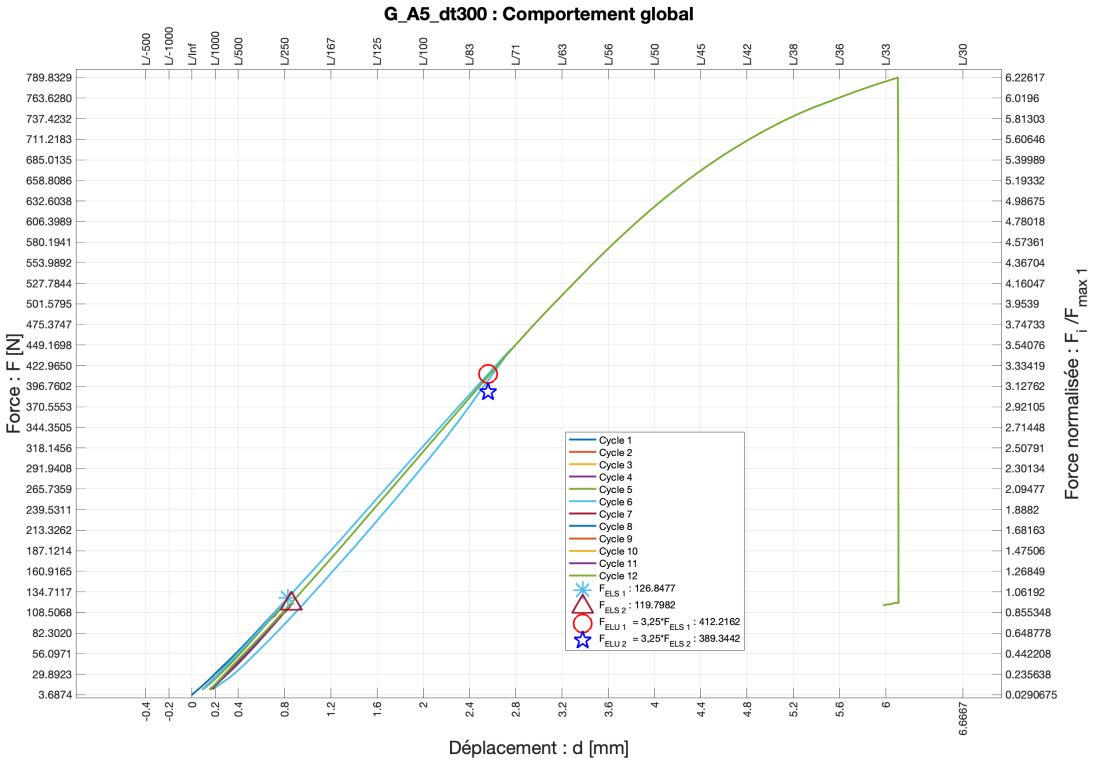


FIGURE M.476 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_A5_dt300 de la batterie 7

Déplacement résiduel

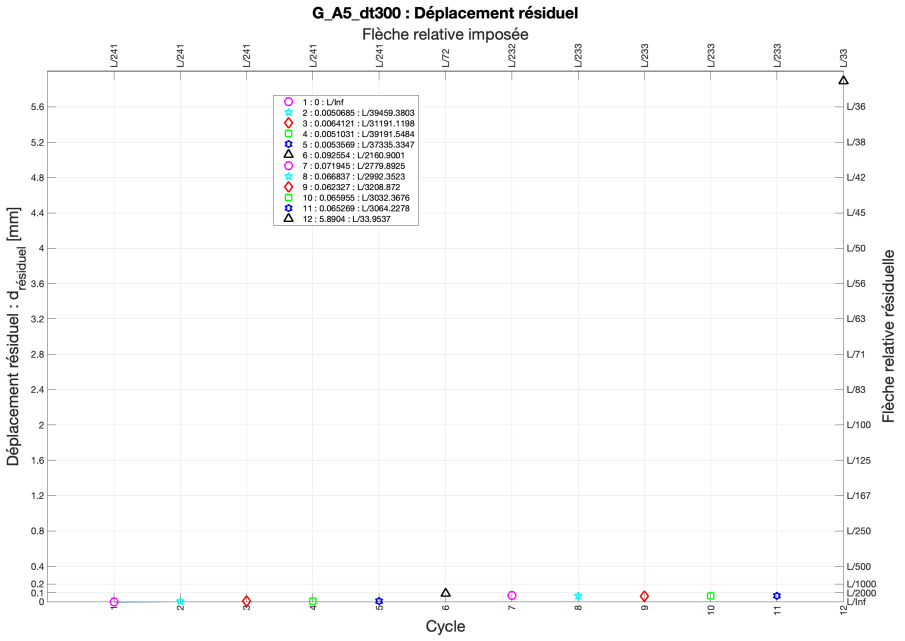


Figure M.477 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_A5_dt300 de la batterie 7

Force maximale

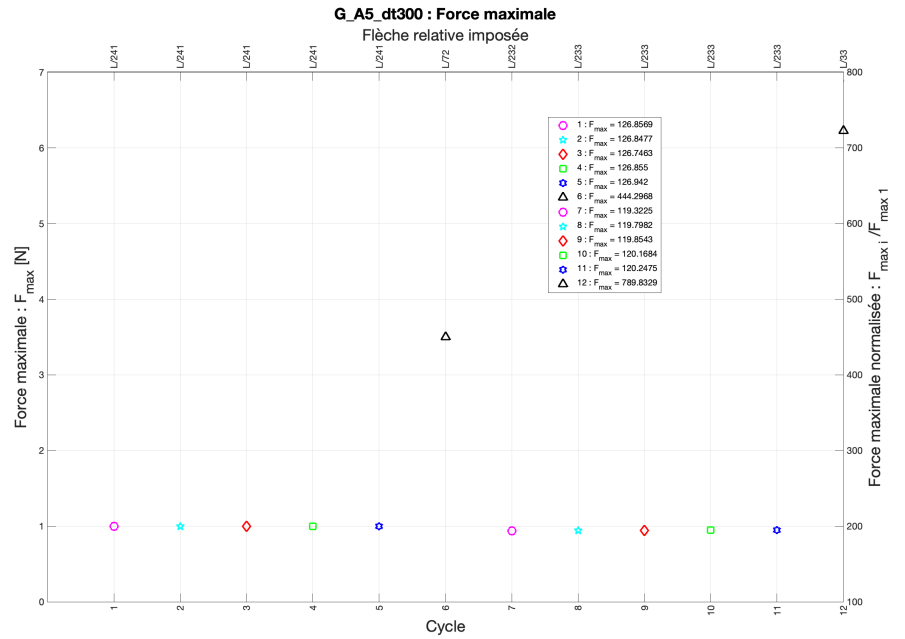


Figure M.478 – Force maximale de l'éprouvette G_A5_dt300 de la batterie 7

Module de Young

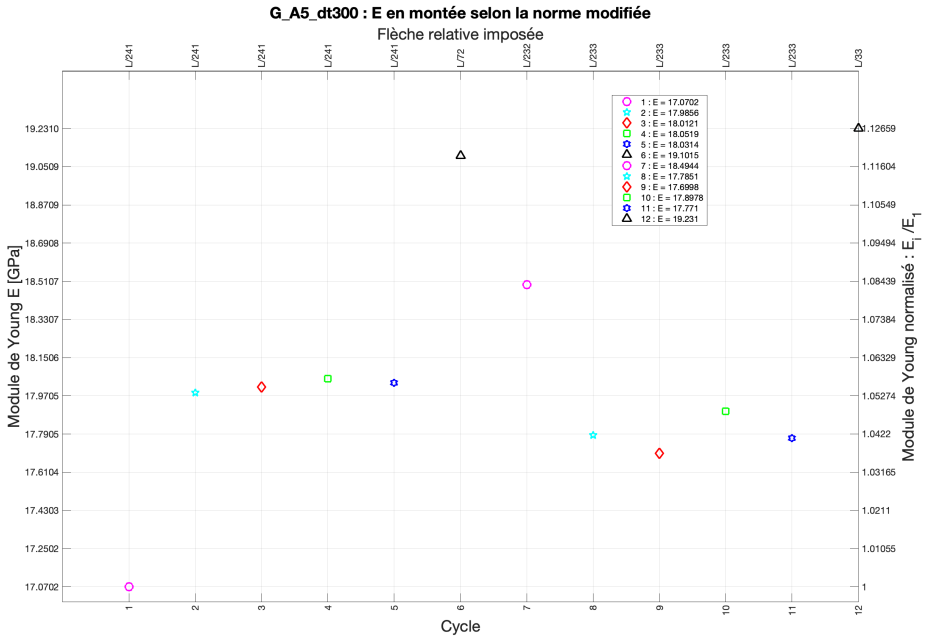


FIGURE M.479 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_A5_dt300 de la batterie 7

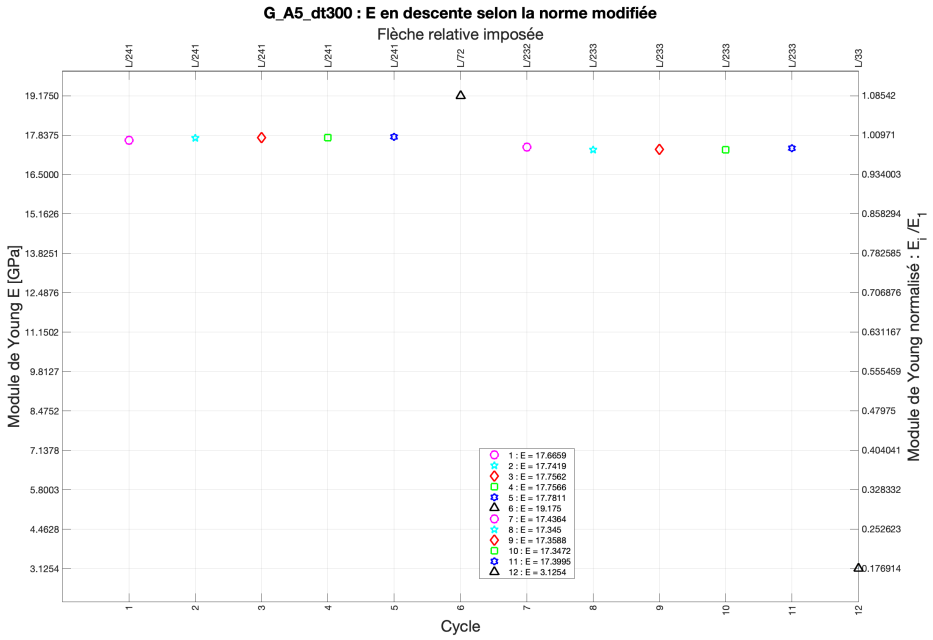


FIGURE M.480 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_A5_dt300 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

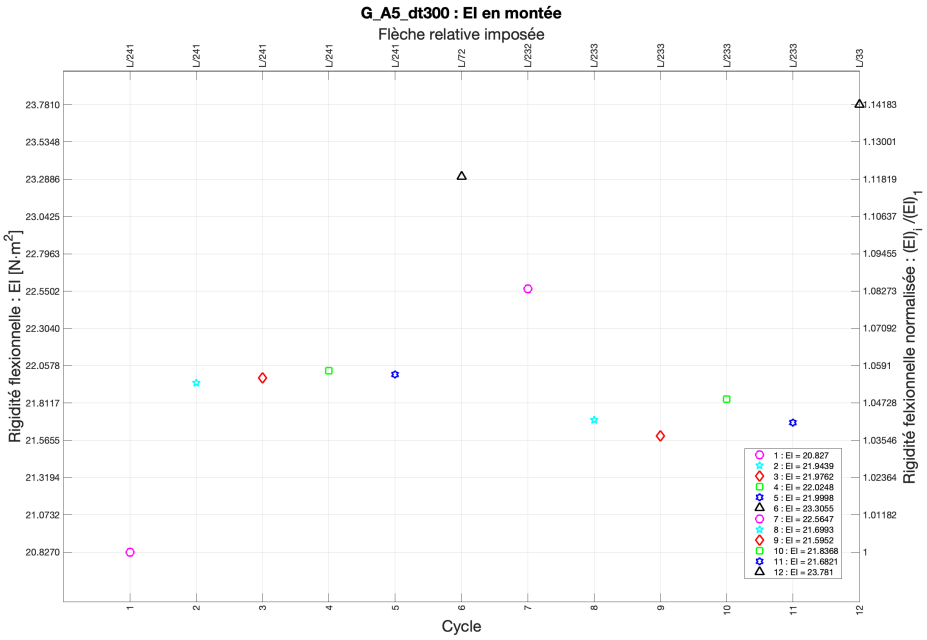


Figure M.481 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_A5_dt300 de la batterie 7

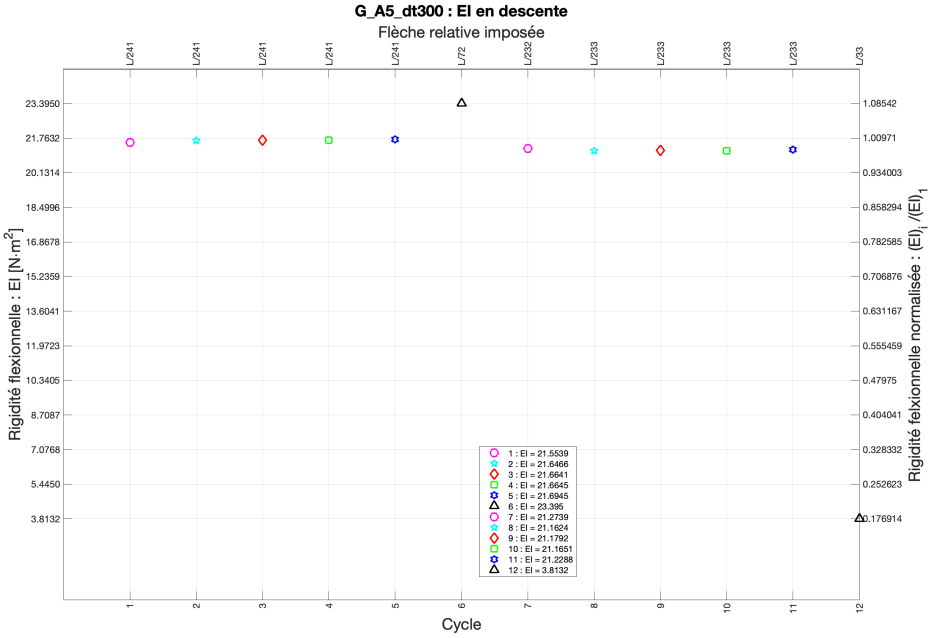


Figure M.482 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_A5_dt300 de la batterie 7

Fonction S

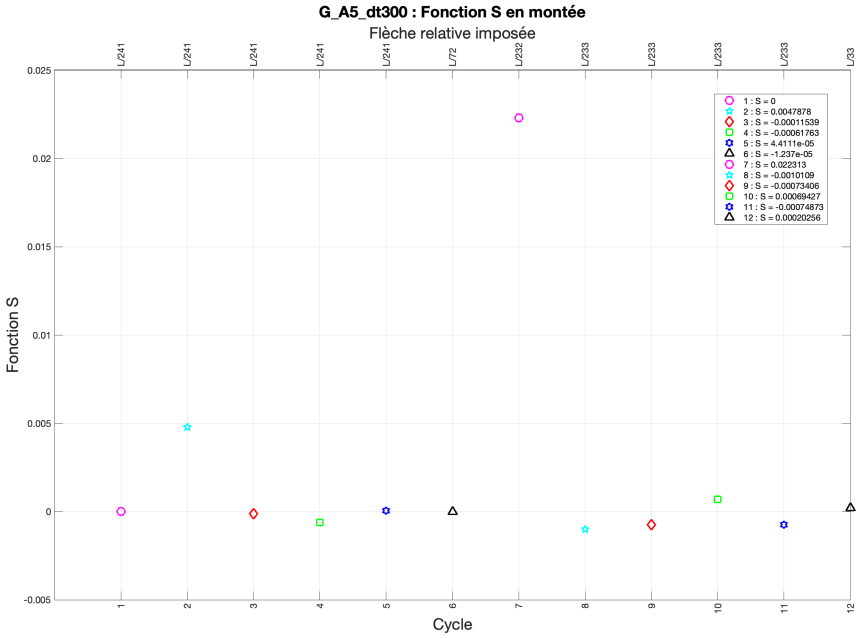


FIGURE M.483 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_A5_dt300 de la batterie 7

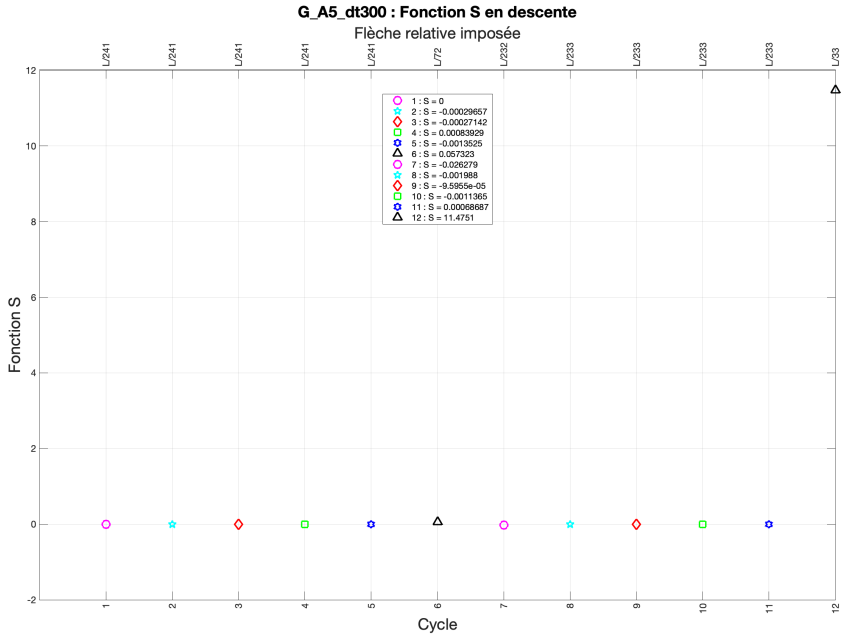


FIGURE M.484 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_A5_dt300 de la batterie 7

Éprouvette G_A6_dt000

Global

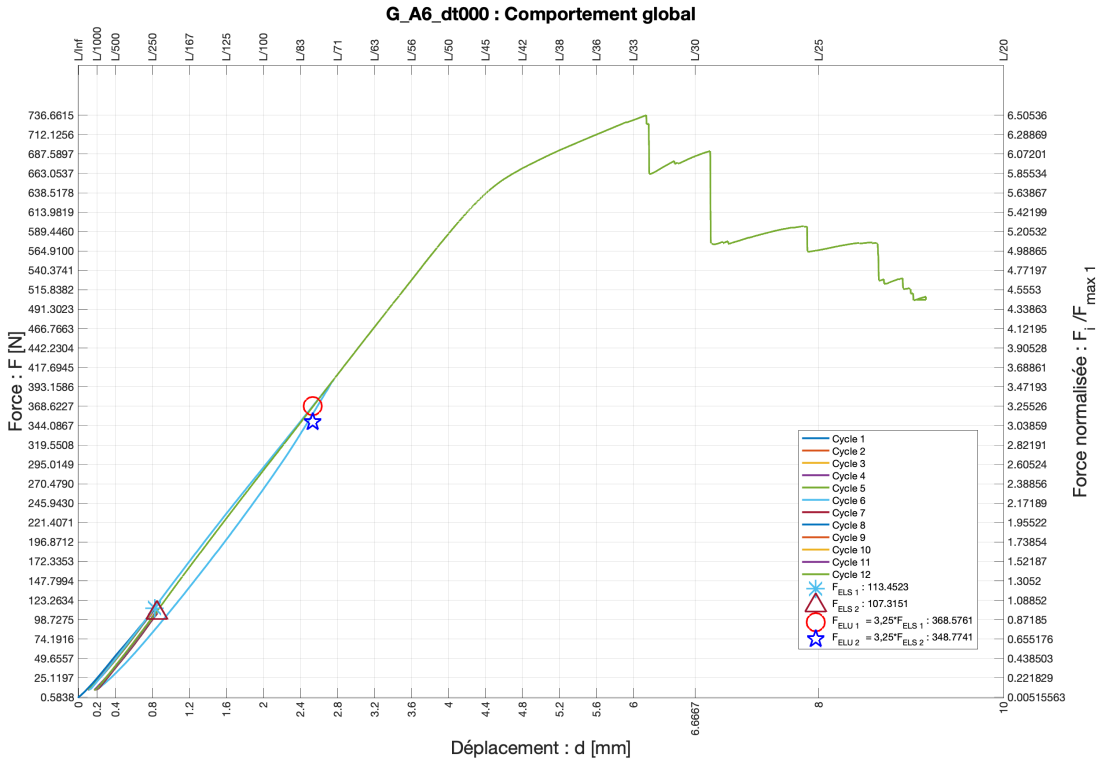


Figure M.485 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_A6_dt000 de la batterie 7

Déplacement résiduel

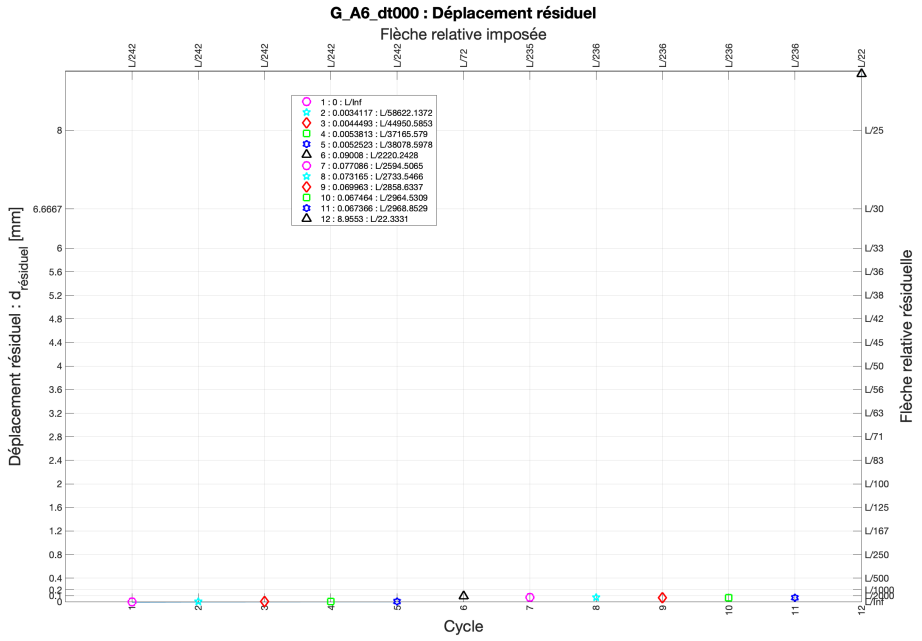


FIGURE M.486 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_A6_dt000 de la batterie 7

Force maximale

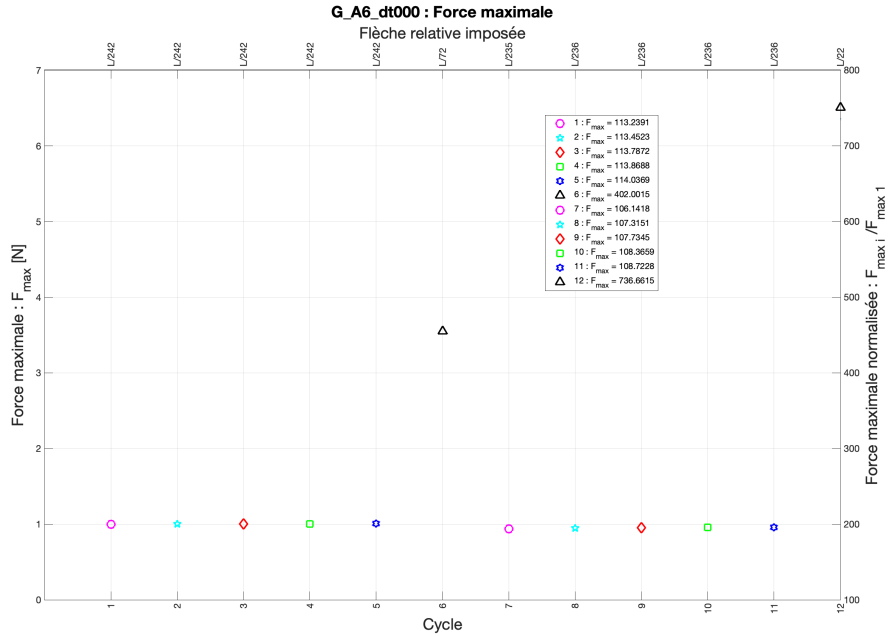


FIGURE M.487 – Force maximale de l'éprouvette G_A6_dt000 de la batterie 7

Module de Young

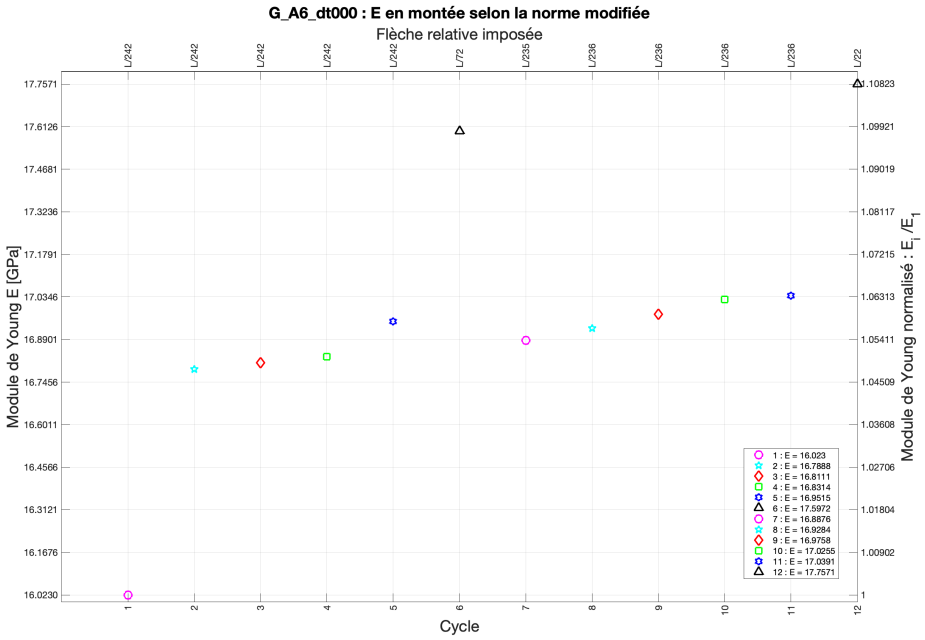


Figure M.488 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_A6_dt000 de la batterie 7

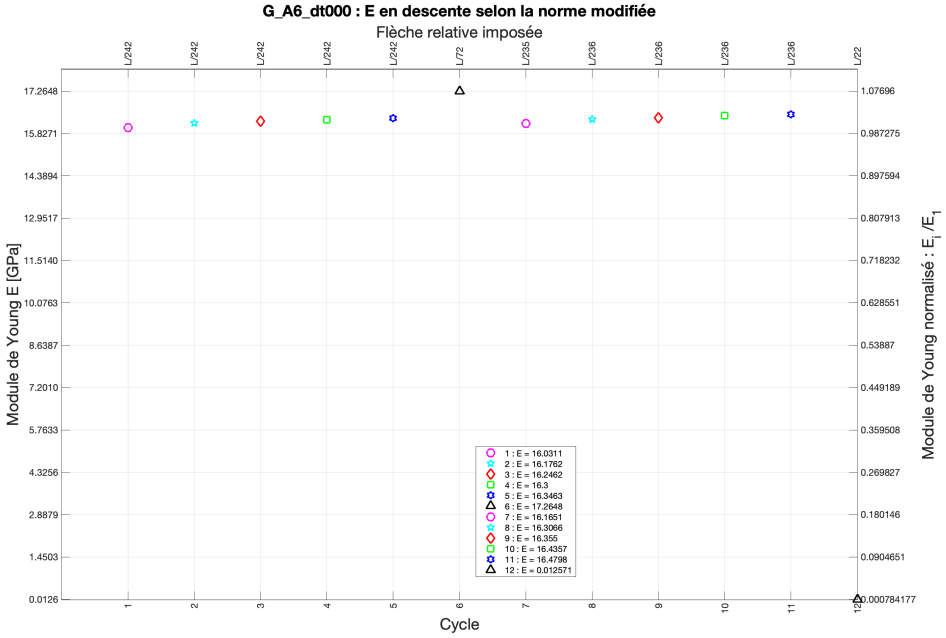


Figure M.489 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_A6_dt000 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

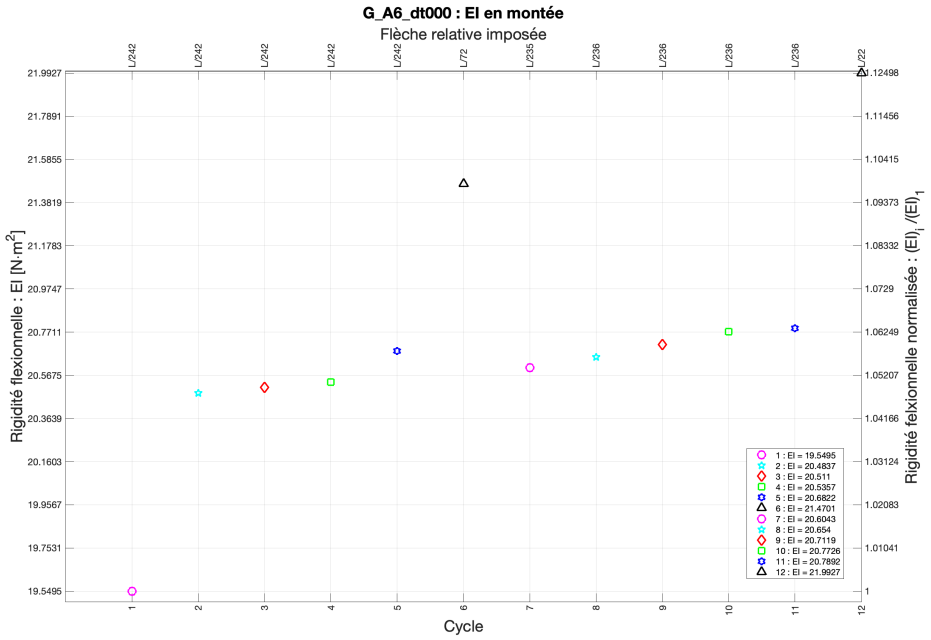


FIGURE M.490 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_A6_dt000 de la batterie 7

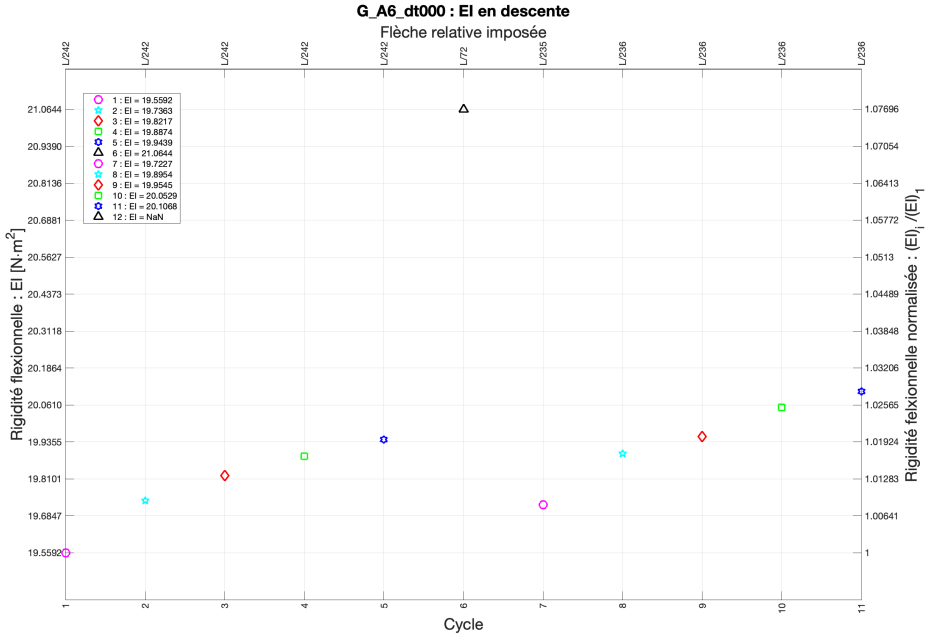


FIGURE M.491 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_A6_dt000 de la batterie 7

Fonction S

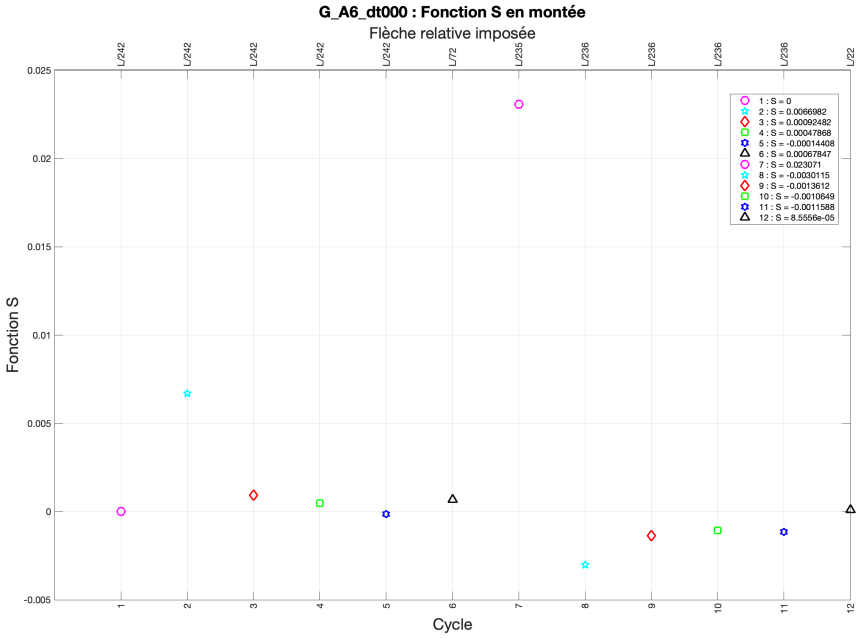


Figure M.492 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_A6_dt000 de la batterie 7

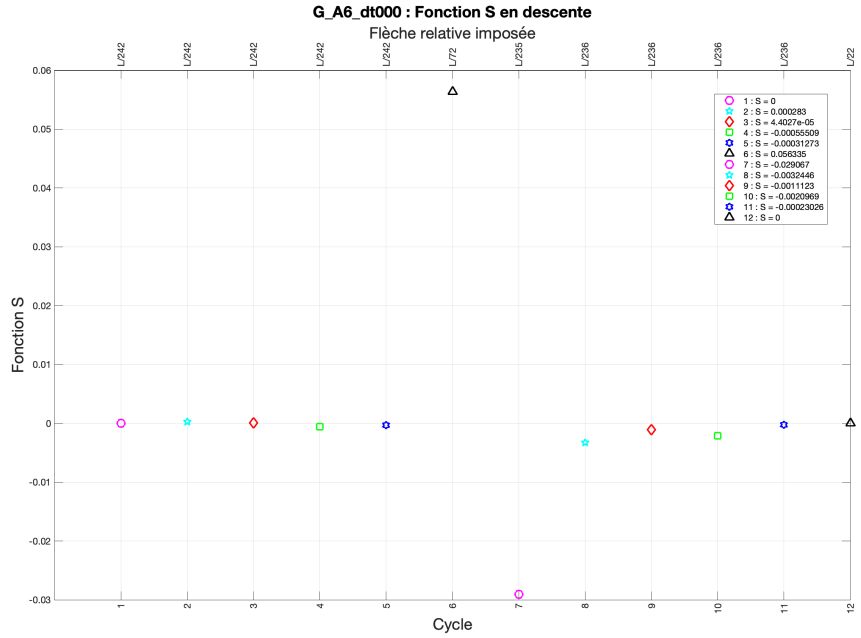


Figure M.493 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_A6_dt000 de la batterie 7

Éprouvette G_A6_dt300

Global

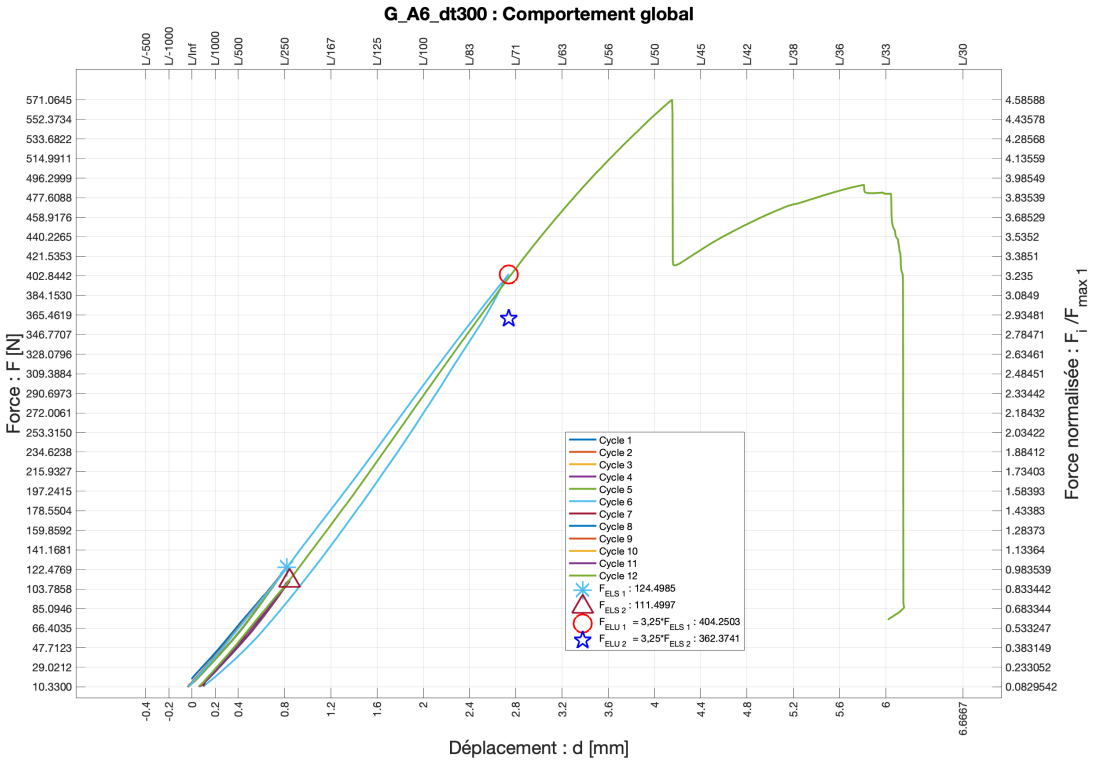


FIGURE M.494 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_A6_dt300 de la batterie 7

Déplacement résiduel

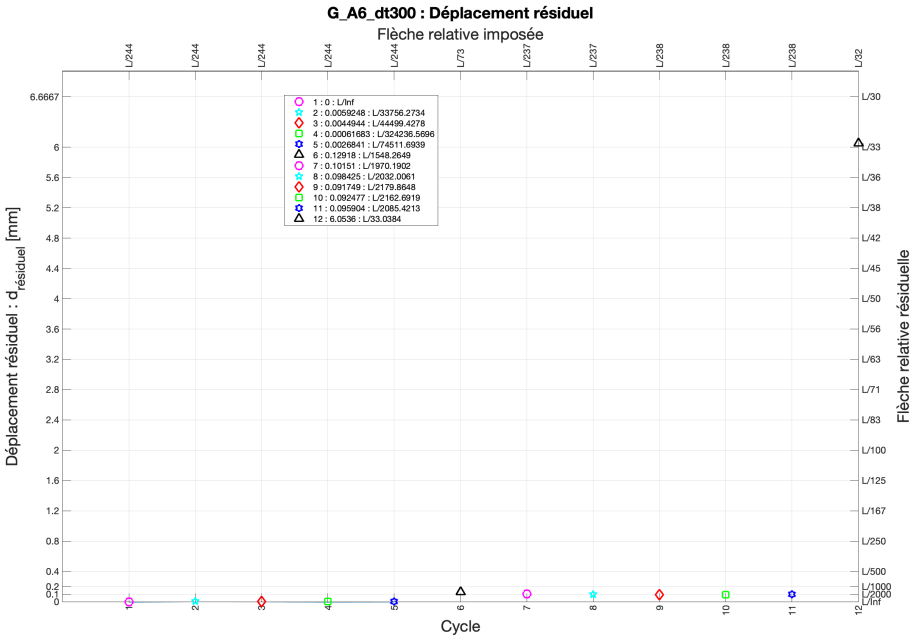


FIGURE M.495 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_A6_dt300 de la batterie 7

Force maximale

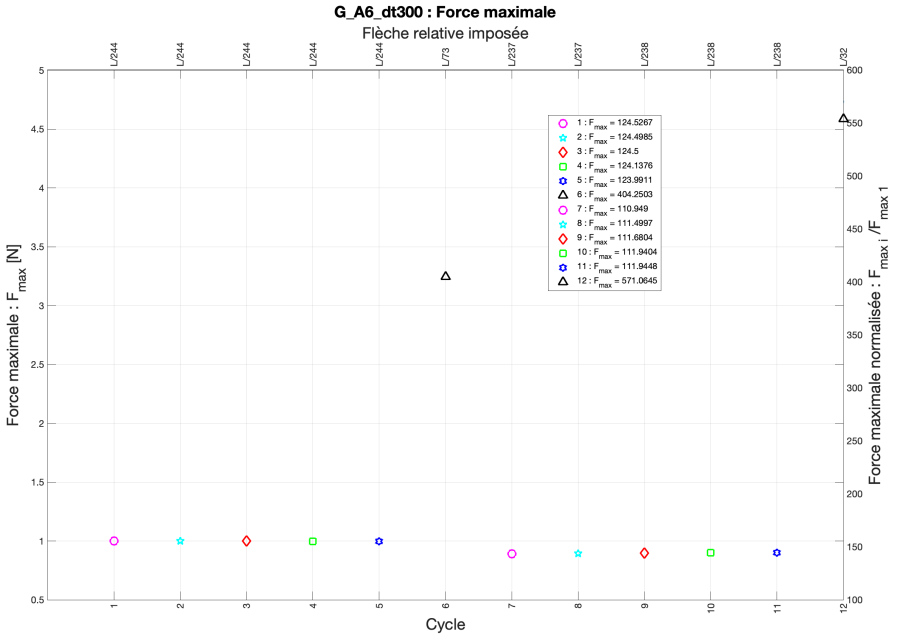


FIGURE M.496 – Force maximale de l'éprouvette G_A6_dt300 de la batterie 7

Module de Young

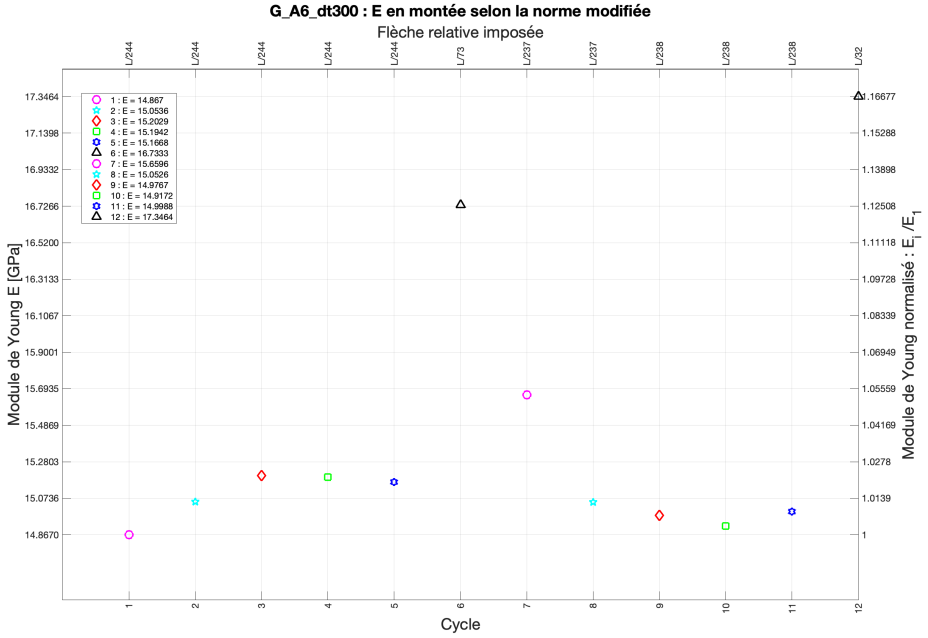


FIGURE M.497 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_A6_dt300 de la batterie 7

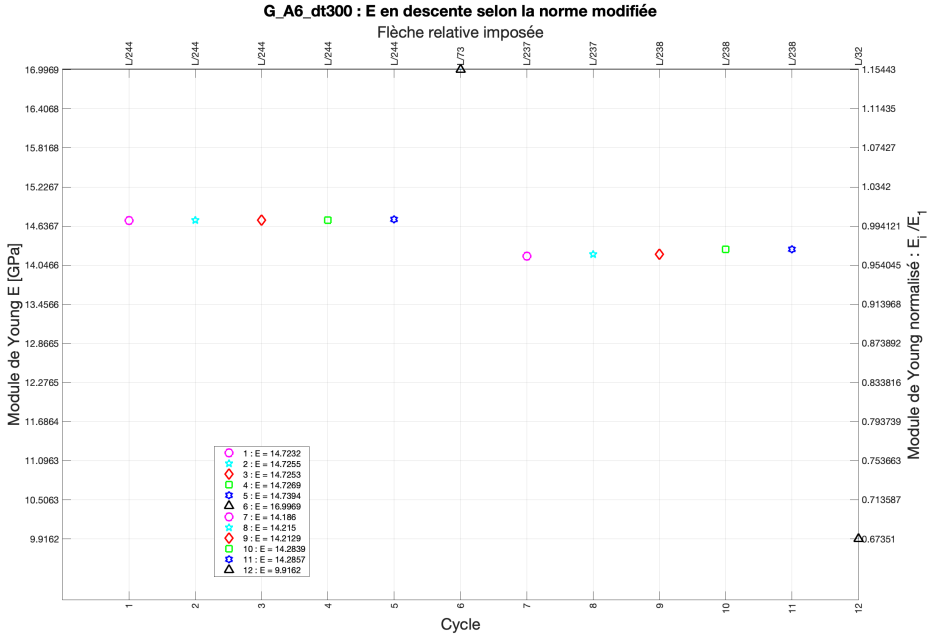


FIGURE M.498 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_A6_dt300 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

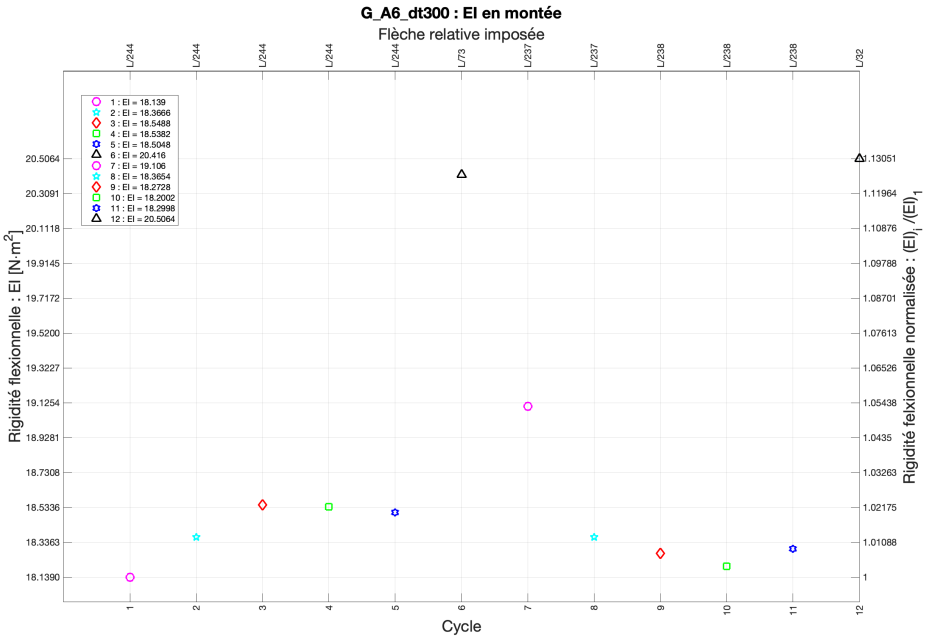


Figure M.499 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_A6_dt300 de la batterie 7

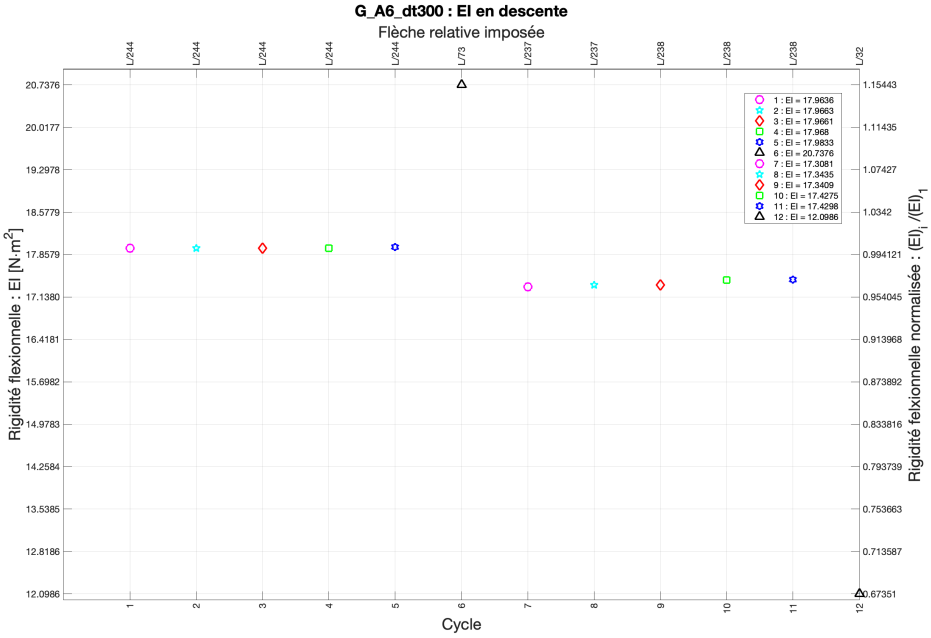


Figure M.500 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_A6_dt300 de la batterie 7

Fonction S

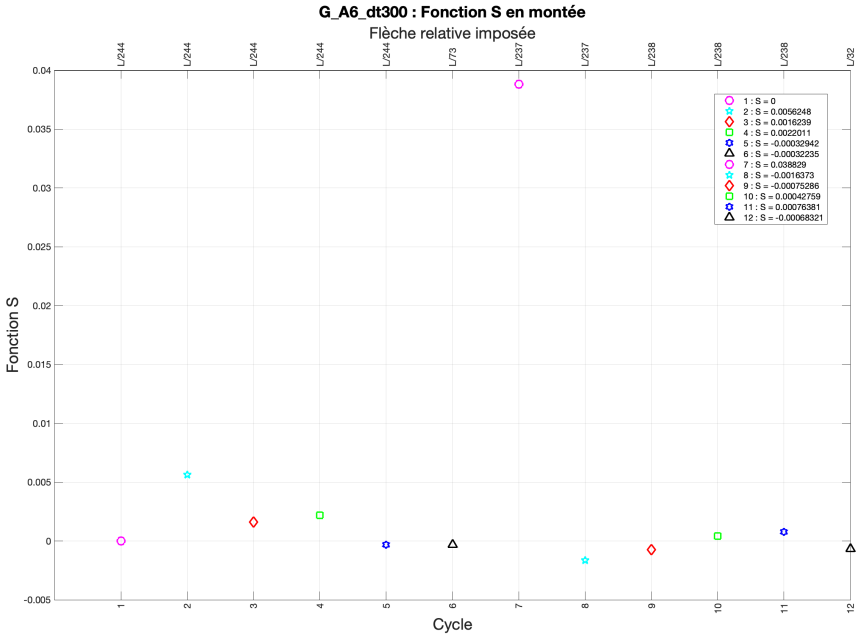


FIGURE M.501 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_A6_dt300 de la batterie 7

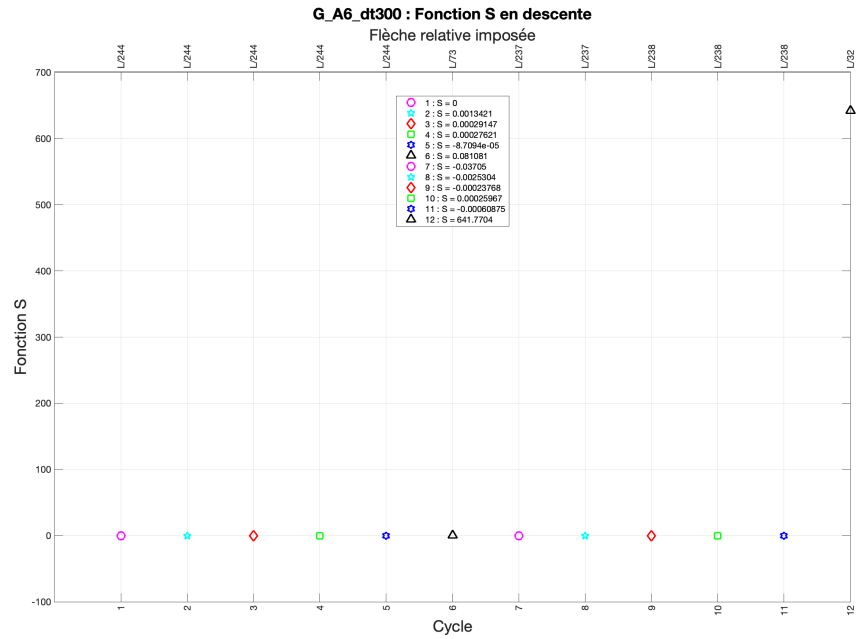


FIGURE M.502 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_A6_dt300 de la batterie 7

Éprouvette G_B1_dt000

Global

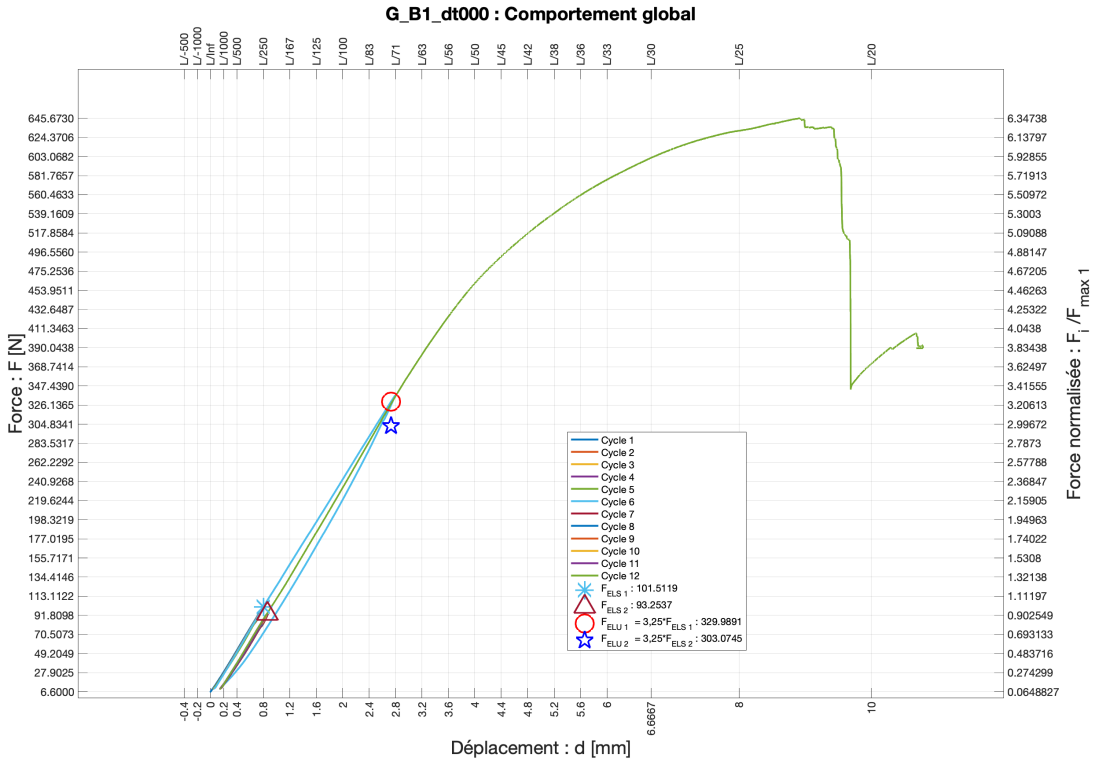


Figure M.503 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_B1_dt000 de la batterie 7

Déplacement résiduel

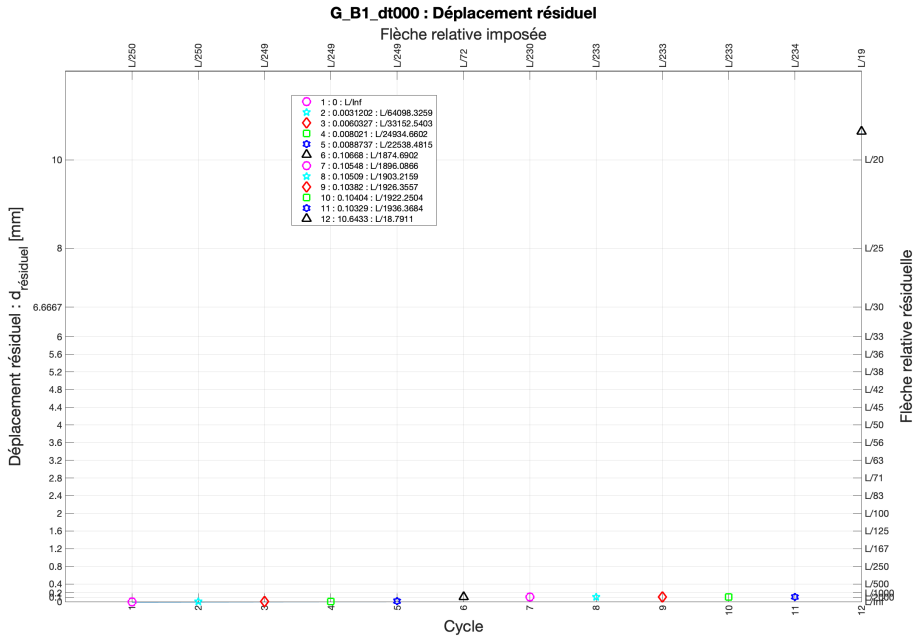


FIGURE M.504 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_B1_dt000 de la batterie 7

Force maximale

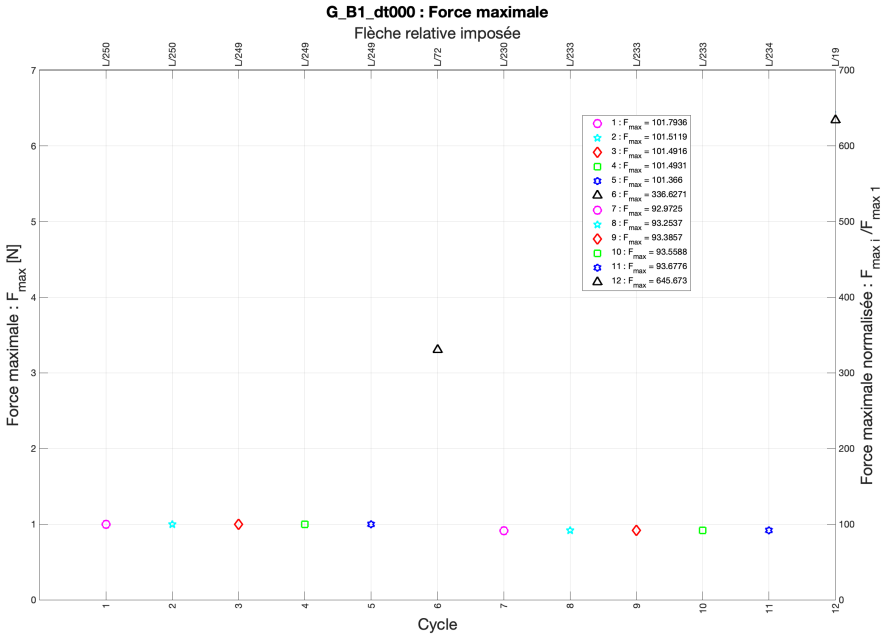


FIGURE M.505 – Force maximale de l'éprouvette G_B1_dt000 de la batterie 7

Module de Young

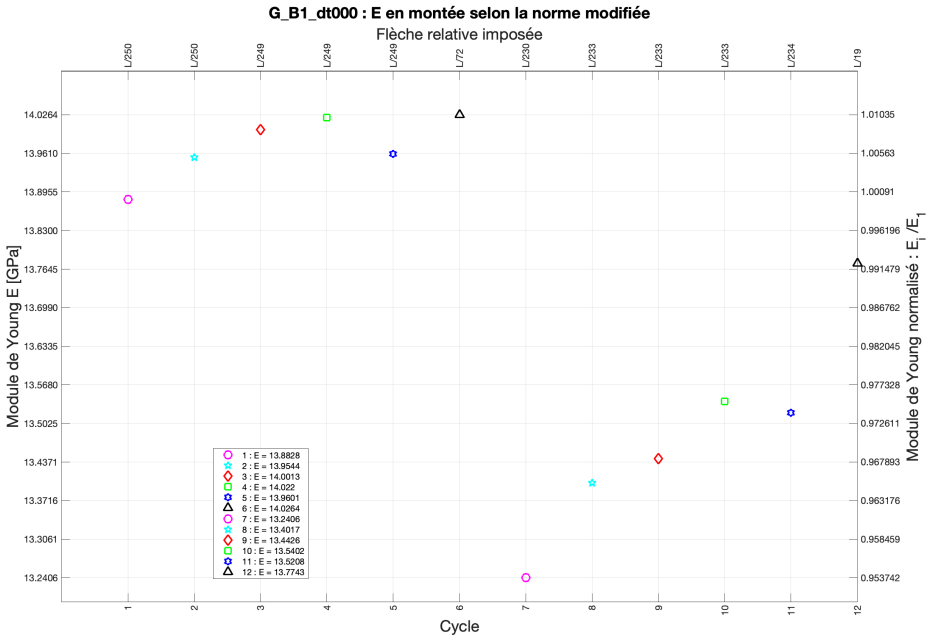


Figure M.506 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_B1_dt000 de la batterie 7

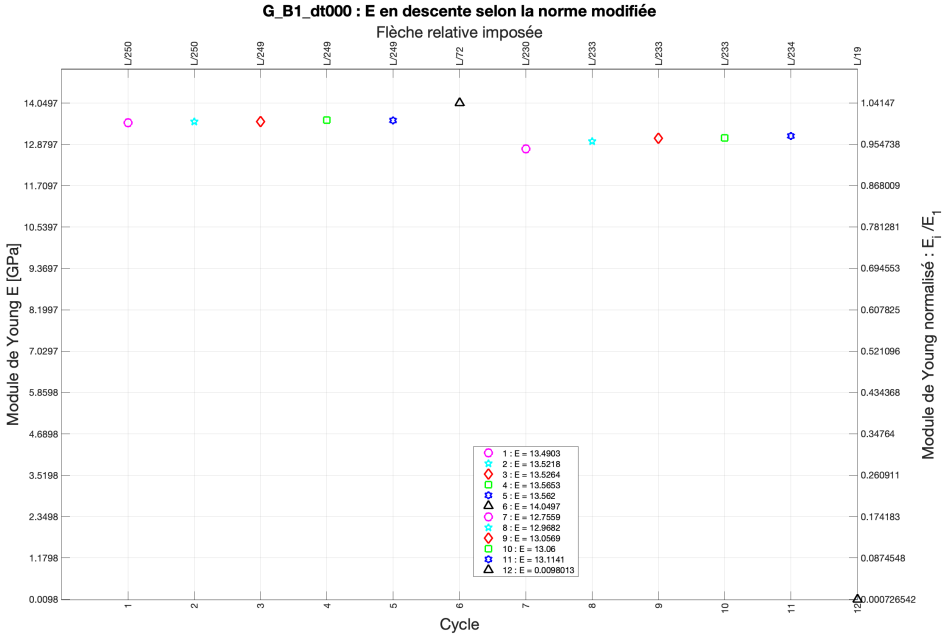


Figure M.507 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_B1_dt000 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

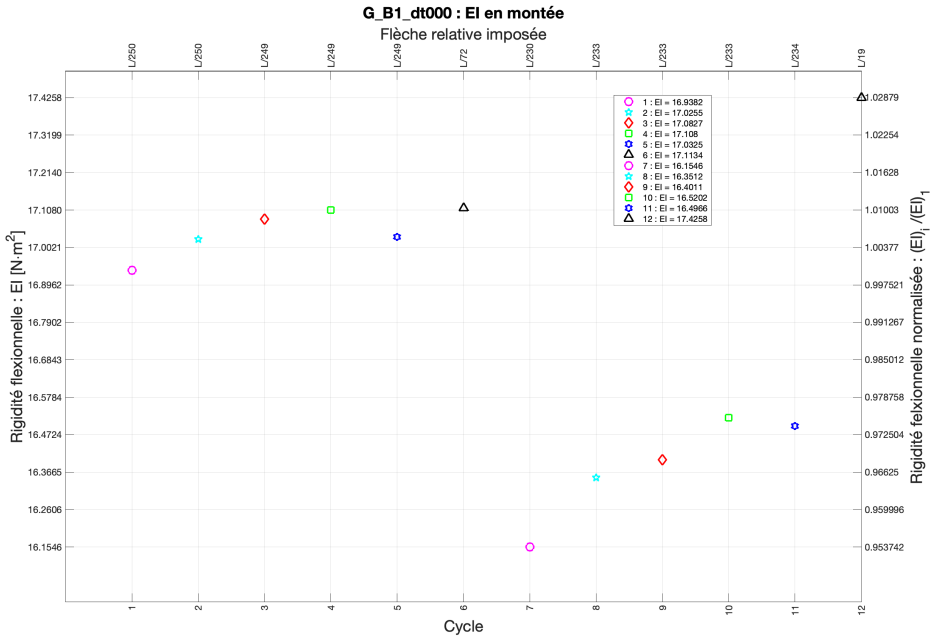


FIGURE M.508 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_B1_dt000 de la batterie 7

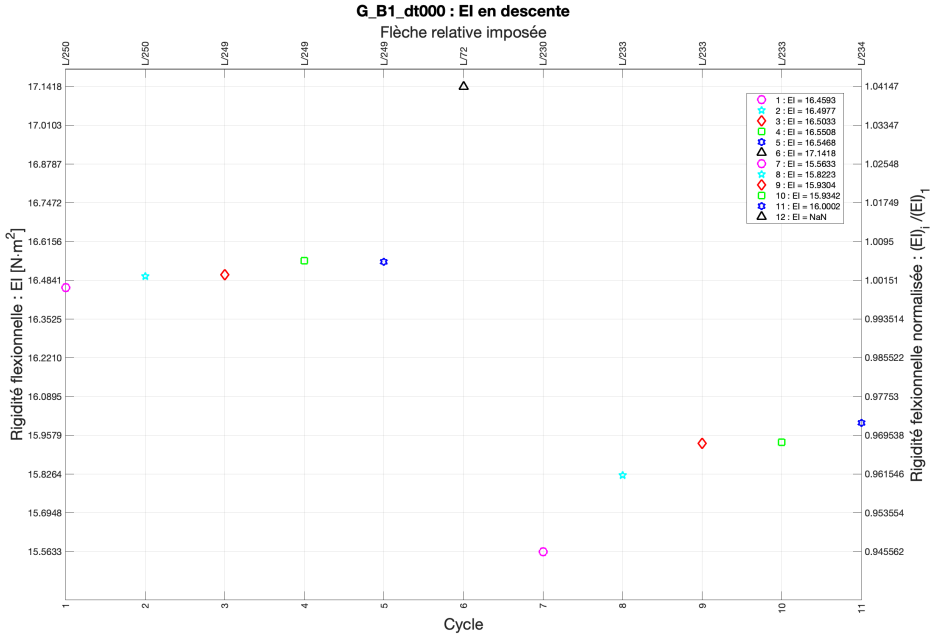


FIGURE M.509 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_B1_dt000 de la batterie 7

Fonction S

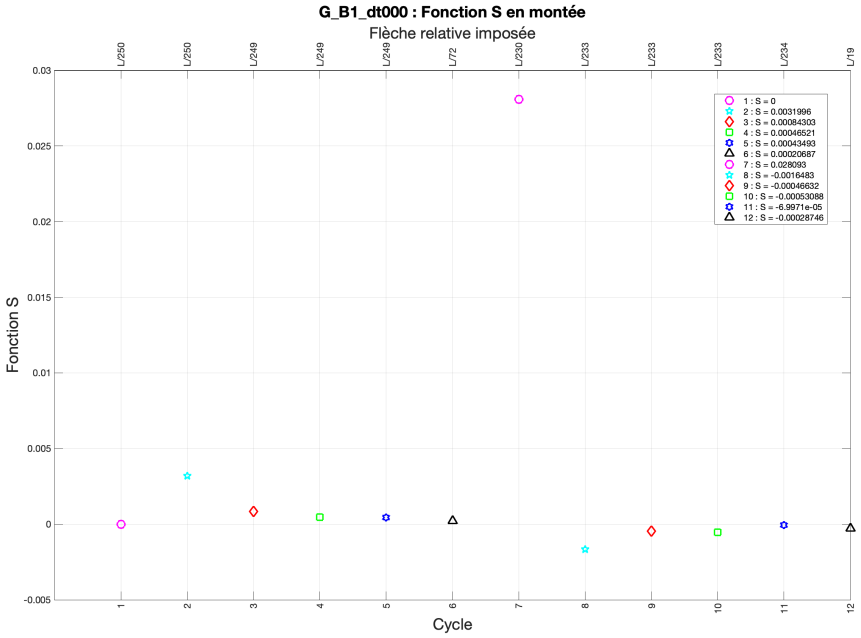


Figure M.510 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_B1_dt000 de la batterie 7

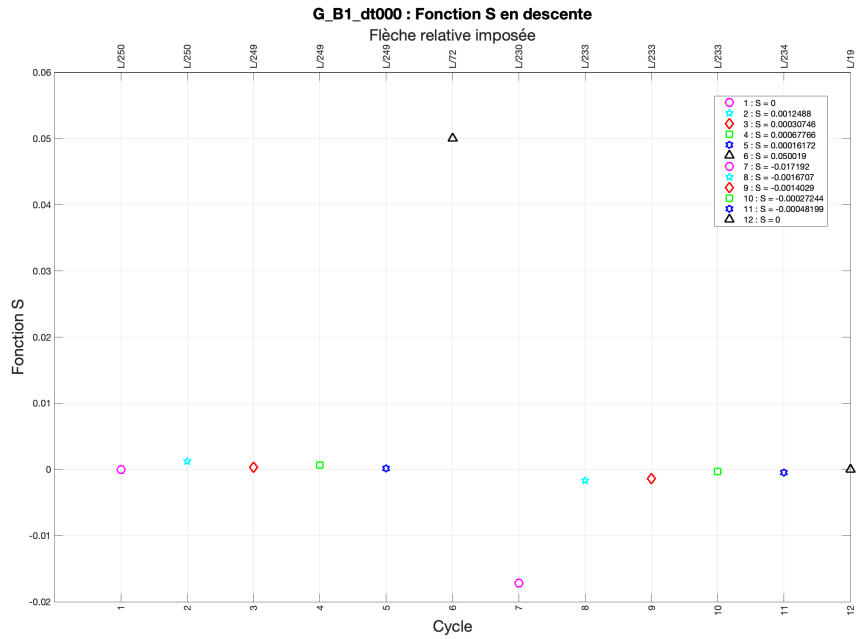


Figure M.511 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_B1_dt000 de la batterie 7

Éprouvette G_B1_dt300

Global

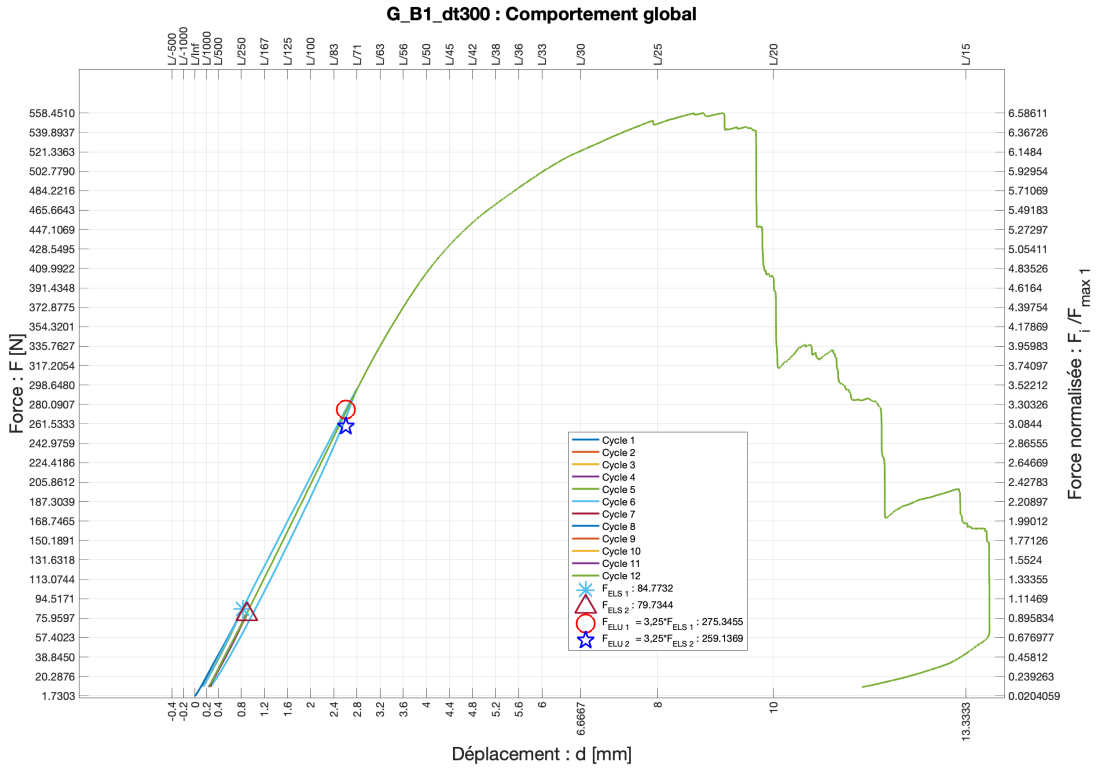


FIGURE M.512 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_B1_dt300 de la batterie 7

Déplacement résiduel

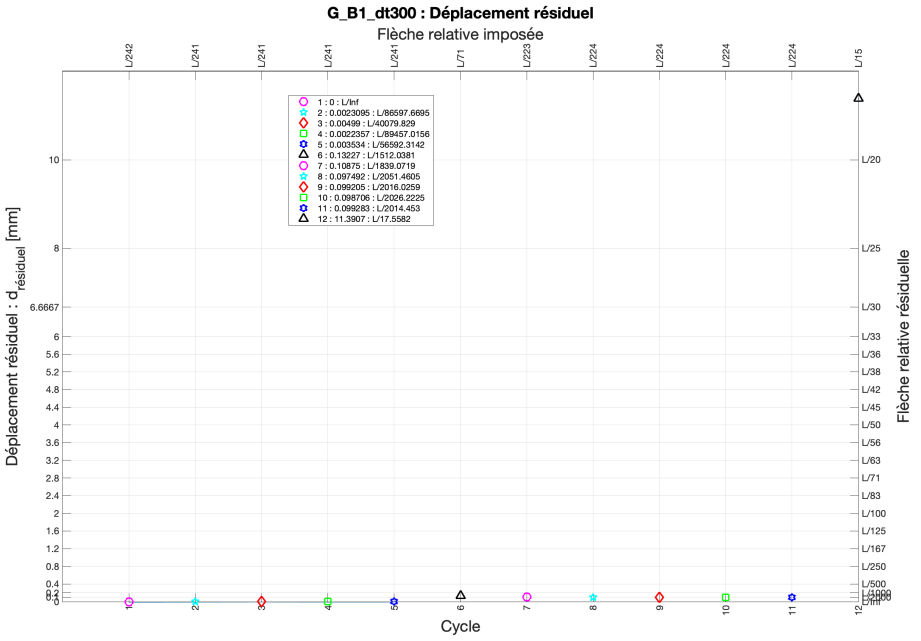


Figure M.513 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_B1_dt300 de la batterie 7

Force maximale

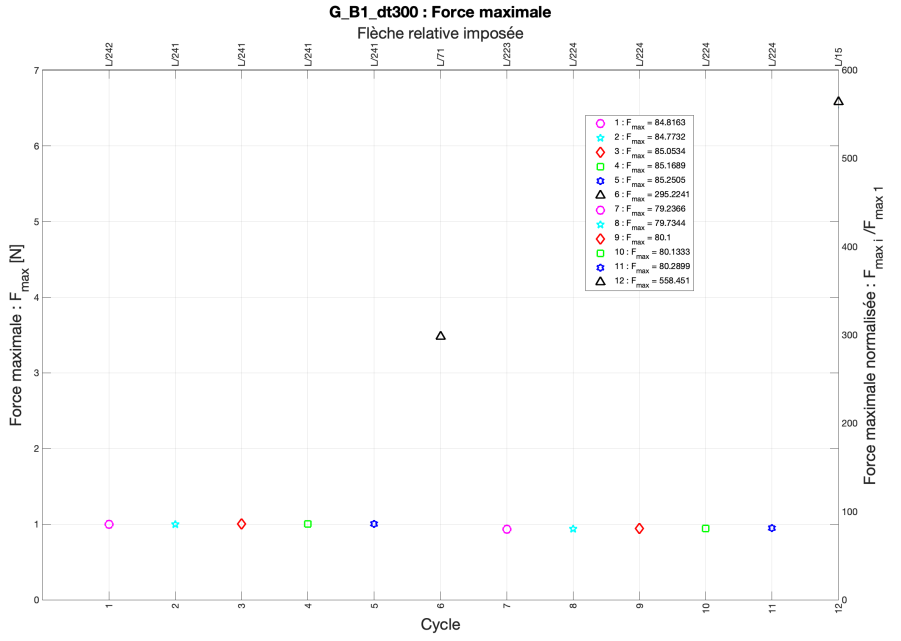


Figure M.514 – Force maximale de l'éprouvette G_B1_dt300 de la batterie 7

Module de Young

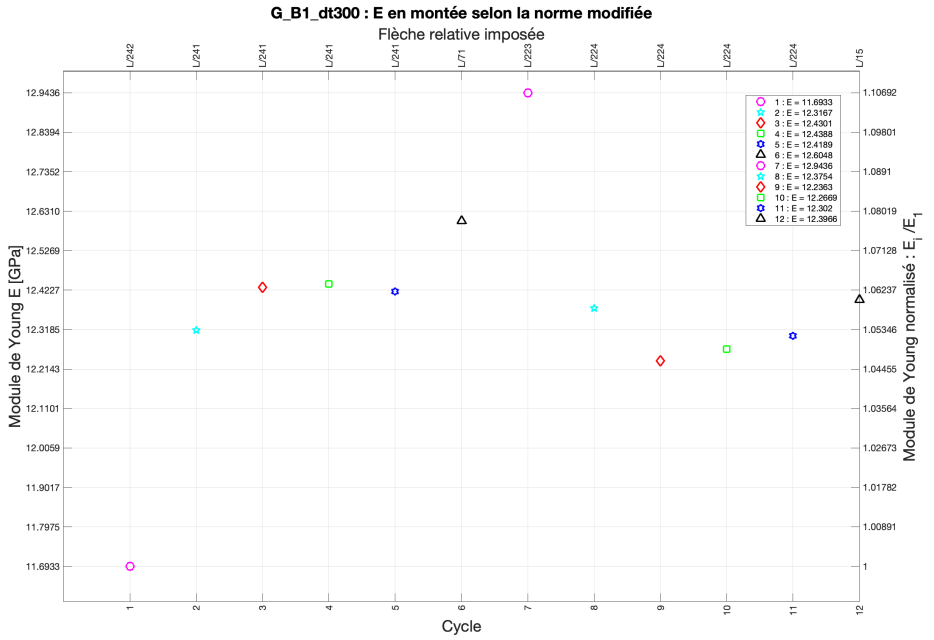


FIGURE M.515 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_B1_dt300 de la batterie 7

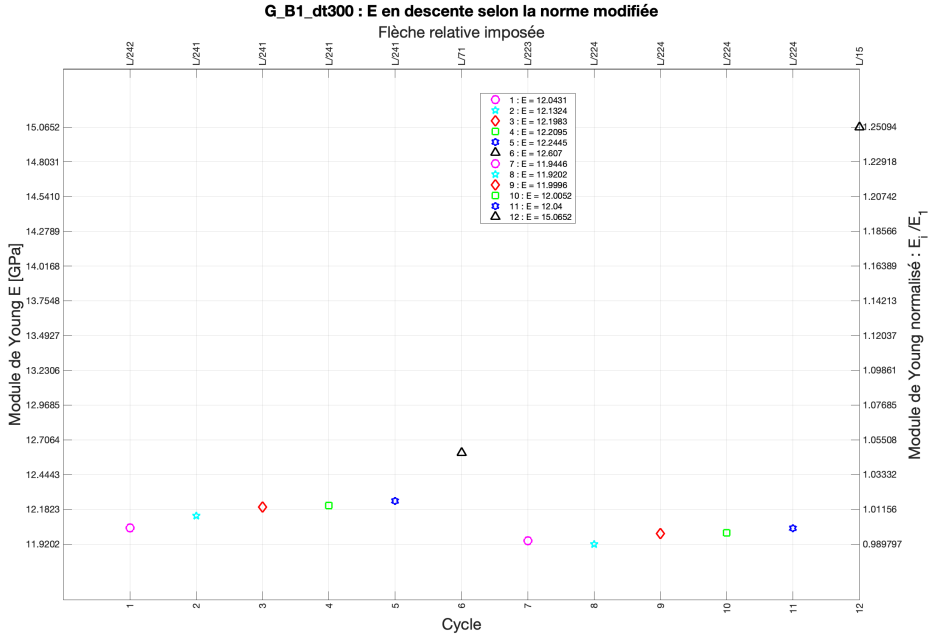


FIGURE M.516 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_B1_dt300 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

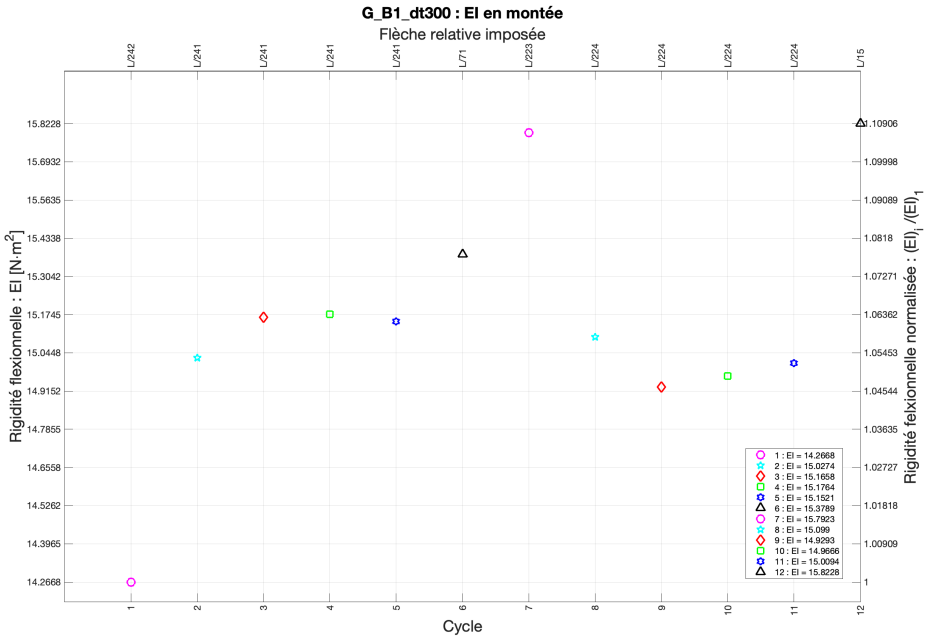


Figure M.517 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_B1_dt300 de la batterie 7

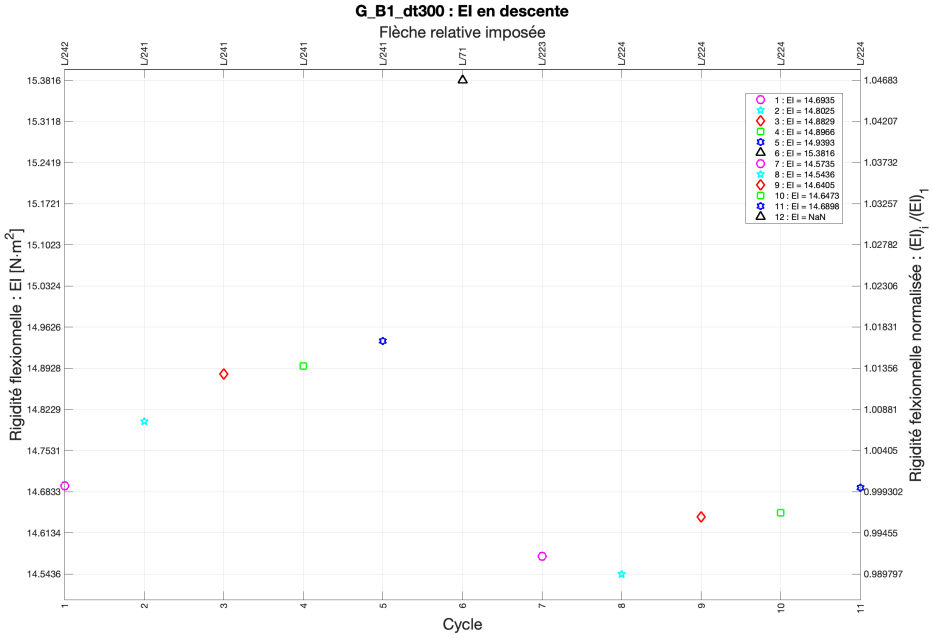


Figure M.518 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_B1_dt300 de la batterie 7

Fonction S

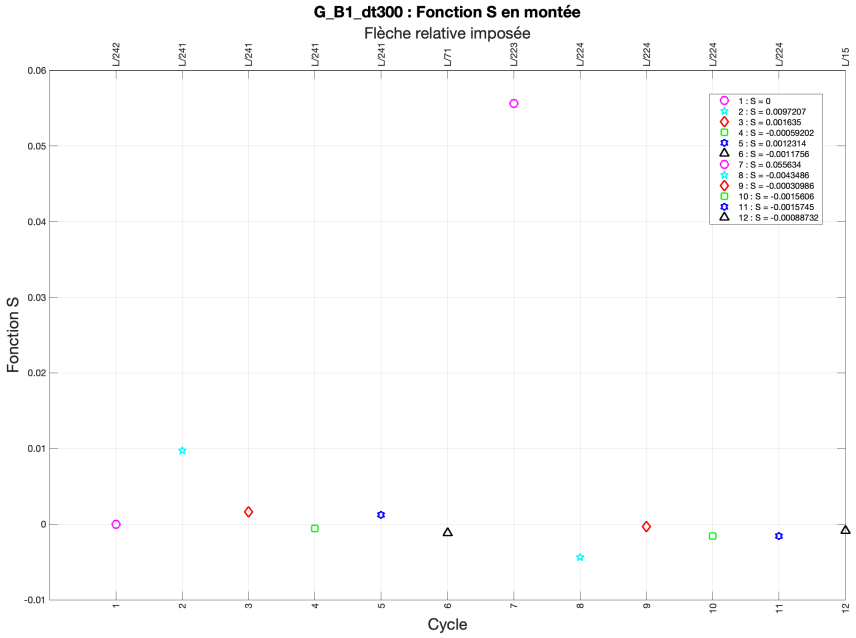


FIGURE M.519 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_B1_dt300 de la batterie 7

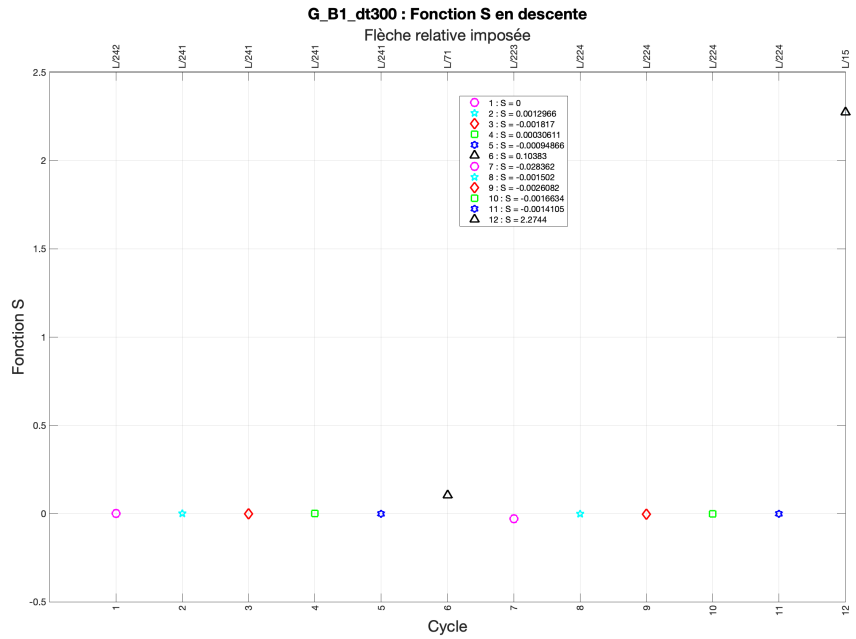


FIGURE M.520 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_B1_dt300 de la batterie 7

Éprouvette G_B3_dt000

Global

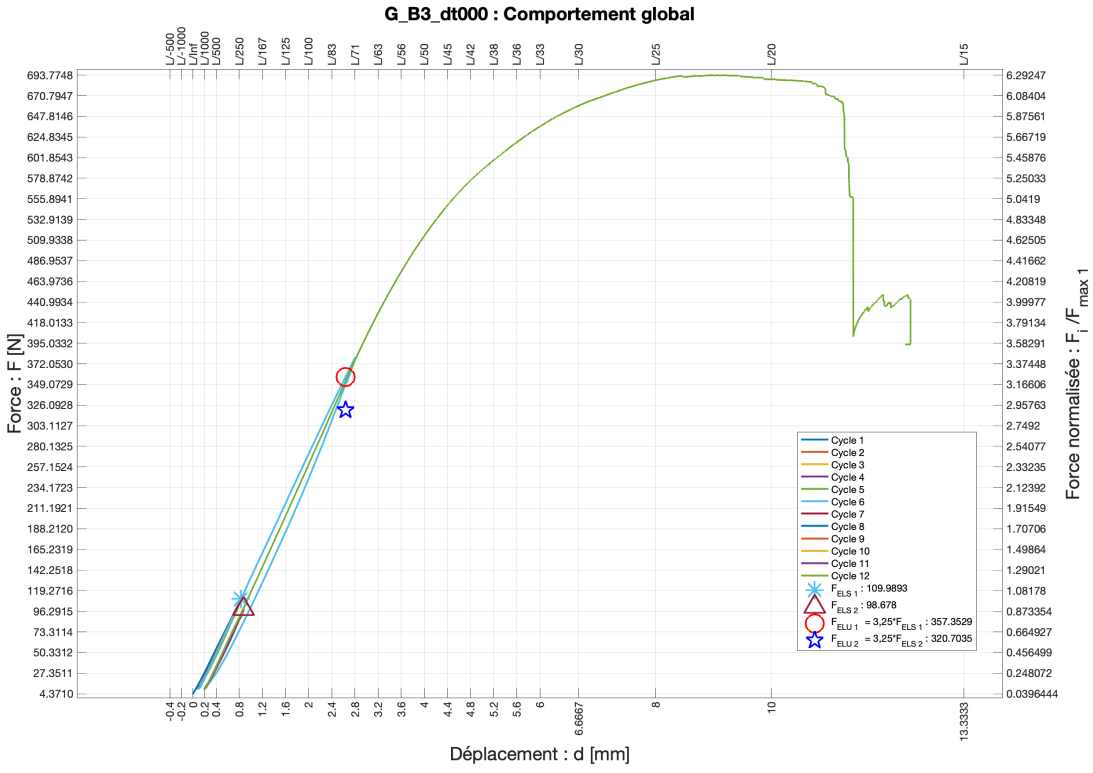


Figure M.521 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_B3_dt000 de la batterie 7

Déplacement résiduel

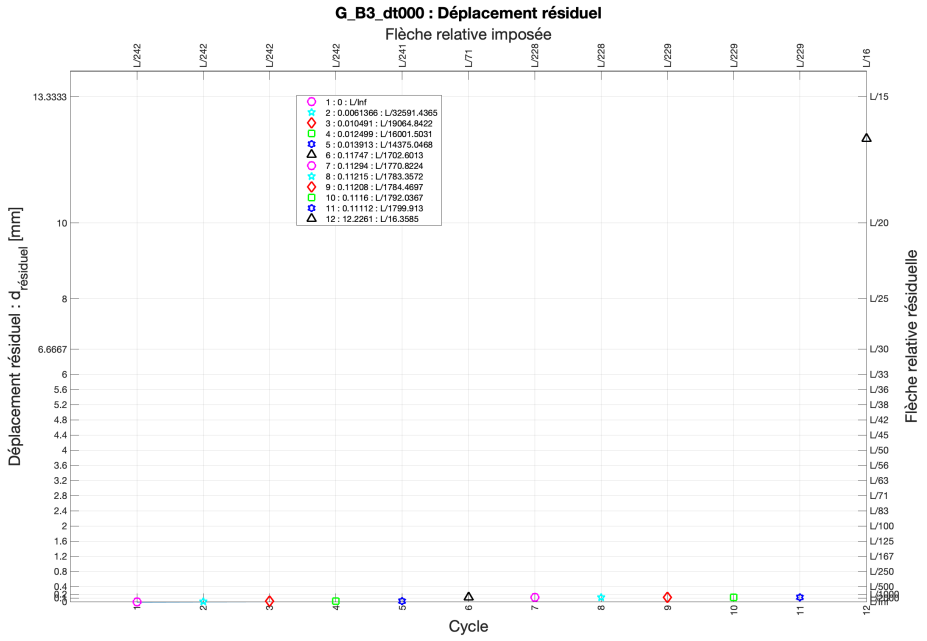


FIGURE M.522 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_B3_dt000 de la batterie 7

Force maximale

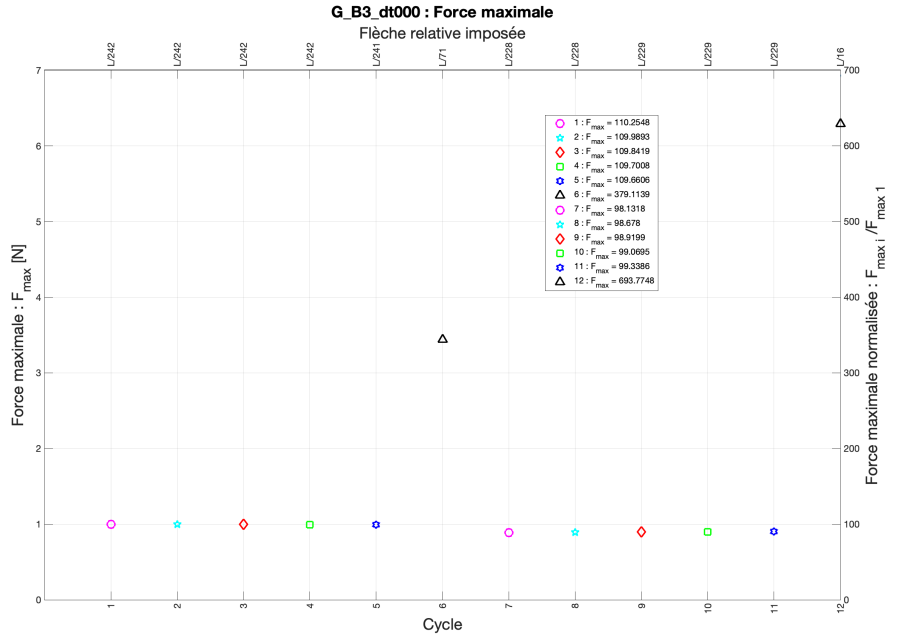


FIGURE M.523 – Force maximale de l'éprouvette G_B3_dt000 de la batterie 7

Module de Young

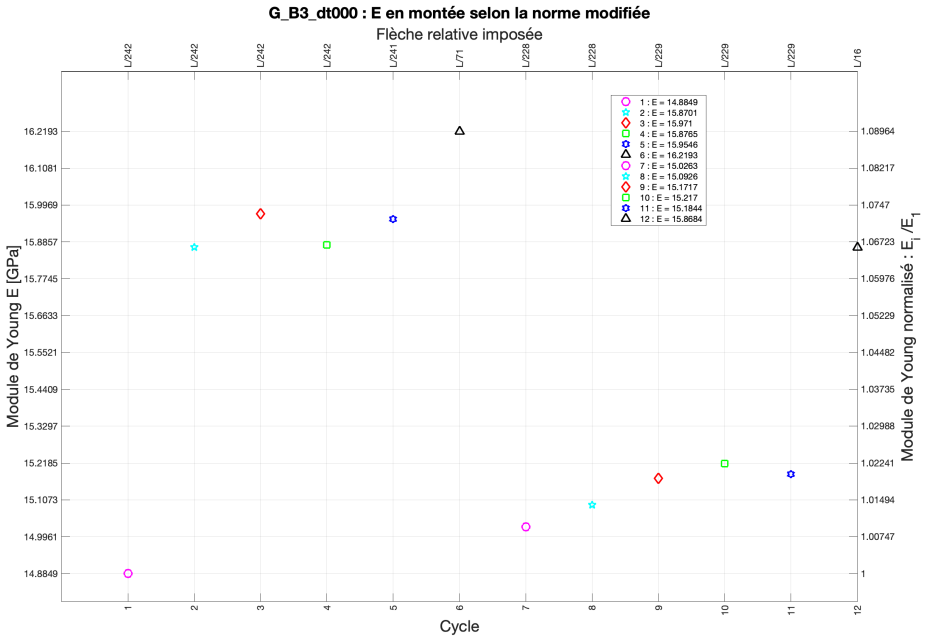


Figure M.524 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_B3_dt000 de la batterie 7

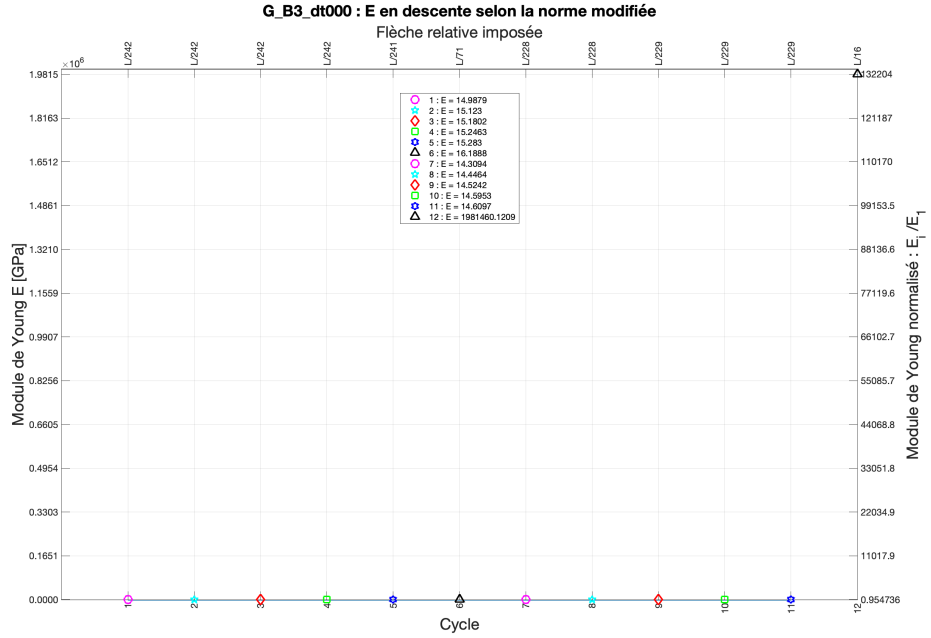


Figure M.525 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_B3_dt000 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

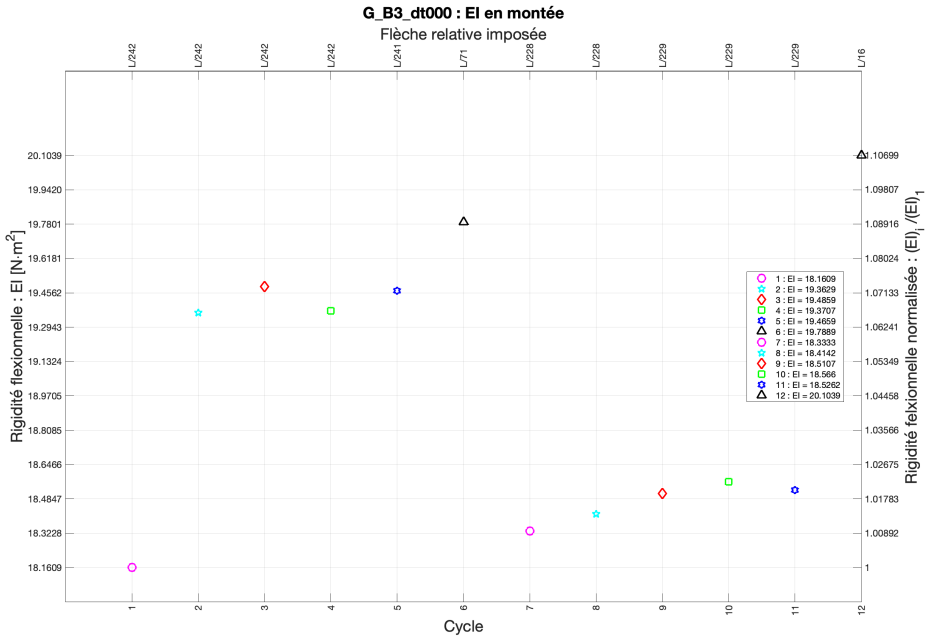


FIGURE M.526 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_B3_dt000 de la batterie 7

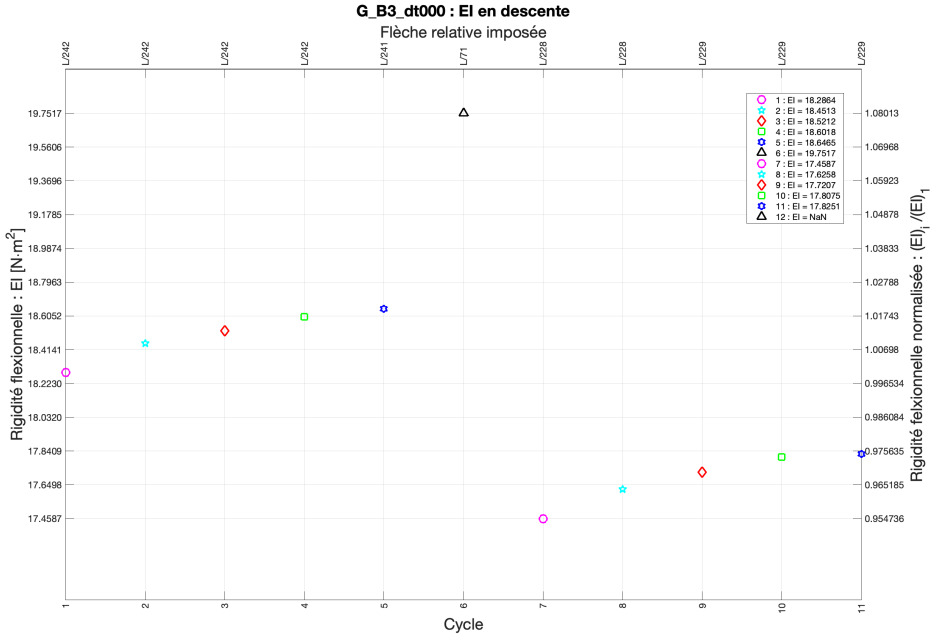


FIGURE M.527 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_B3_dt000 de la batterie 7

Fonction S

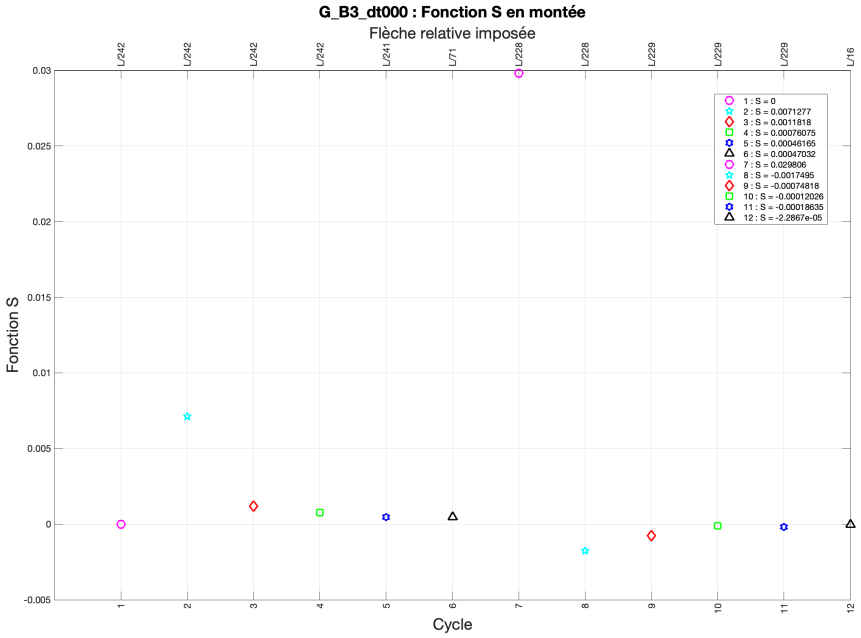


Figure M.528 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_B3_dt000 de la batterie 7

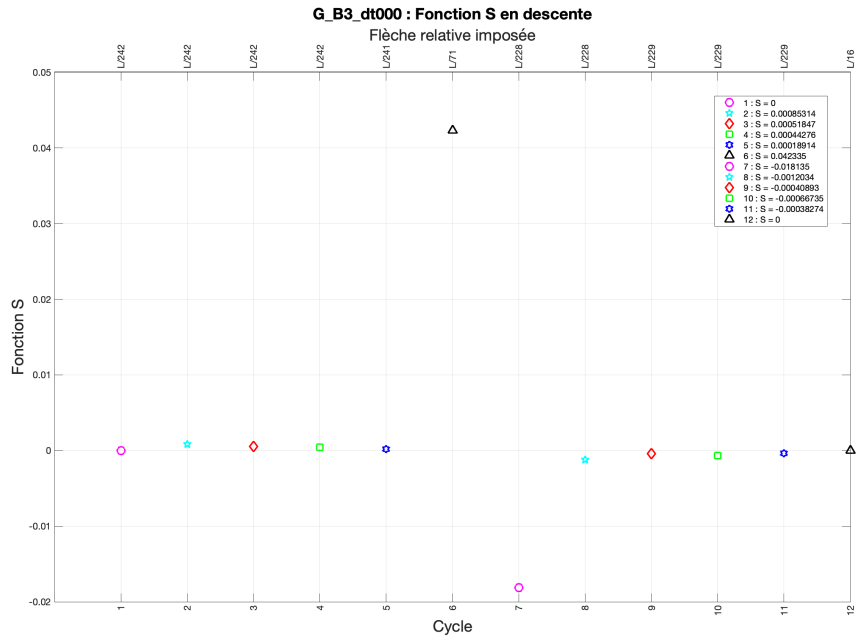


Figure M.529 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_B3_dt000 de la batterie 7

Éprouvette G_B3_dt300

Global

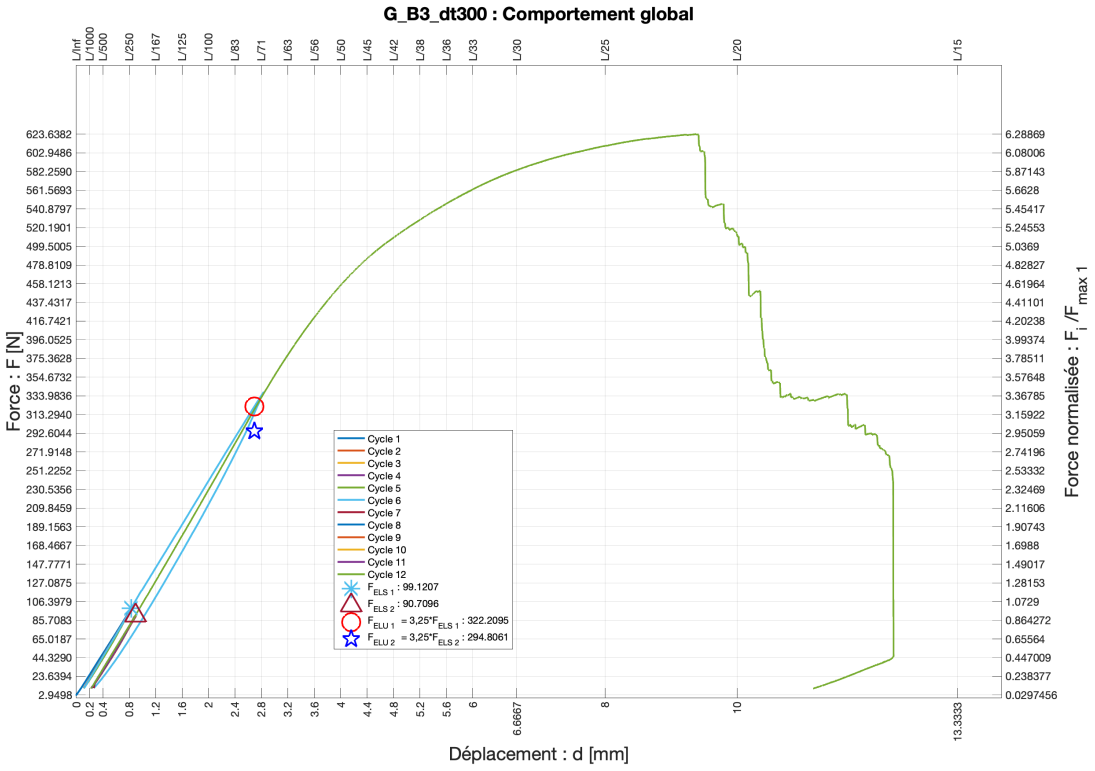


FIGURE M.530 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_B3_dt300 de la batterie 7

Déplacement résiduel

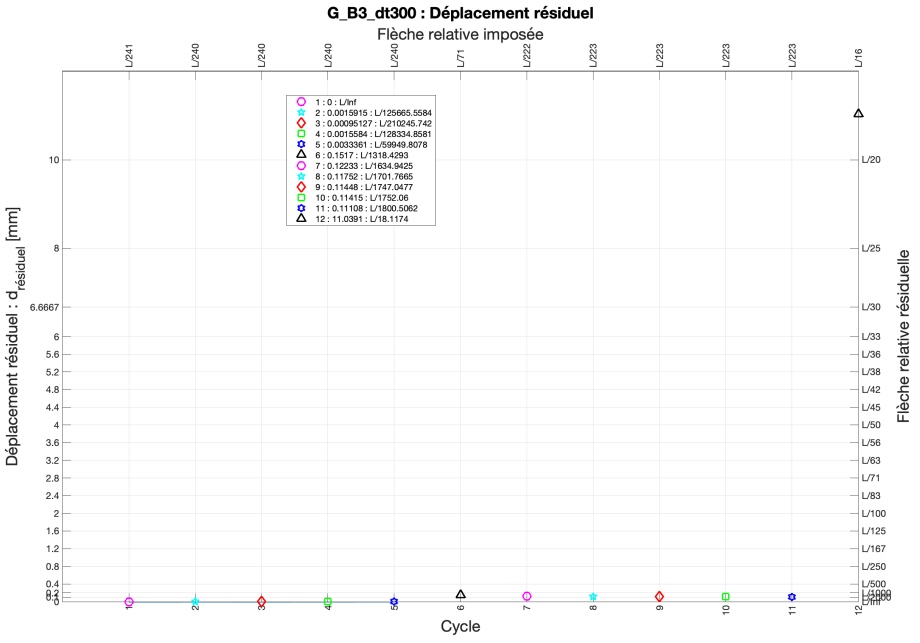


Figure M.531 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_B3_dt300 de la batterie 7

Force maximale

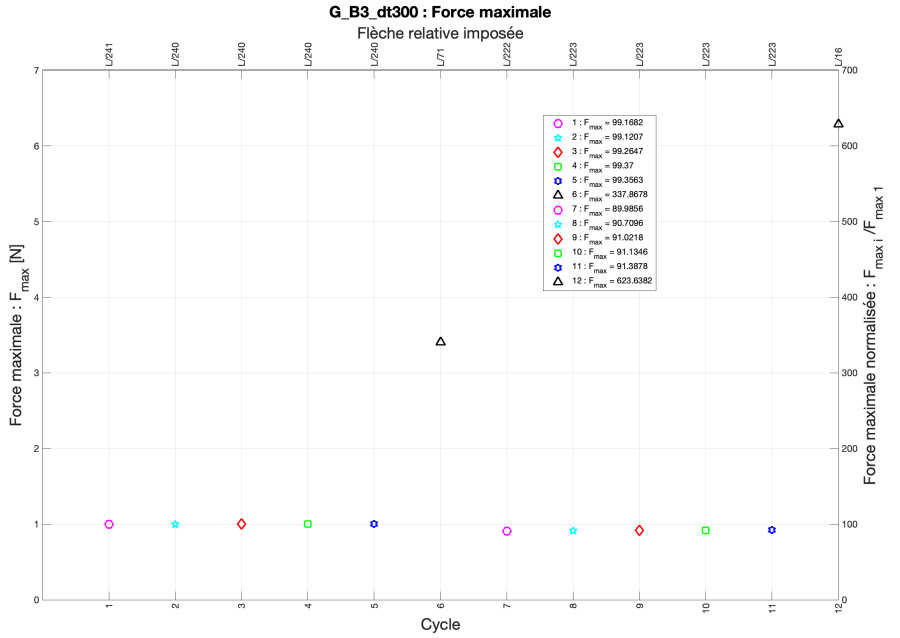


Figure M.532 – Force maximale de l'éprouvette G_B3_dt300 de la batterie 7

Module de Young

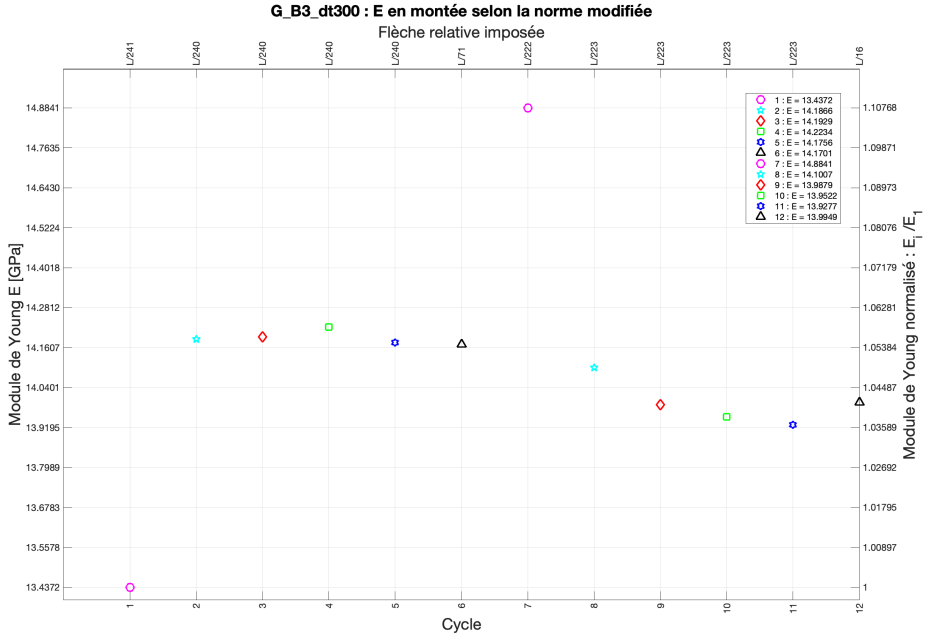


FIGURE M.533 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_B3_dt300 de la batterie 7

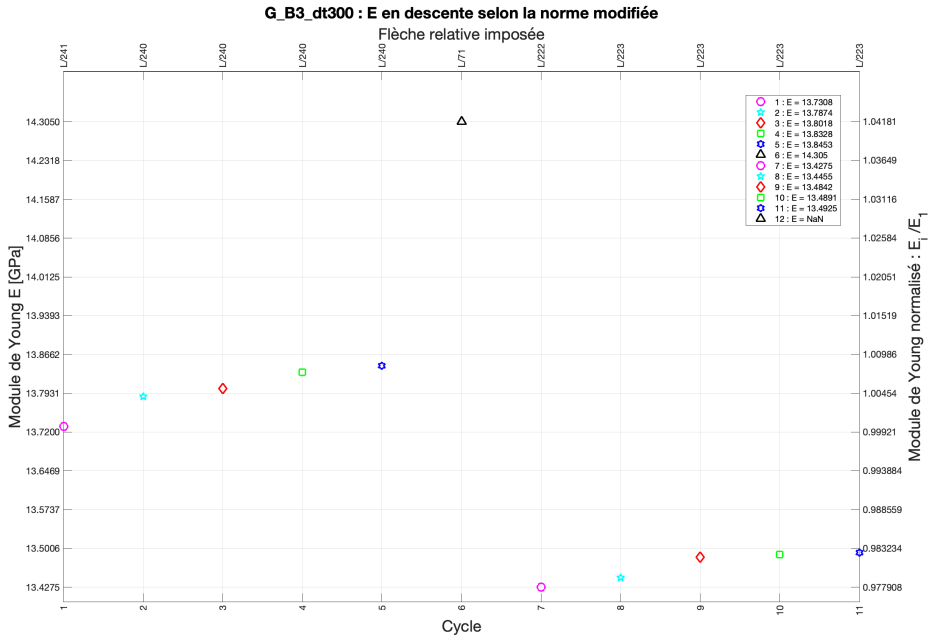


FIGURE M.534 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_B3_dt300 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

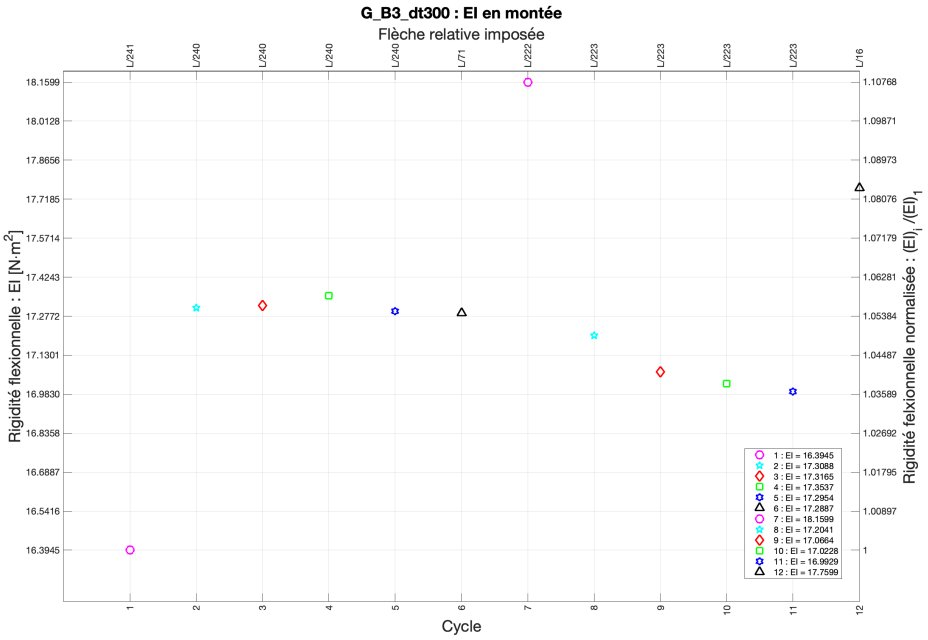


Figure M.535 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_B3_dt300 de la batterie 7

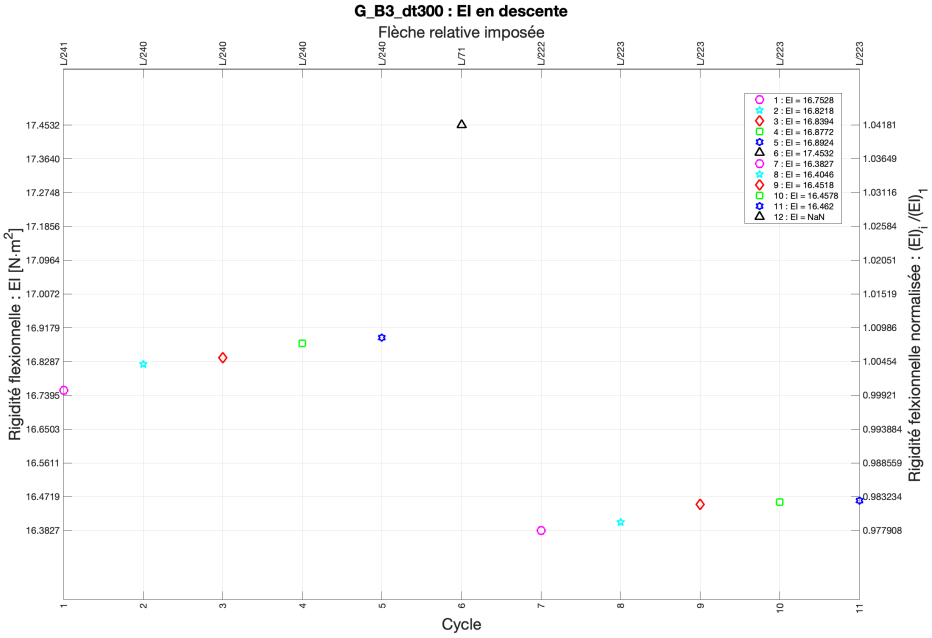


Figure M.536 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_B3_dt300 de la batterie 7

Fonction S

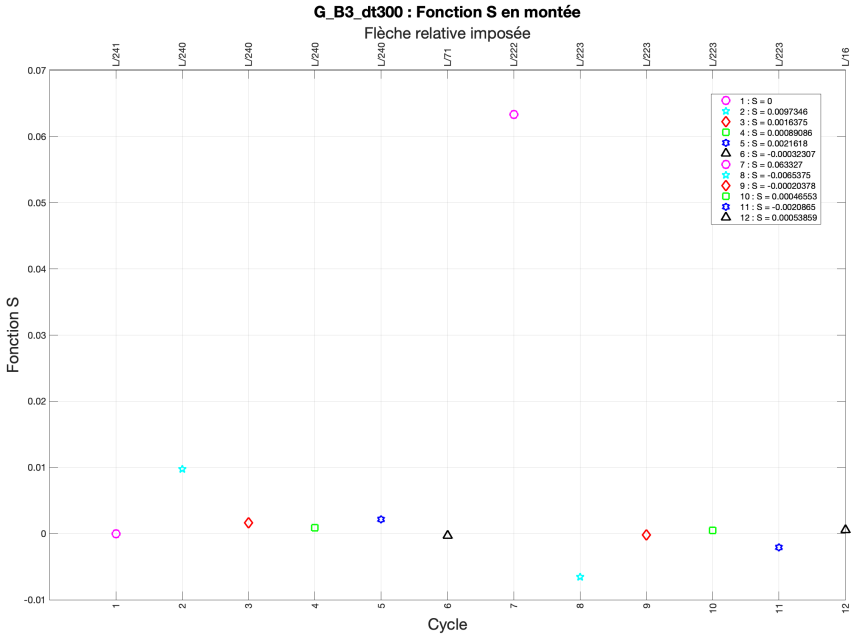


FIGURE M.537 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_B3_dt300 de la batterie 7

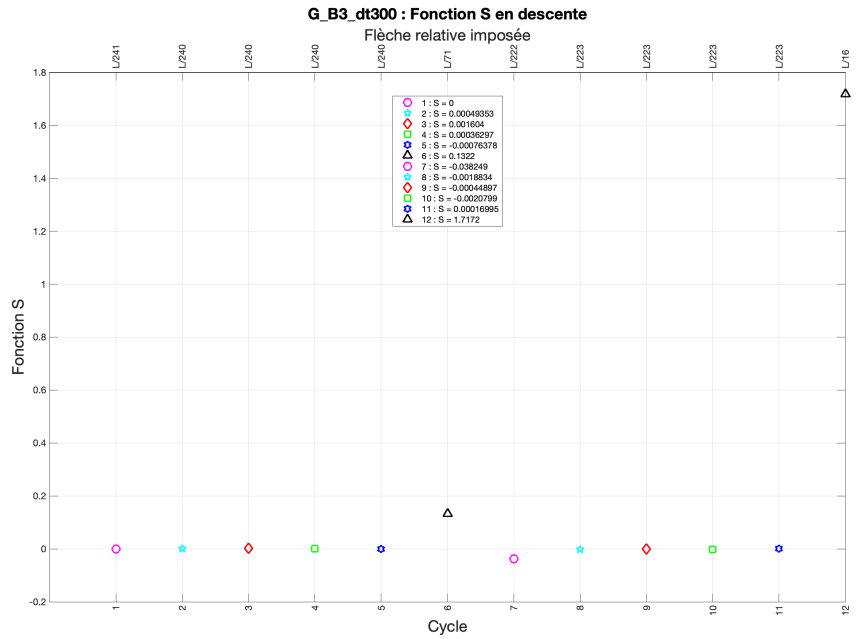


FIGURE M.538 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_B3_dt300 de la batterie 7

Éprouvette G_B4_dt000

Global

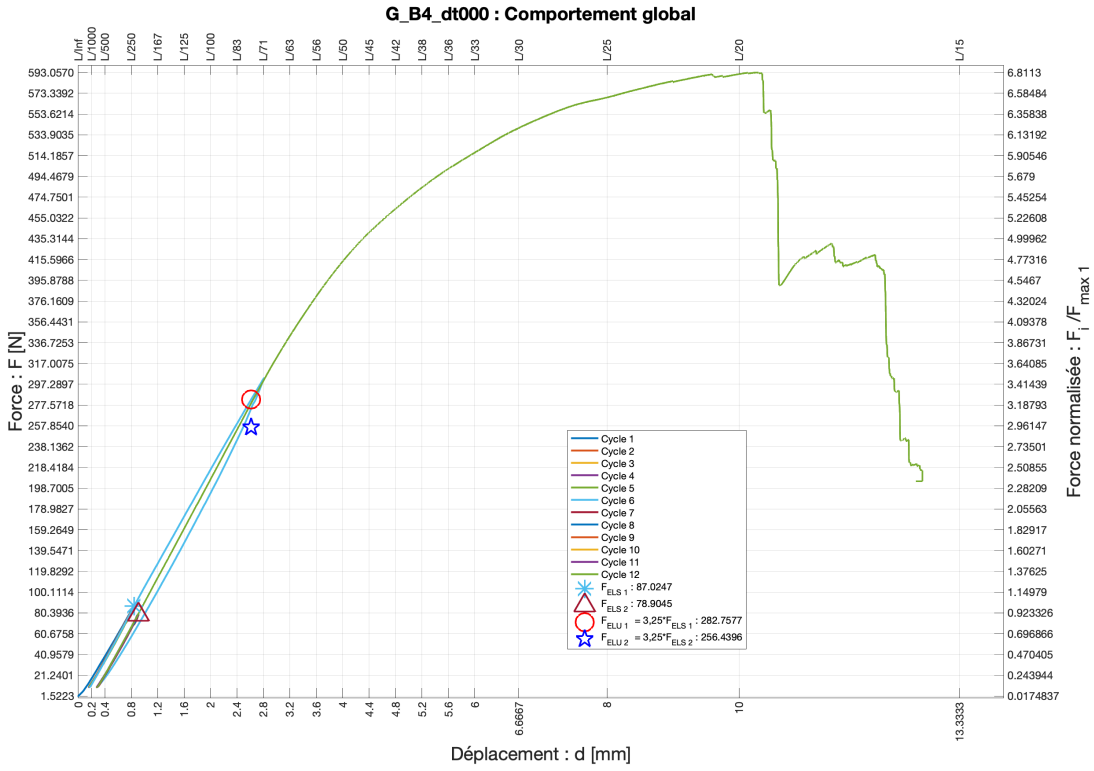


Figure M.539 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_B4_dt000 de la batterie 7

Déplacement résiduel

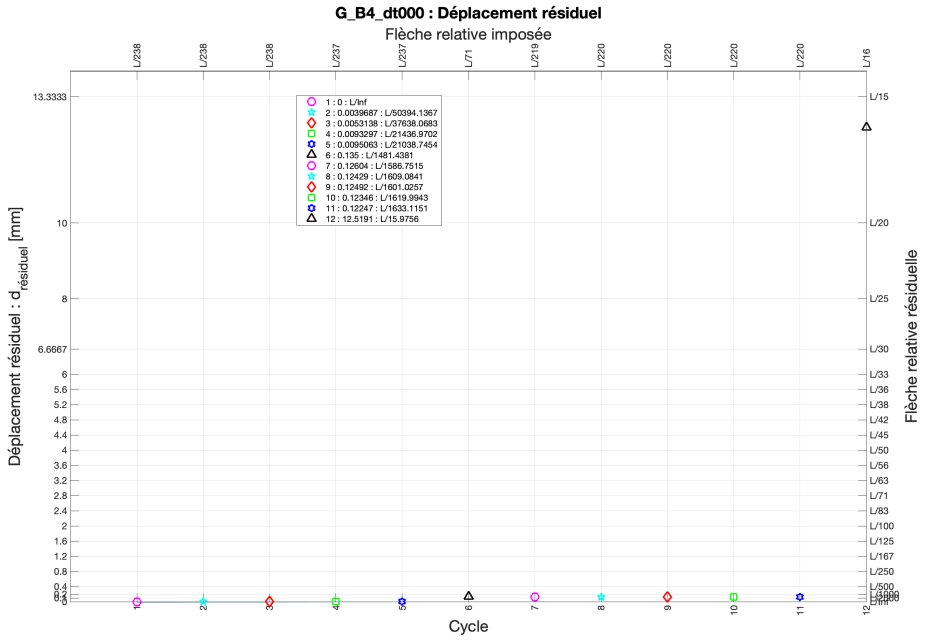


FIGURE M.540 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_B4_dt000 de la batterie 7

Force maximale

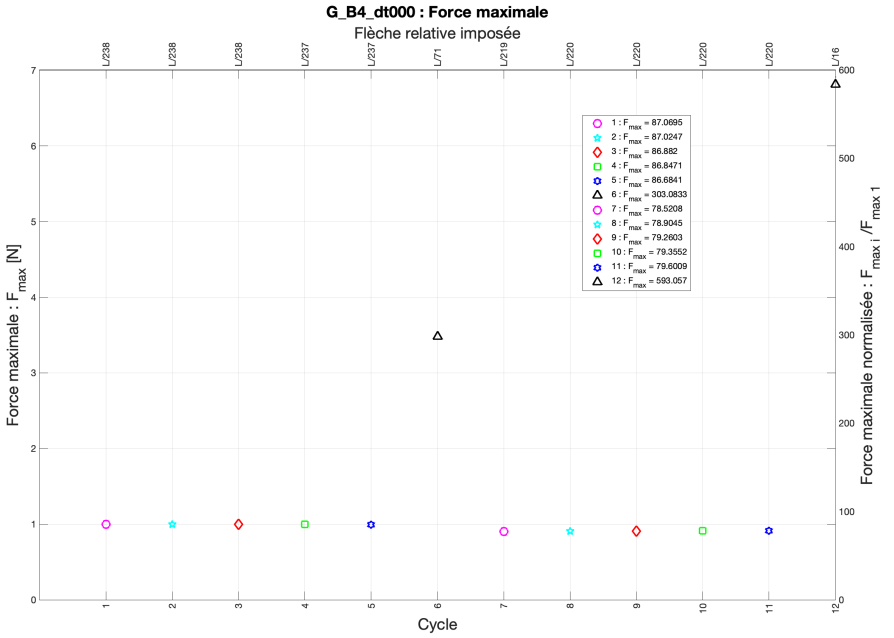


FIGURE M.541 – Force maximale de l'éprouvette G_B4_dt000 de la batterie 7

Module de Young

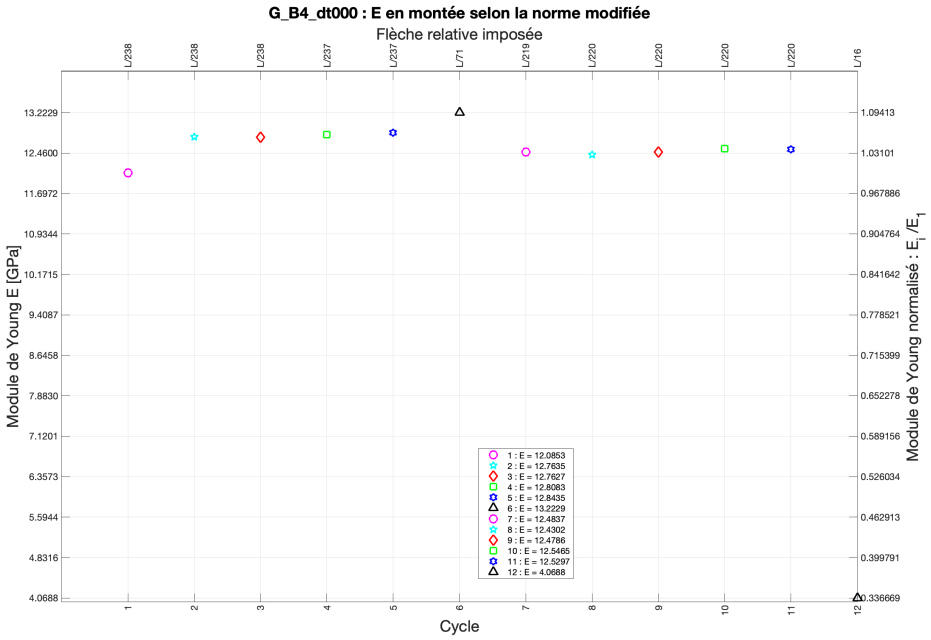


Figure M.542 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_B4_dt000 de la batterie 7

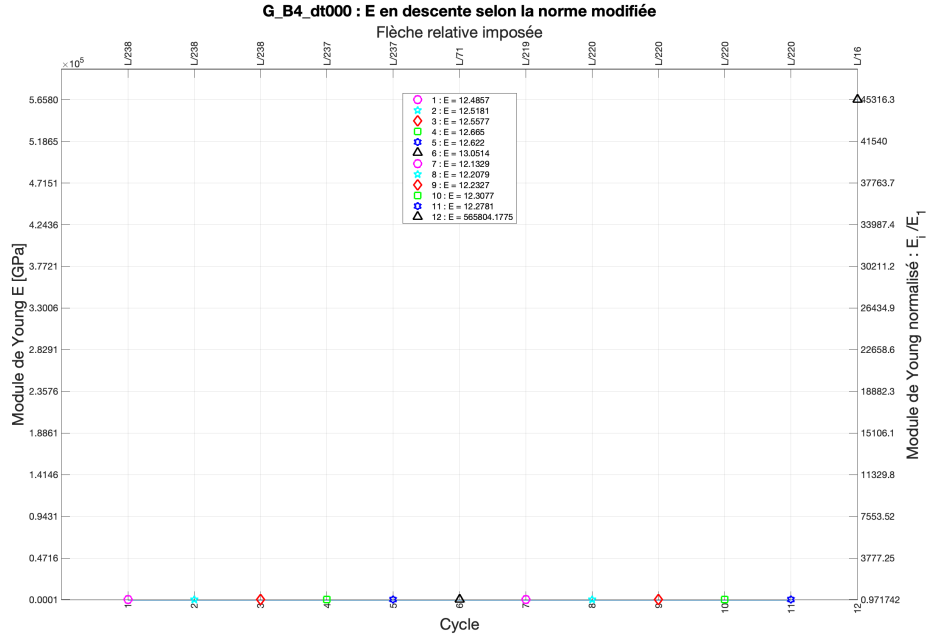


Figure M.543 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_B4_dt000 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

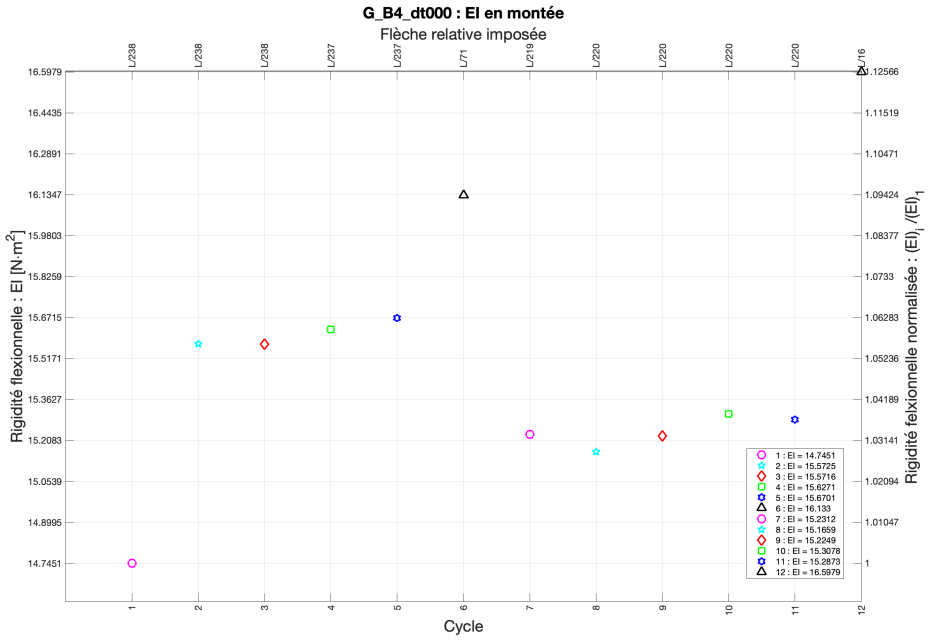


FIGURE M.544 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_B4_dt000 de la batterie 7

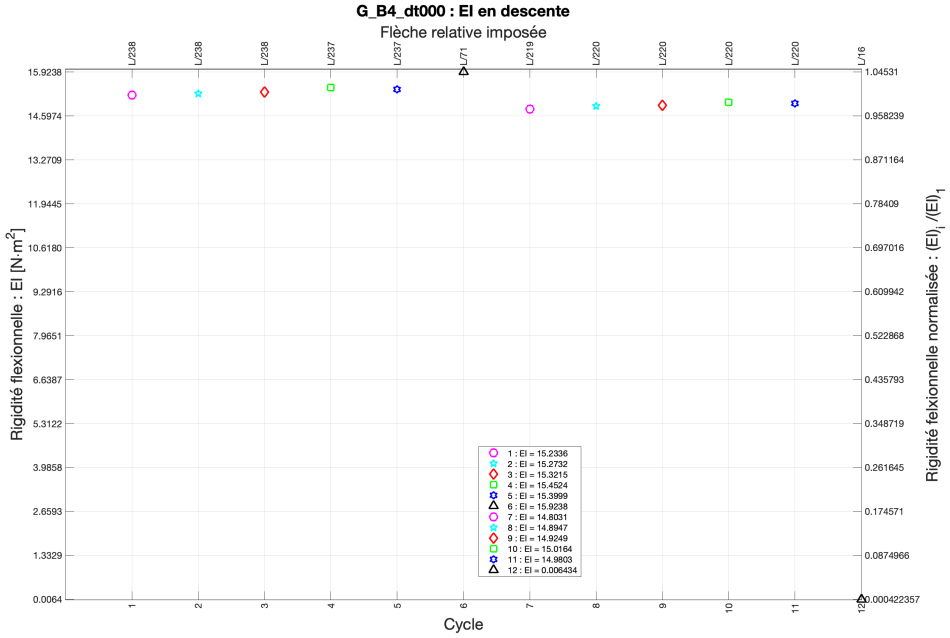


FIGURE M.545 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_B4_dt000 de la batterie 7

Fonction S

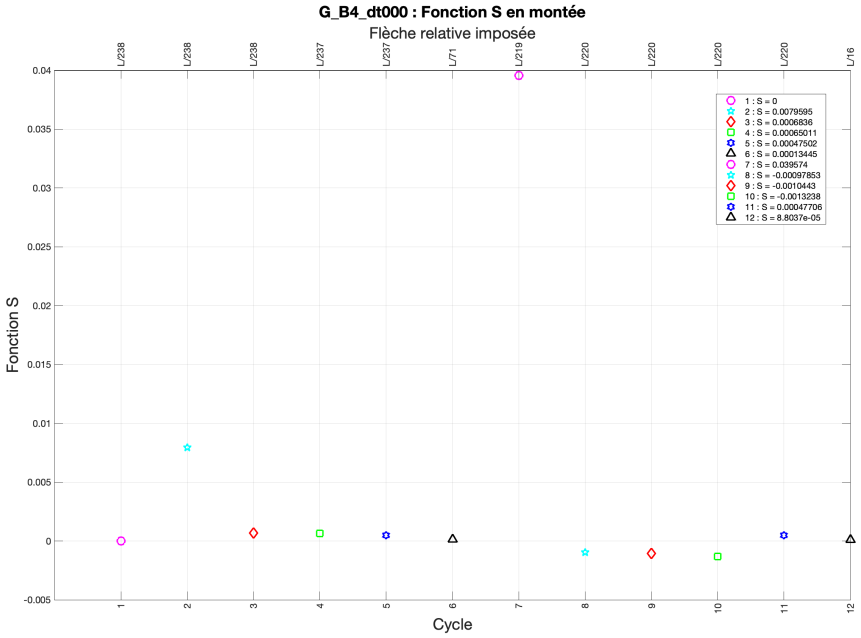


Figure M.546 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_B4_dt000 de la batterie 7

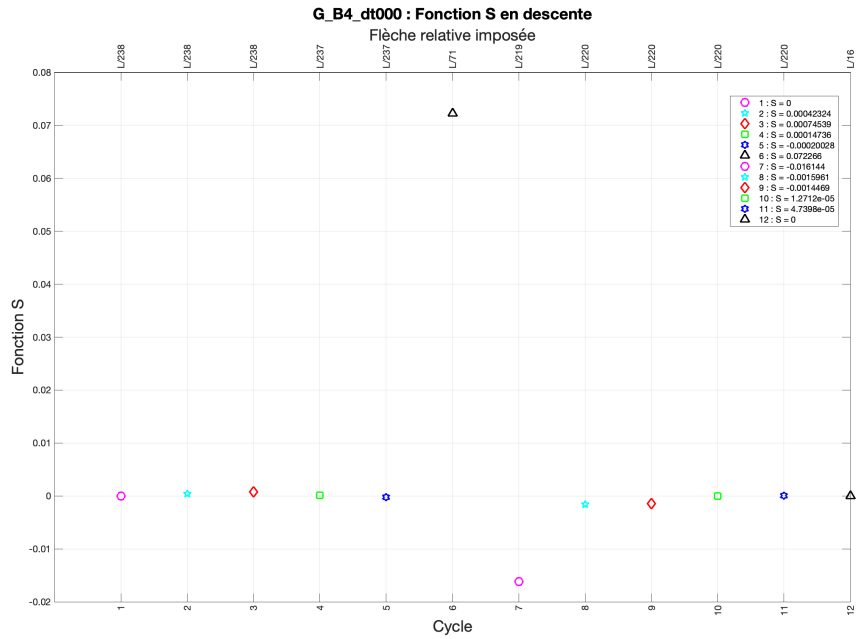


Figure M.547 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_B4_dt000 de la batterie 7

Éprouvette G_B4_dt300

Global

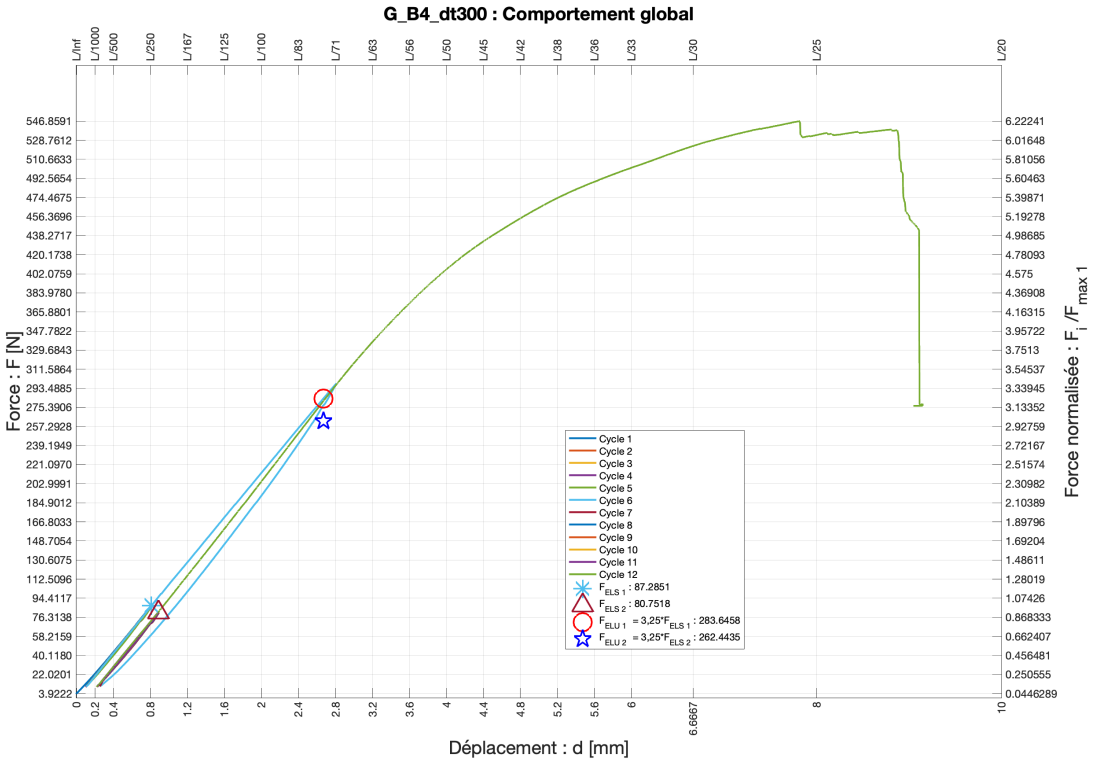


FIGURE M.548 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_B4_dt300 de la batterie 7

Déplacement résiduel

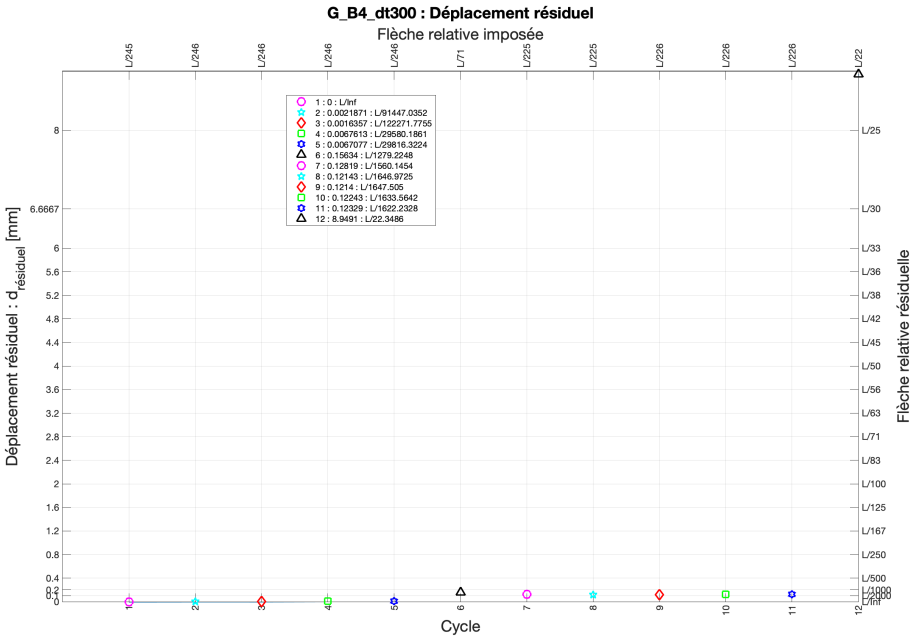


Figure M.549 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_B4_dt300 de la batterie 7

Force maximale

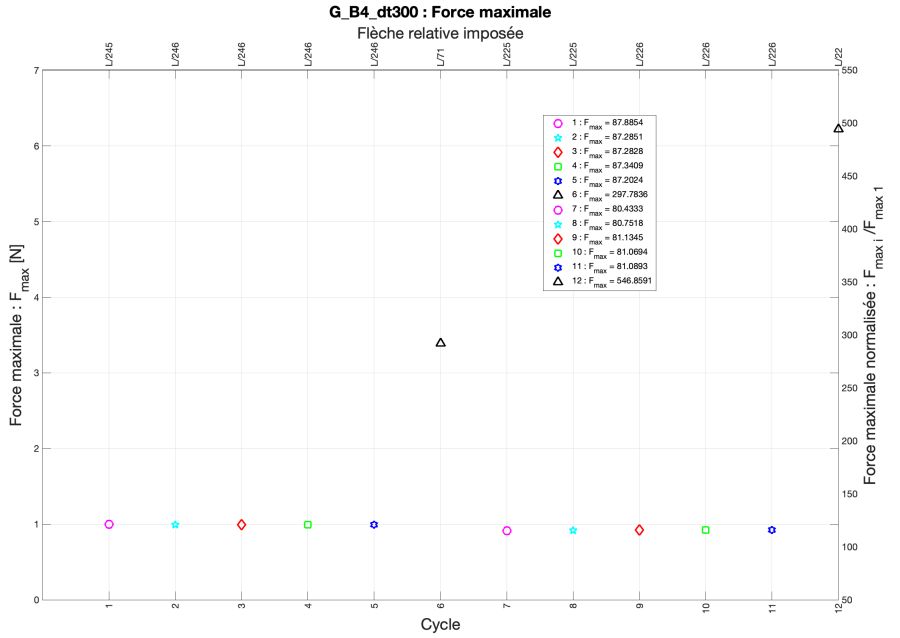


Figure M.550 – Force maximale de l'éprouvette G_B4_dt300 de la batterie 7

Module de Young

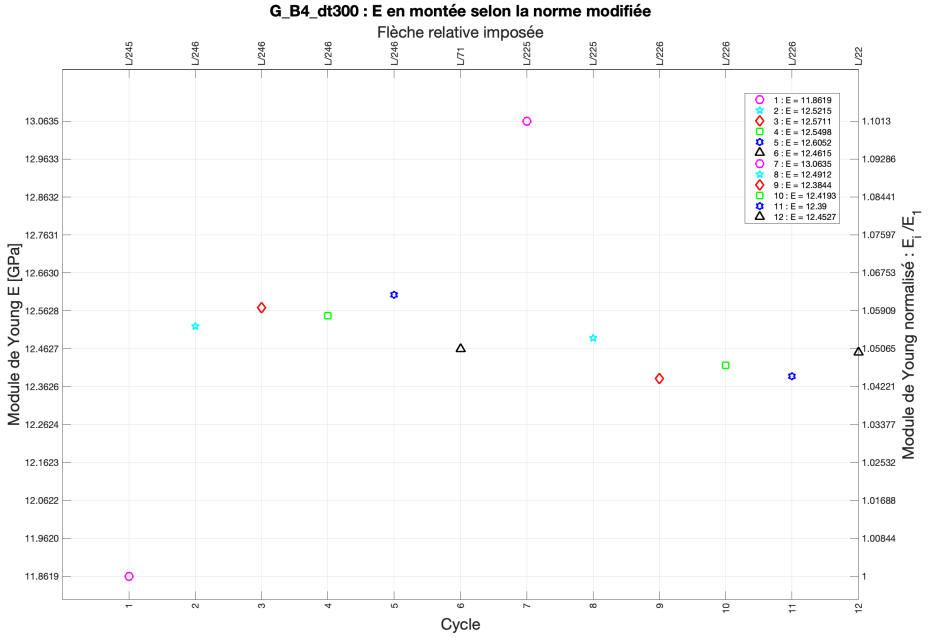


FIGURE M.551 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_B4_dt300 de la batterie 7

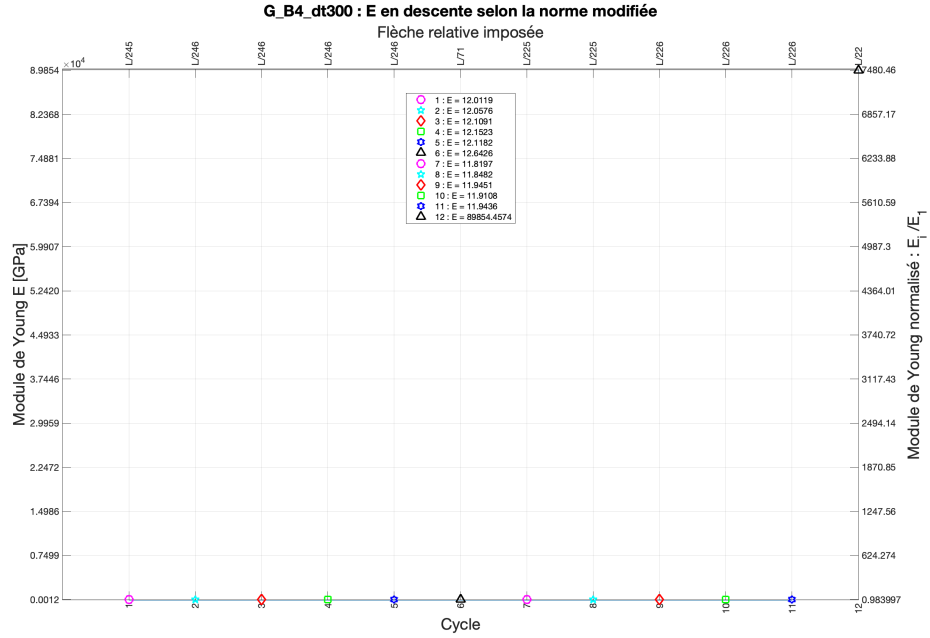


FIGURE M.552 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_B4_dt300 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

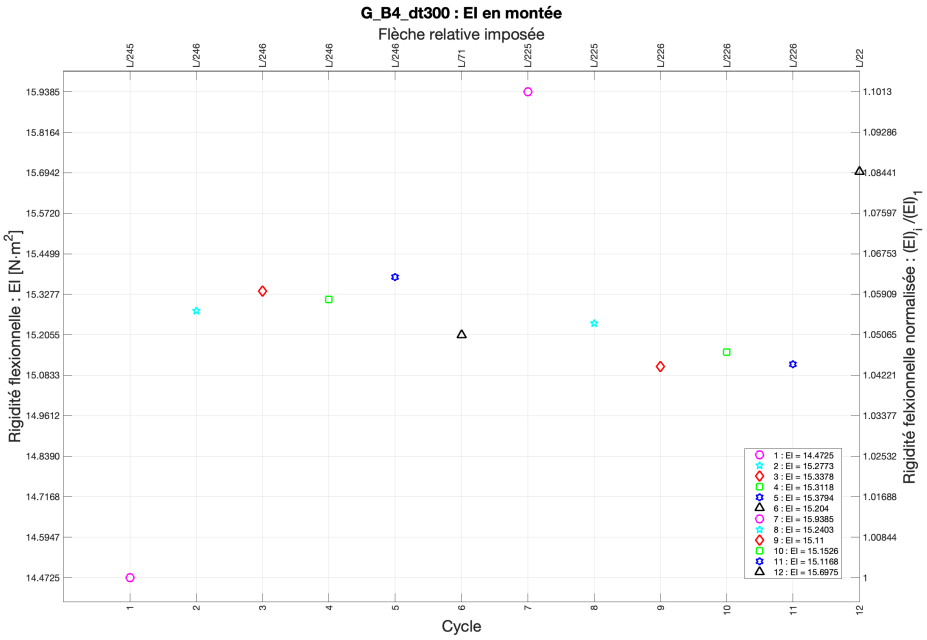


Figure M.553 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_B4_dt300 de la batterie 7

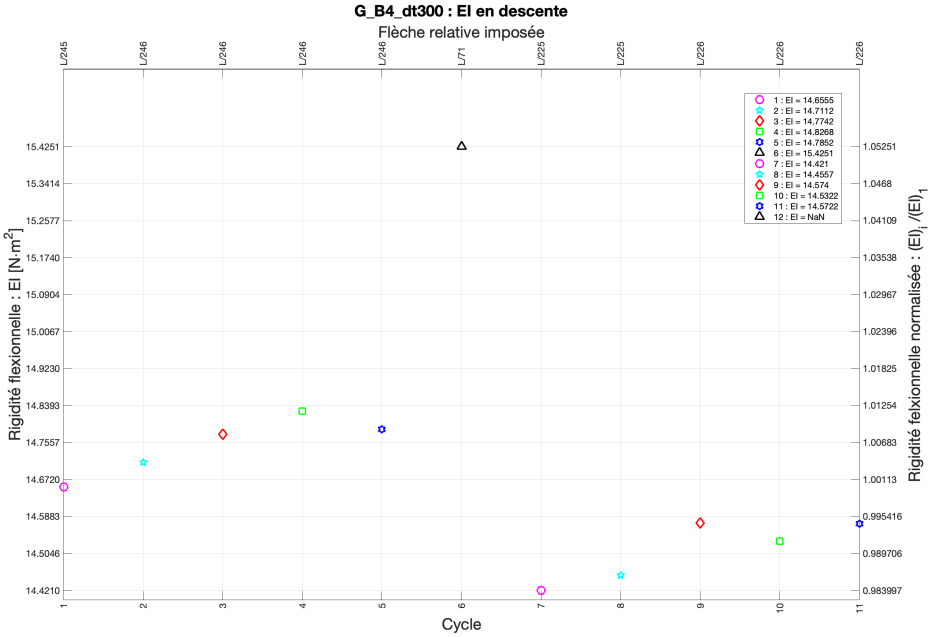


Figure M.554 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_B4_dt300 de la batterie 7

Fonction S

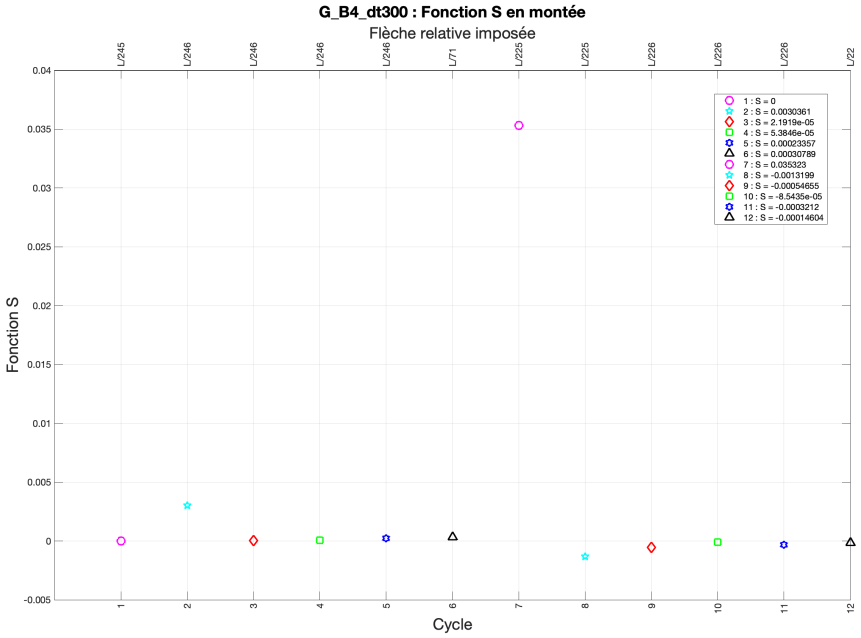


FIGURE M.555 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_B4_dt300 de la batterie 7

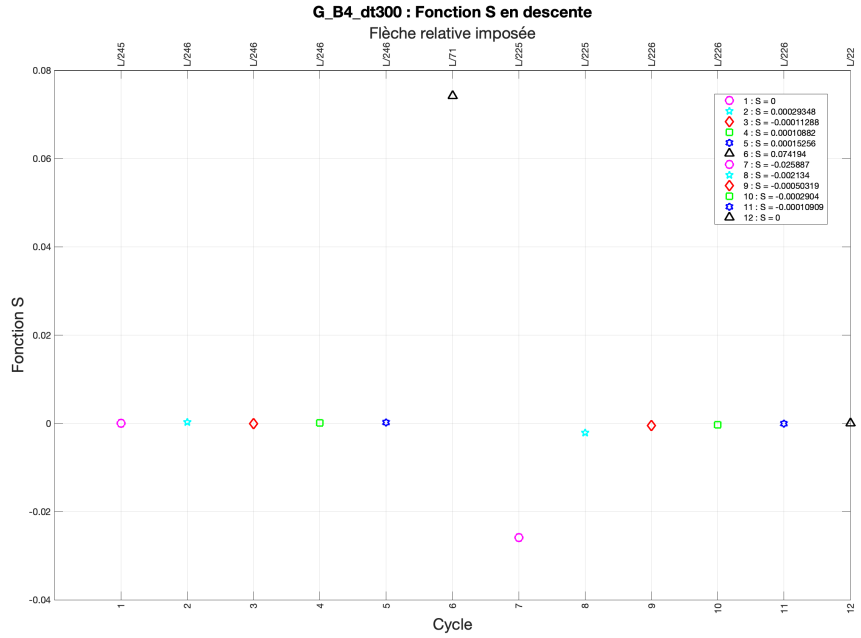


FIGURE M.556 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_B4_dt300 de la batterie 7

Éprouvette G_B5_dt000

Global

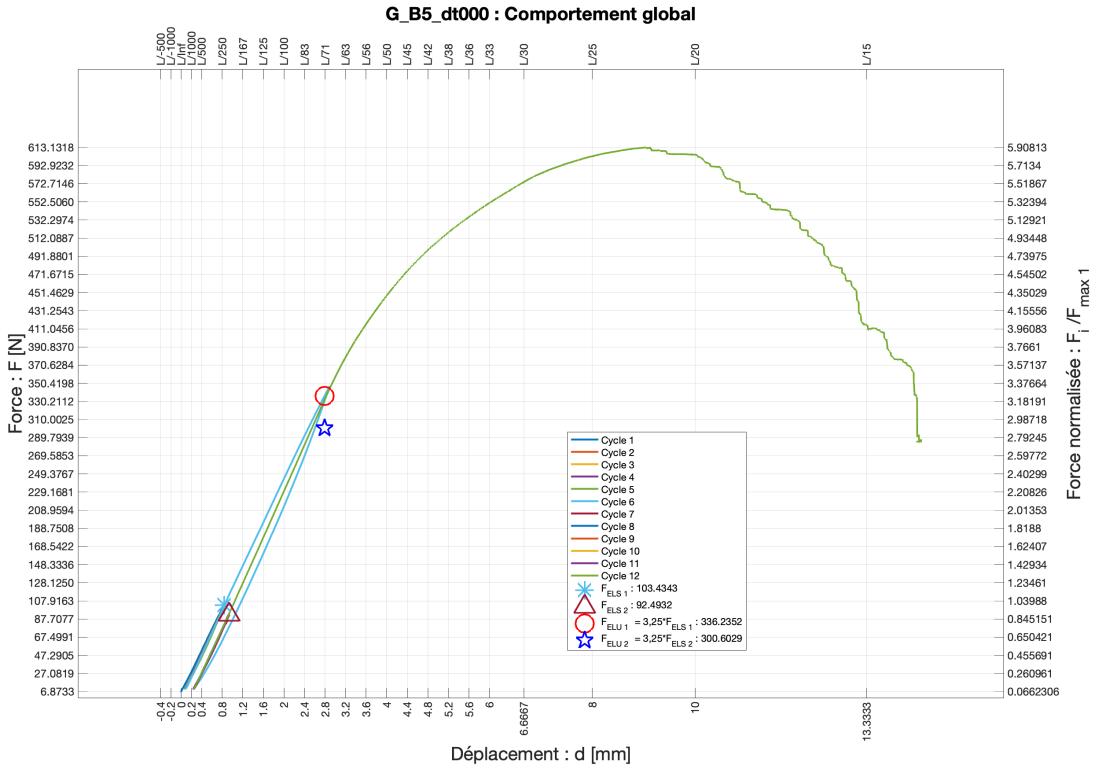


Figure M.557 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_B5_dt000 de la batterie 7

Déplacement résiduel

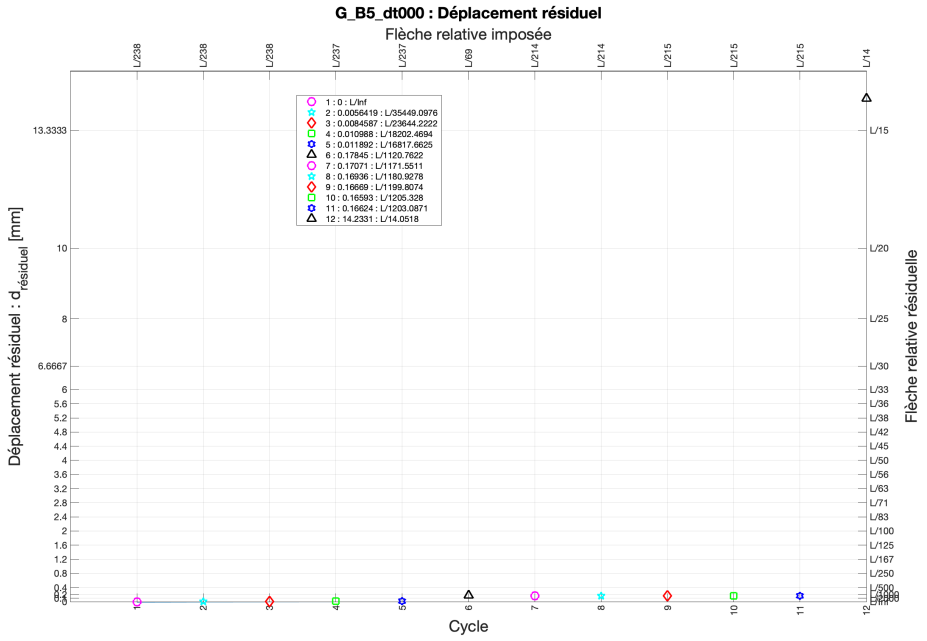


FIGURE M.558 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_B5_dt000 de la batterie 7

Force maximale

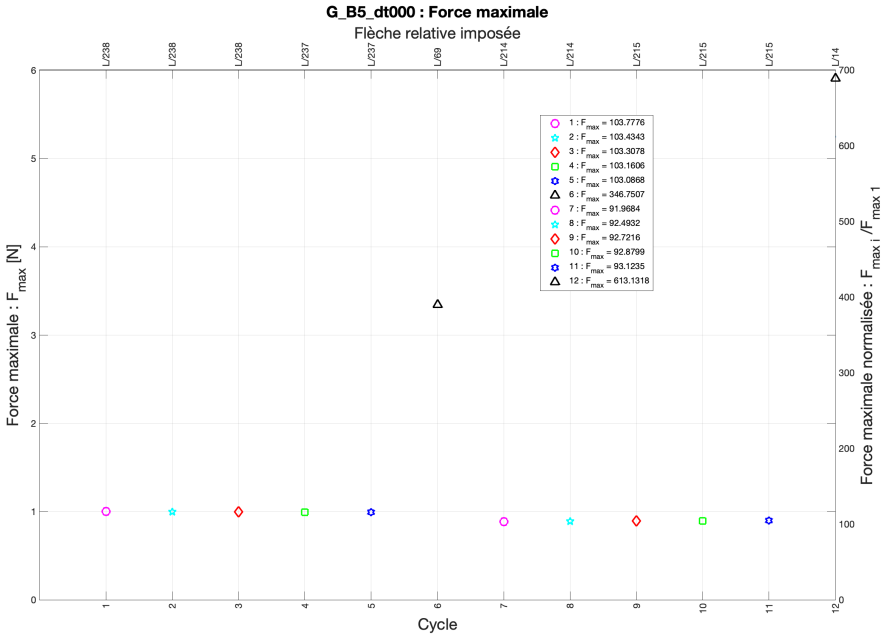


FIGURE M.559 – Force maximale de l'éprouvette G_B5_dt000 de la batterie 7

Module de Young

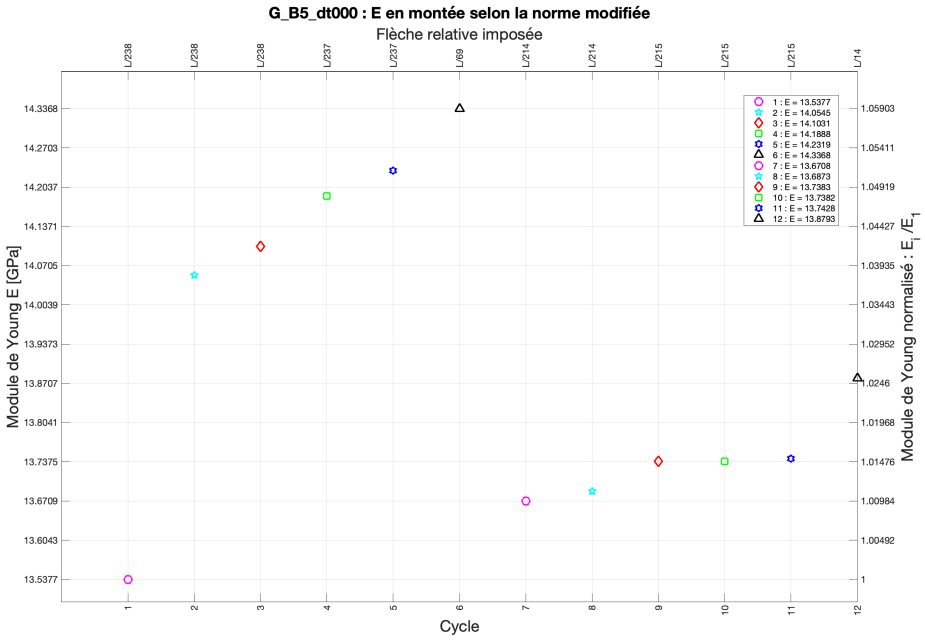


Figure M.560 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_B5_dt000 de la batterie 7

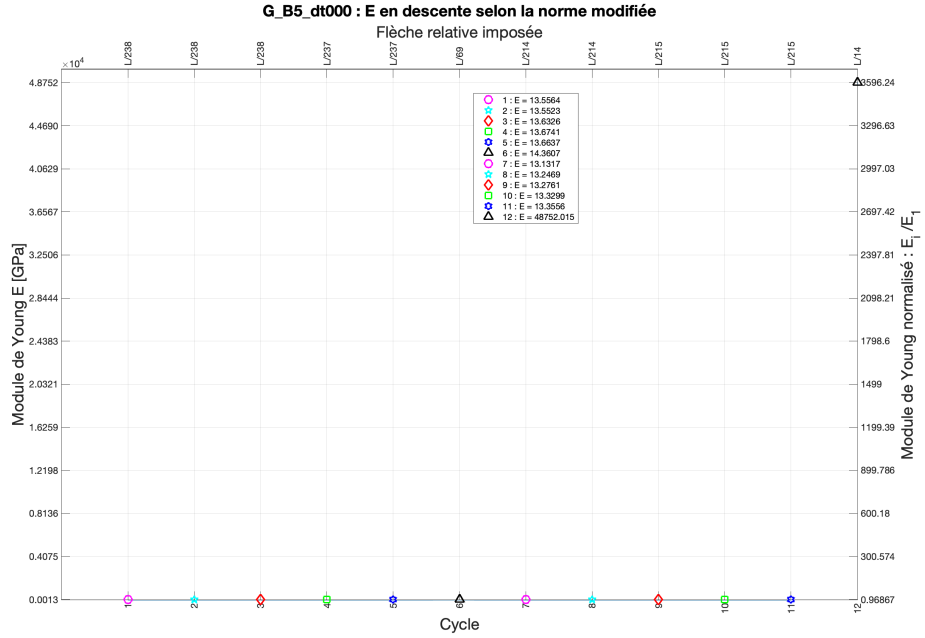


Figure M.561 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_B5_dt000 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

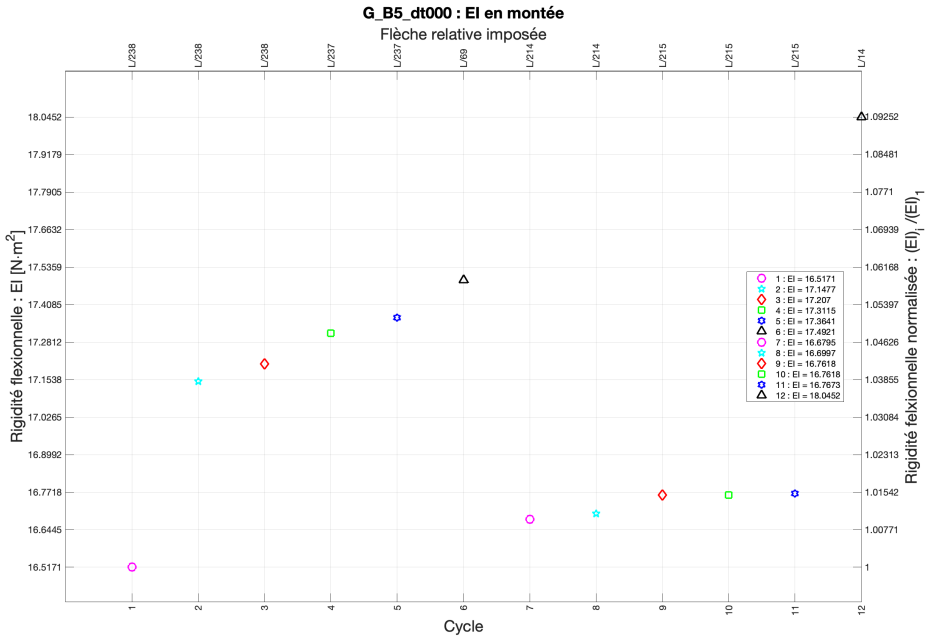


FIGURE M.562 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_B5_dt000 de la batterie 7

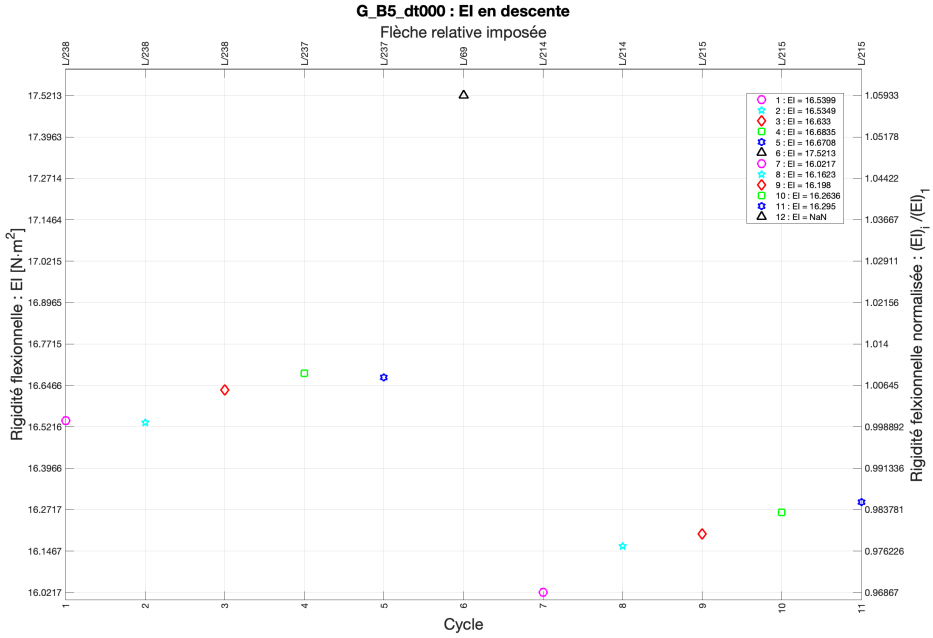


FIGURE M.563 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_B5_dt000 de la batterie 7

Fonction S

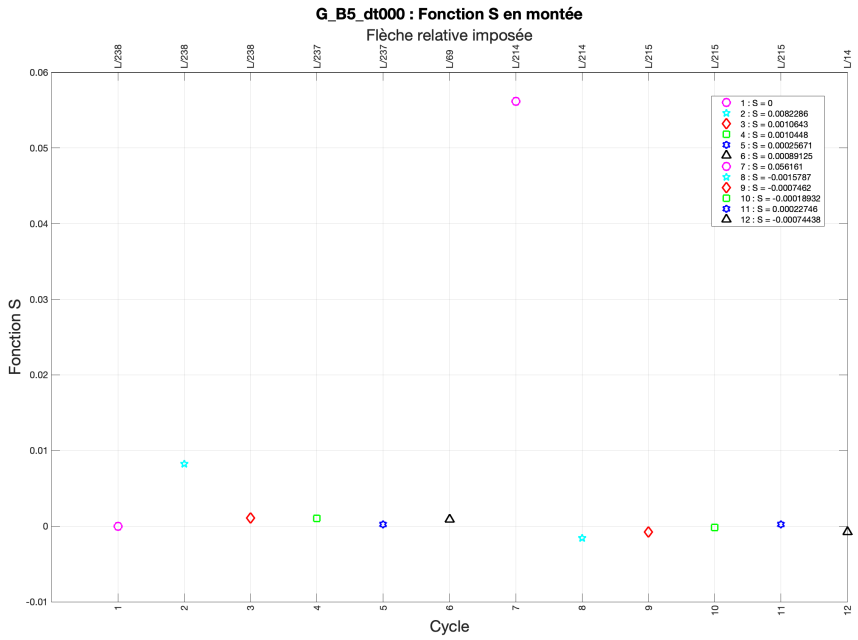


Figure M.564 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_B5_dt000 de la batterie 7

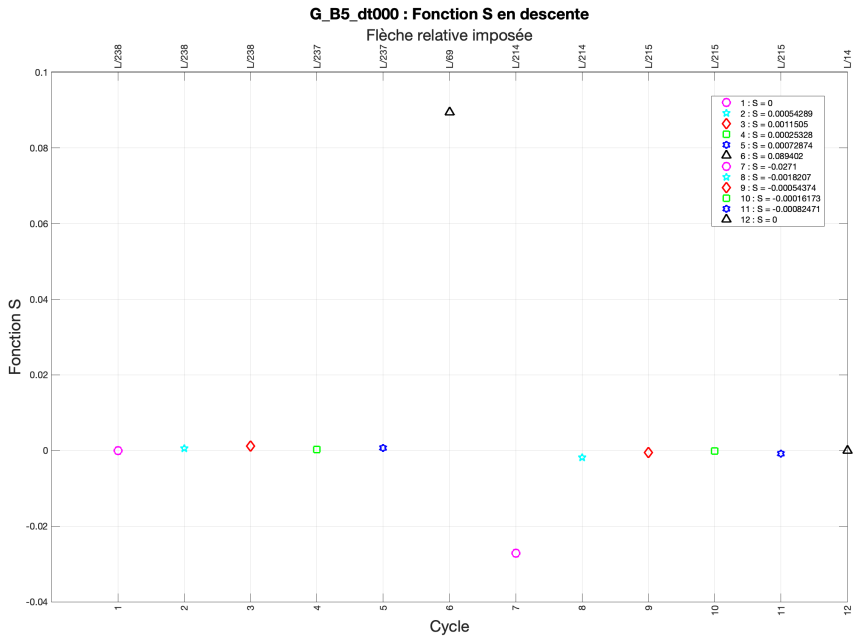


Figure M.565 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_B5_dt000 de la batterie 7

Éprouvette G_B5_dt300

Global

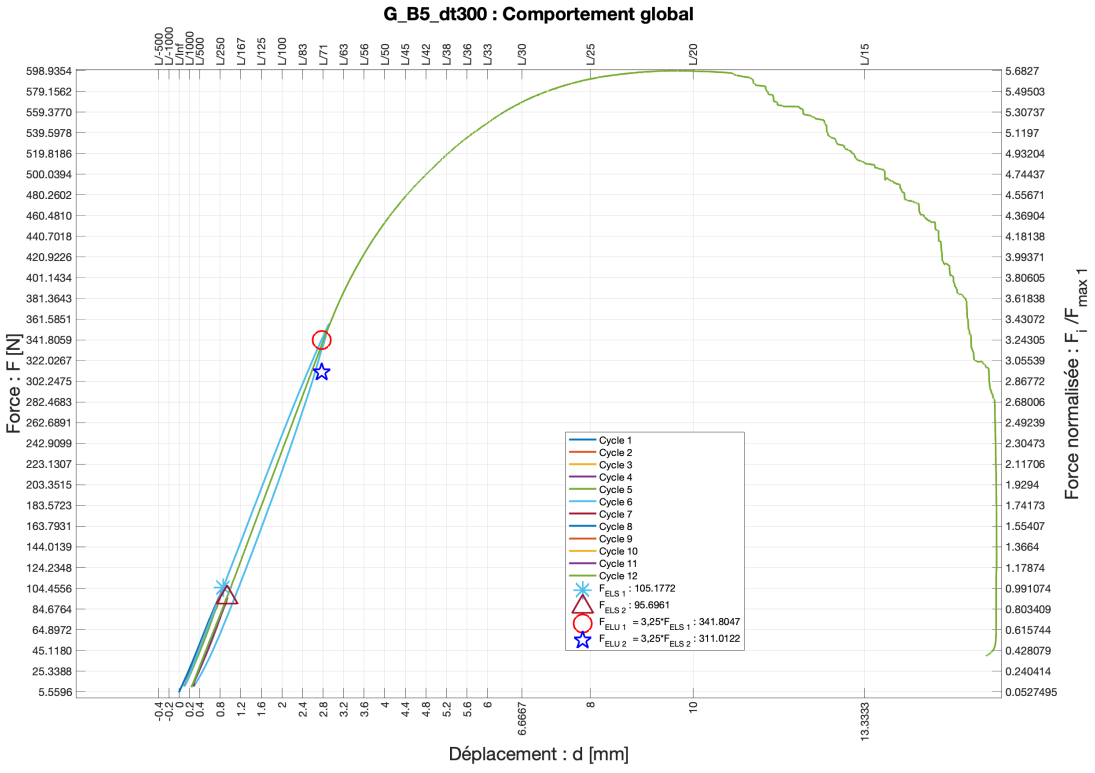


FIGURE M.566 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_B5_dt300 de la batterie 7

Déplacement résiduel

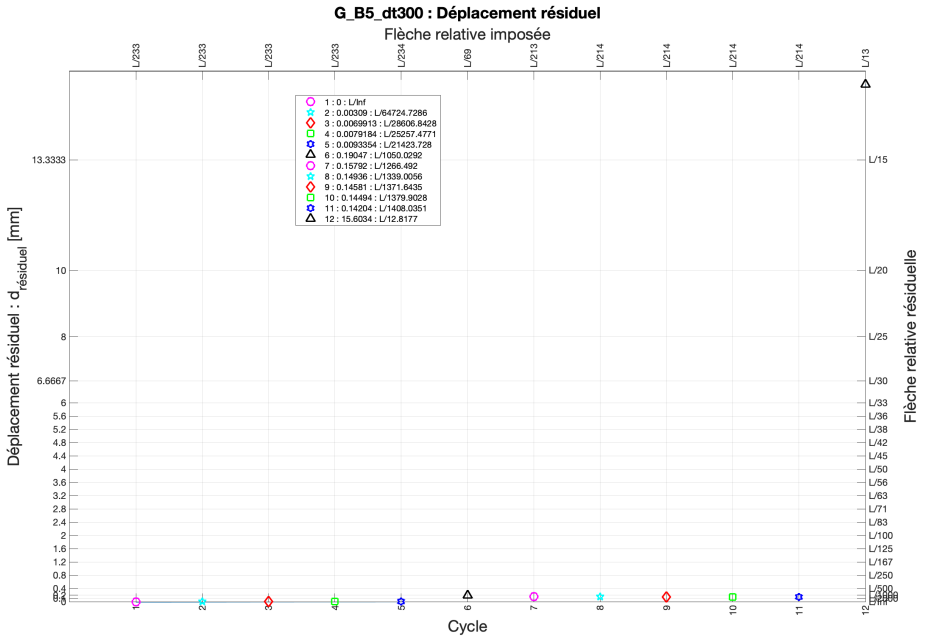


Figure M.567 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_B5_dt300 de la batterie 7

Force maximale

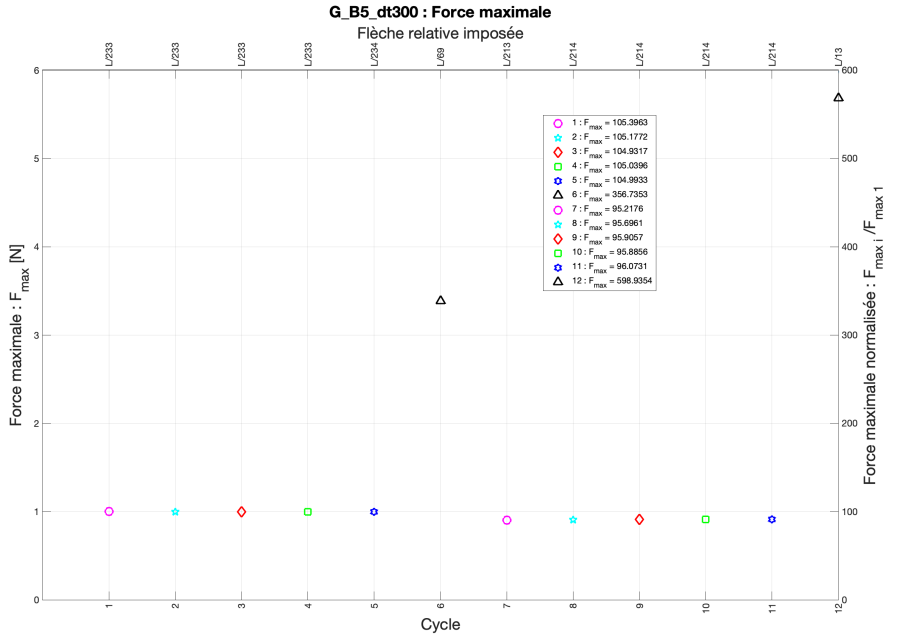


Figure M.568 – Force maximale de l'éprouvette G_B5_dt300 de la batterie 7

Module de Young

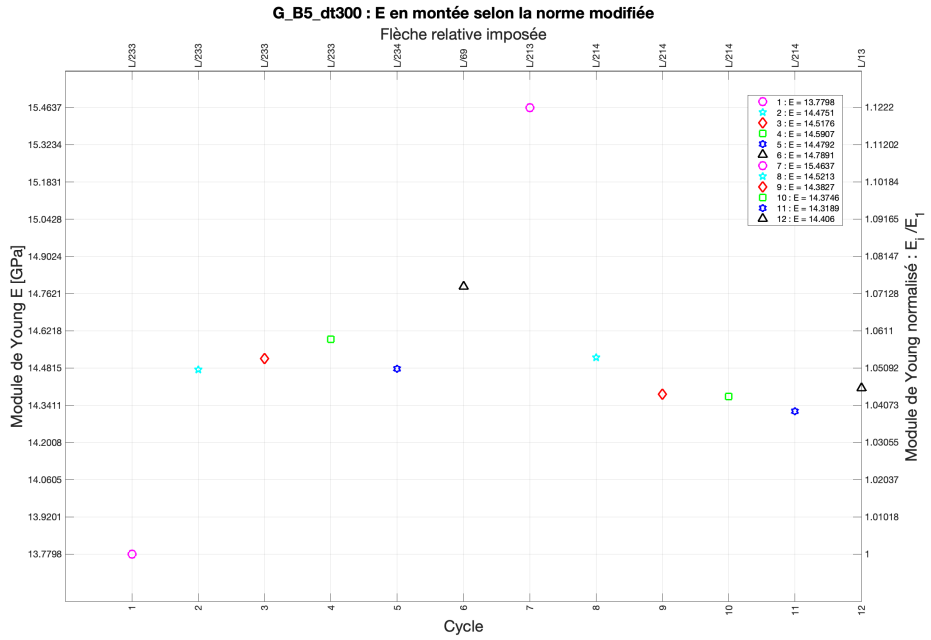


FIGURE M.569 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_B5_dt300 de la batterie 7

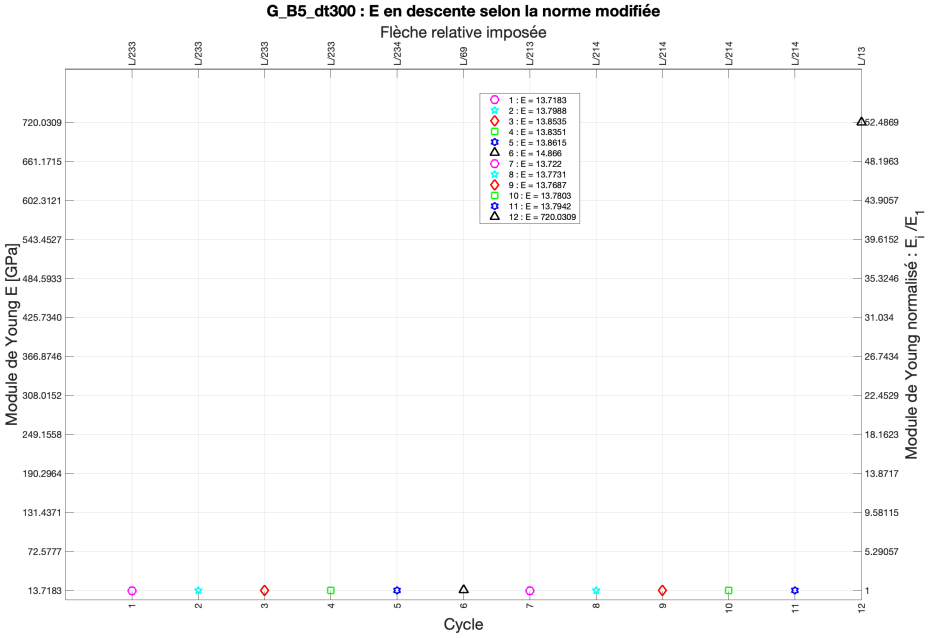


FIGURE M.570 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_B5_dt300 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

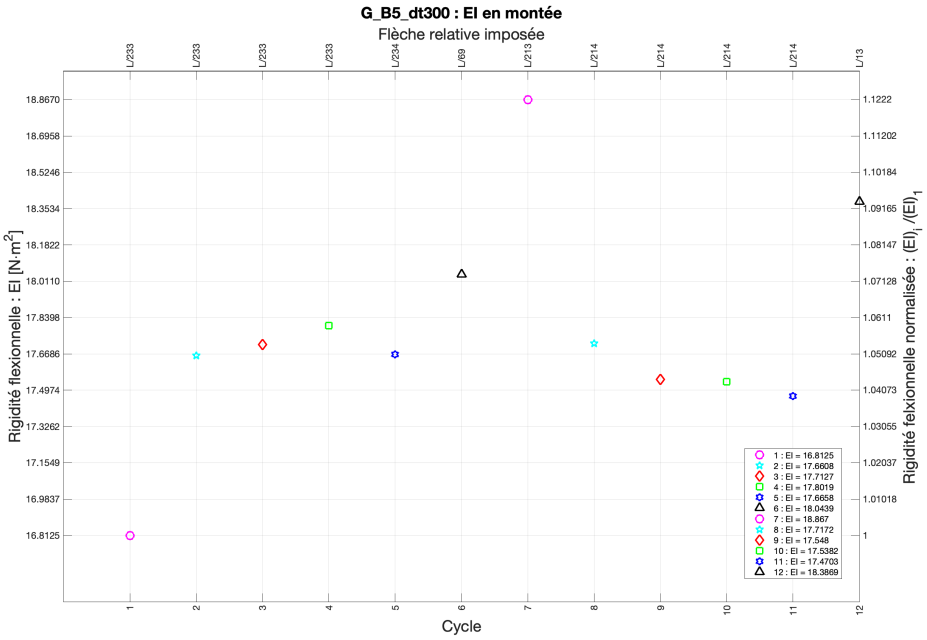


Figure M.571 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_B5_dt300 de la batterie 7

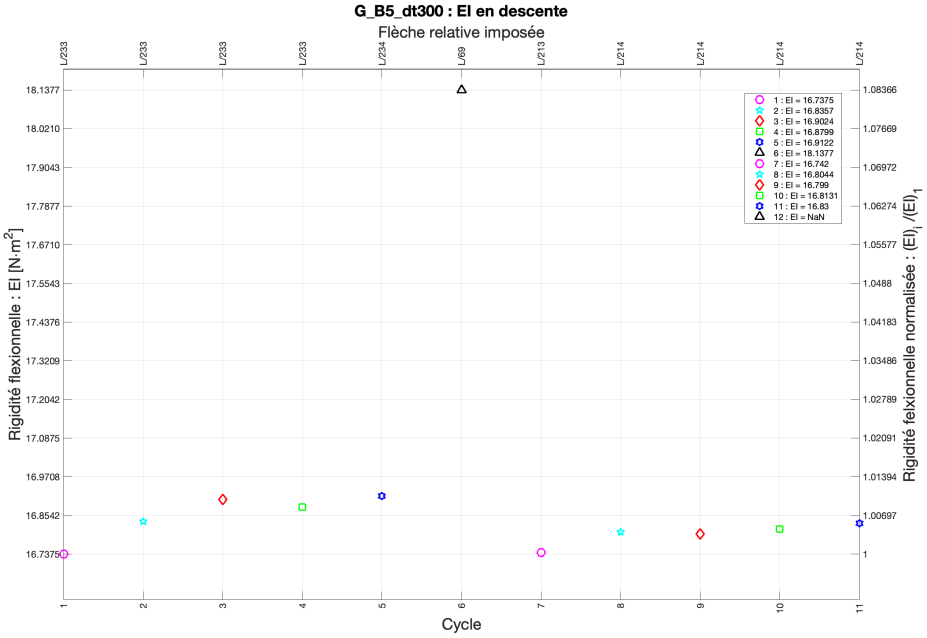


Figure M.572 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_B5_dt300 de la batterie 7

Fonction S

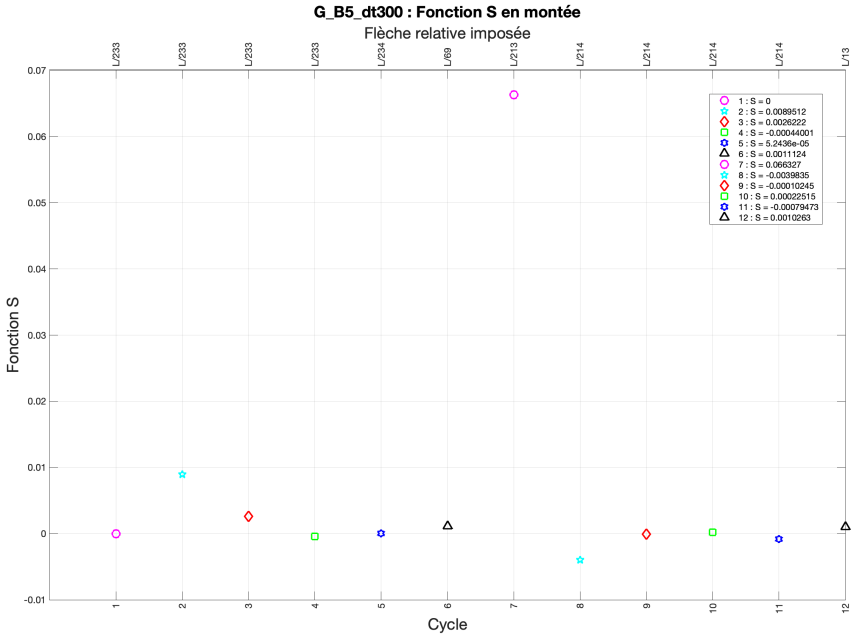


FIGURE M.573 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_B5_dt300 de la batterie 7

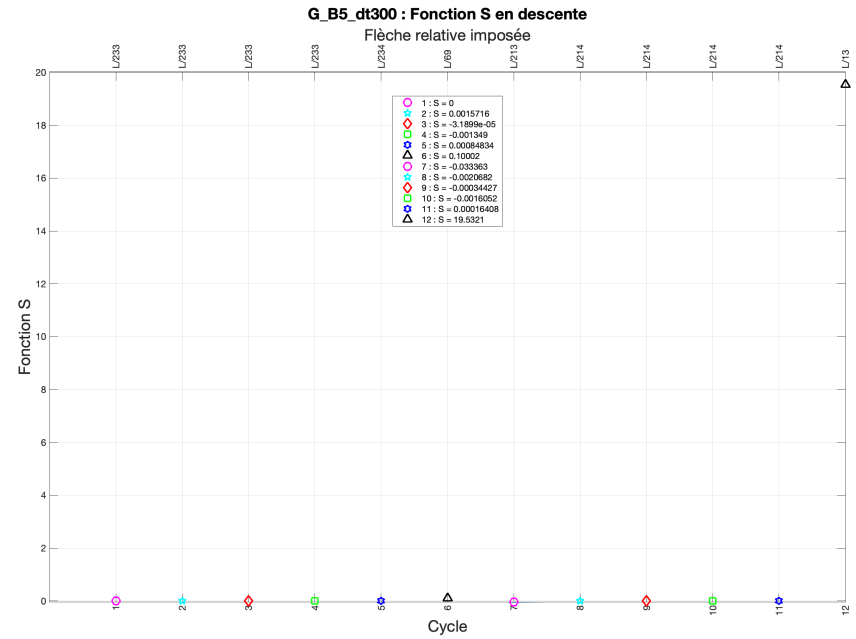


FIGURE M.574 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_B5_dt300 de la batterie 7

Éprouvette G_C3_dt000

Global

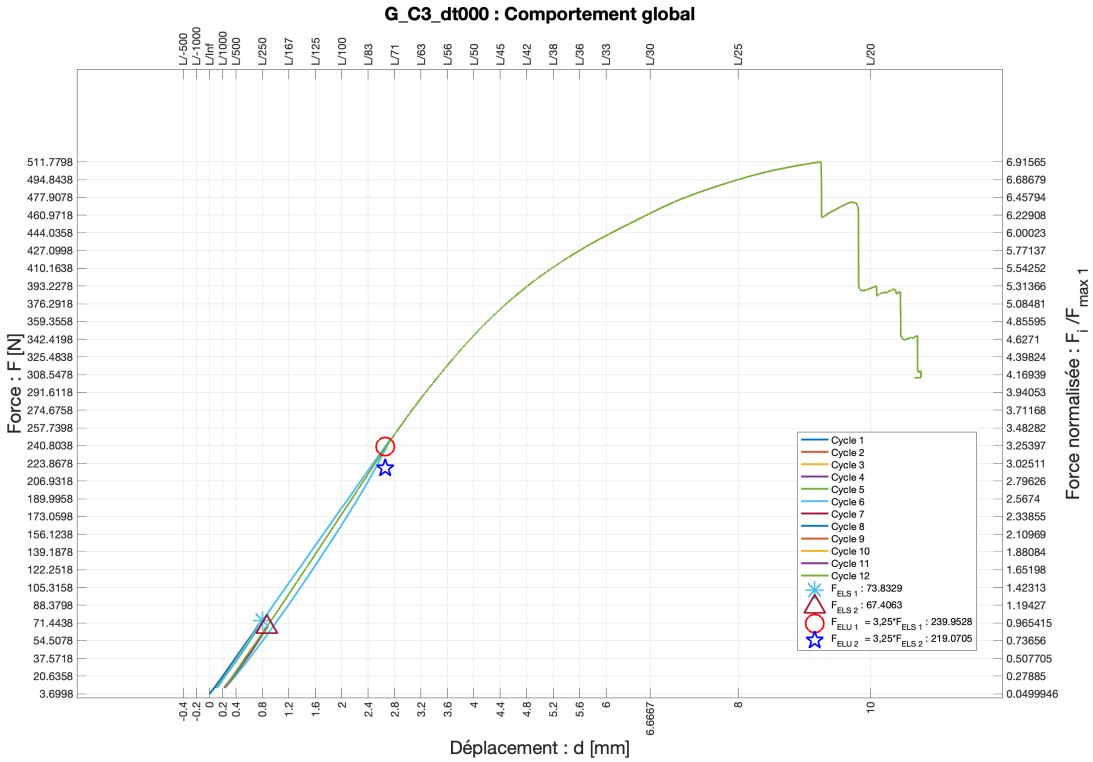


Figure M.575 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_C3_dt000 de la batterie 7

Déplacement résiduel

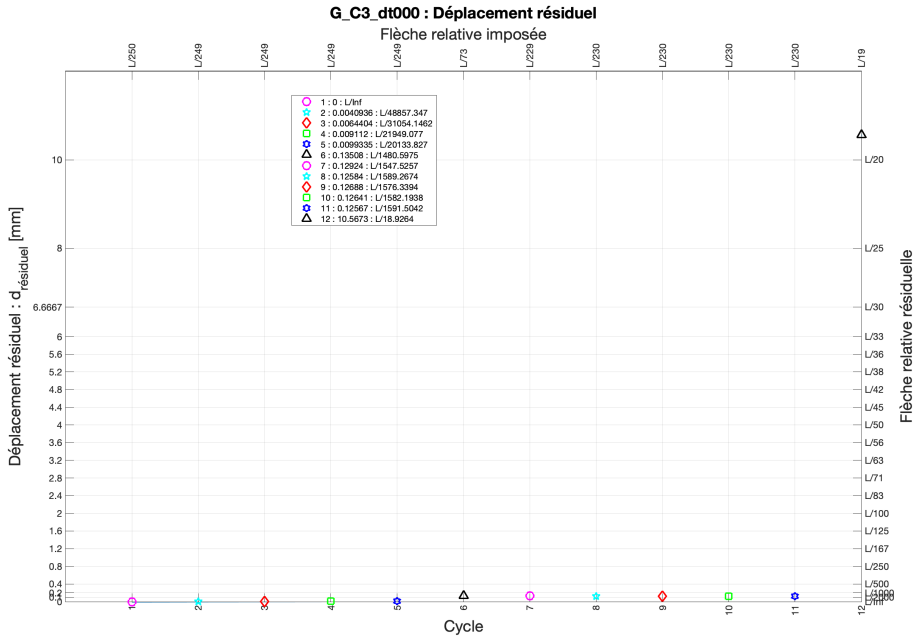


FIGURE M.576 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_C3_dt000 de la batterie 7

Force maximale

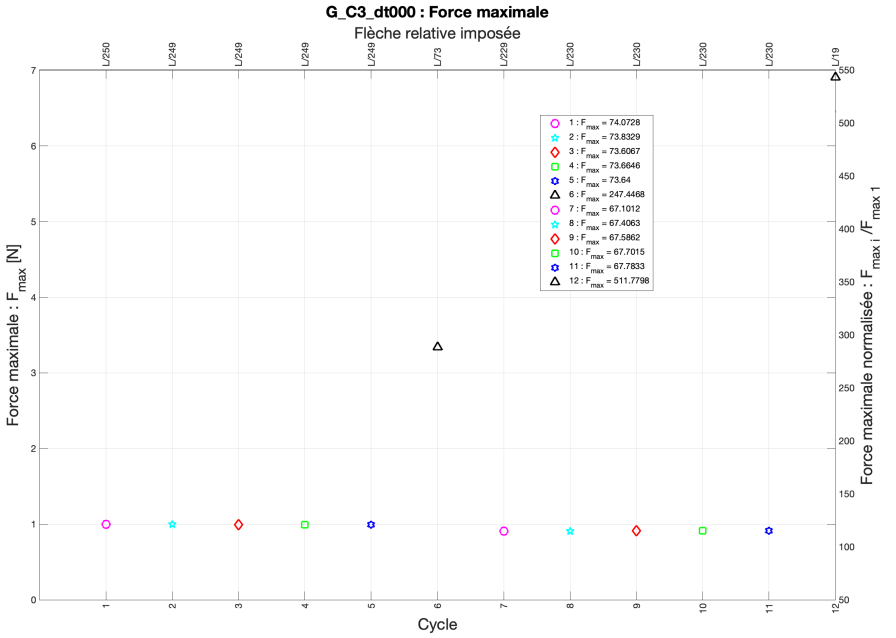


FIGURE M.577 – Force maximale de l'éprouvette G_C3_dt000 de la batterie 7

Module de Young

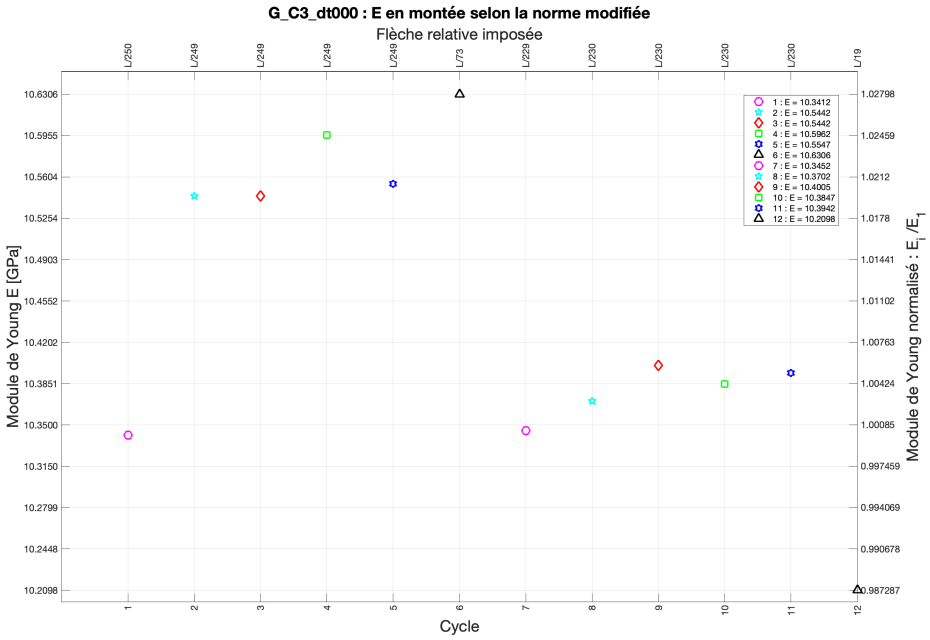


Figure M.578 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_C3_dt000 de la batterie 7

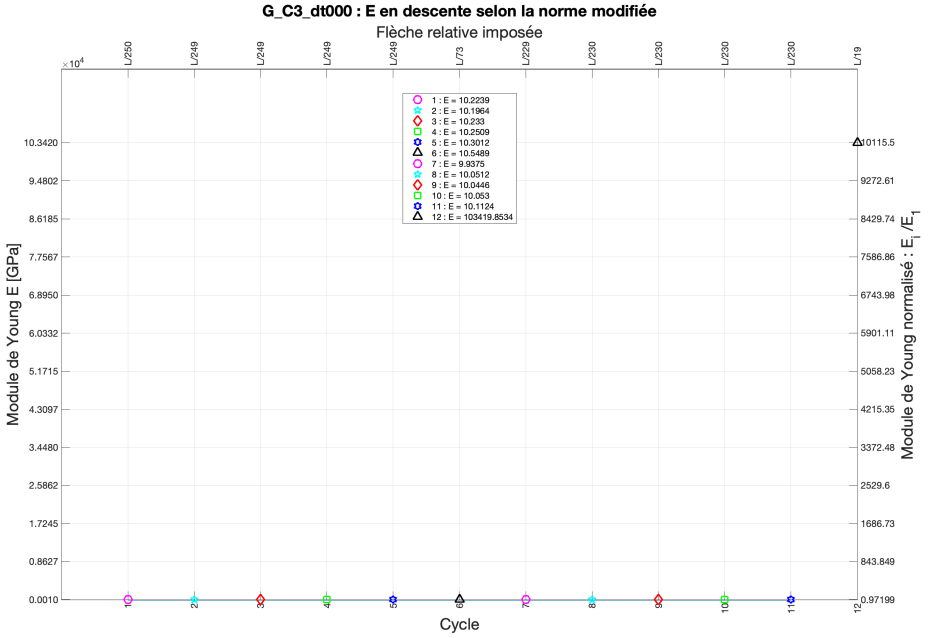


Figure M.579 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_C3_dt000 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

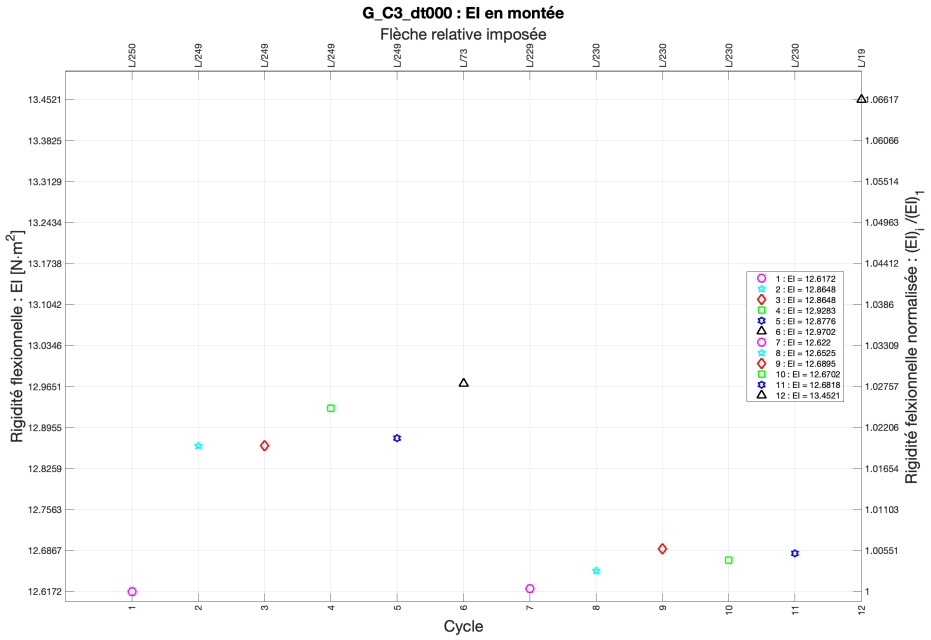


FIGURE M.580 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_C3_dt000 de la batterie 7

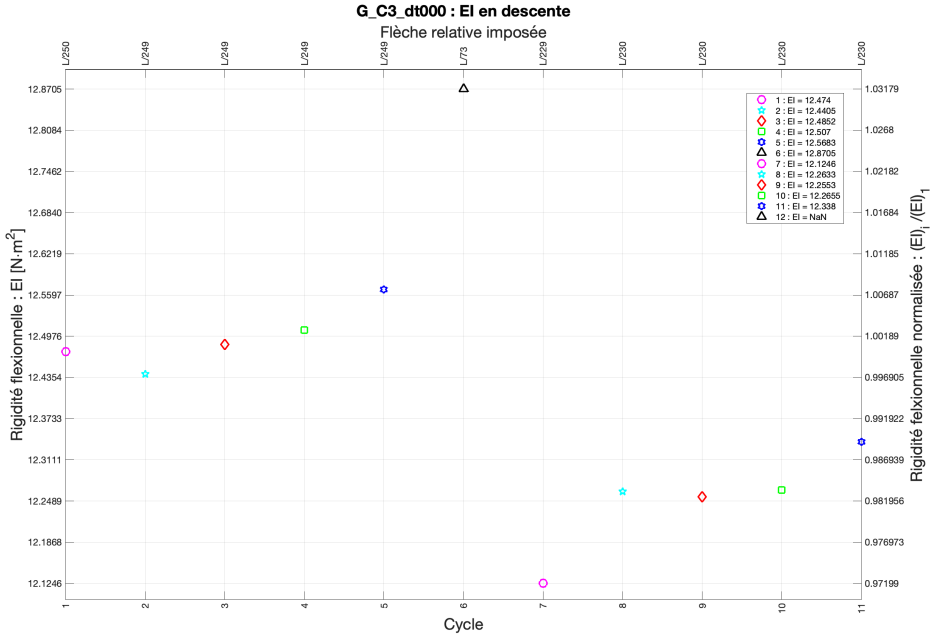


FIGURE M.581 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_C3_dt000 de la batterie 7

Fonction S

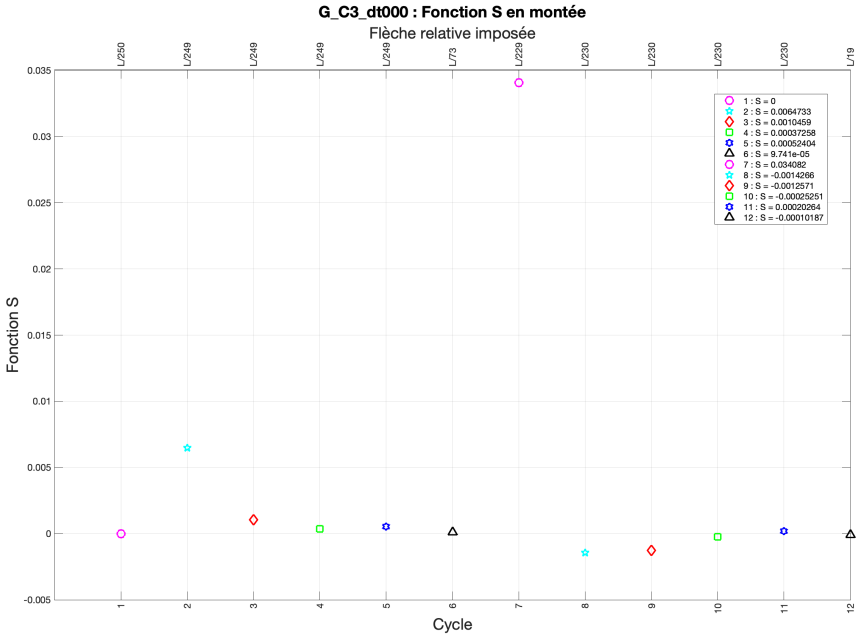


Figure M.582 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_C3_dt000 de la batterie 7

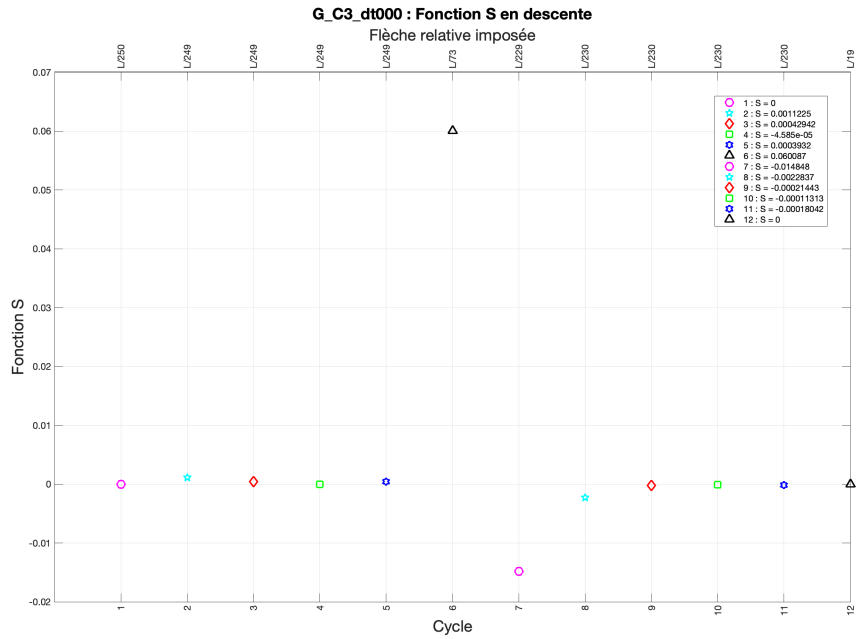


Figure M.583 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_C3_dt000 de la batterie 7

Éprouvette G_C3_dt300

Global

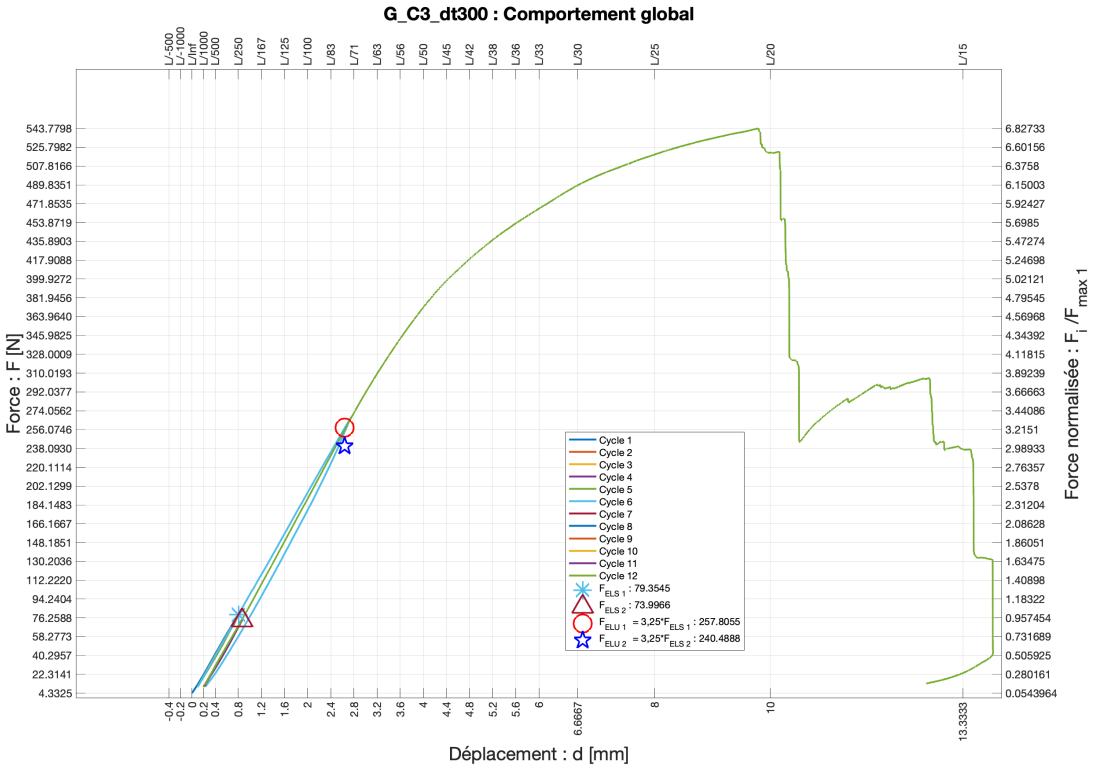


FIGURE M.584 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_C3_dt300 de la batterie 7

Déplacement résiduel

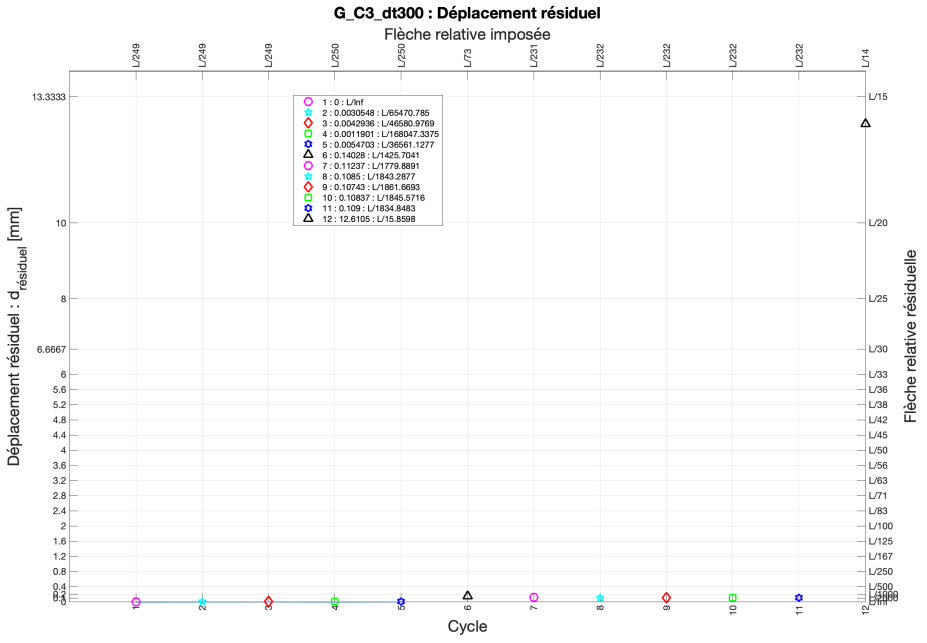


Figure M.585 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_C3_dt300 de la batterie 7

Force maximale

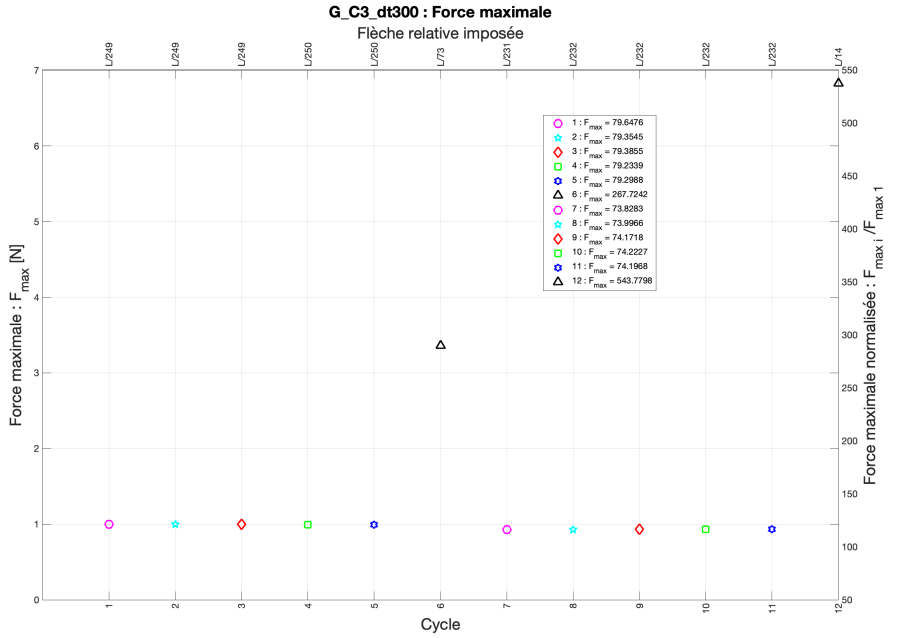


Figure M.586 – Force maximale de l'éprouvette G_C3_dt300 de la batterie 7

Module de Young

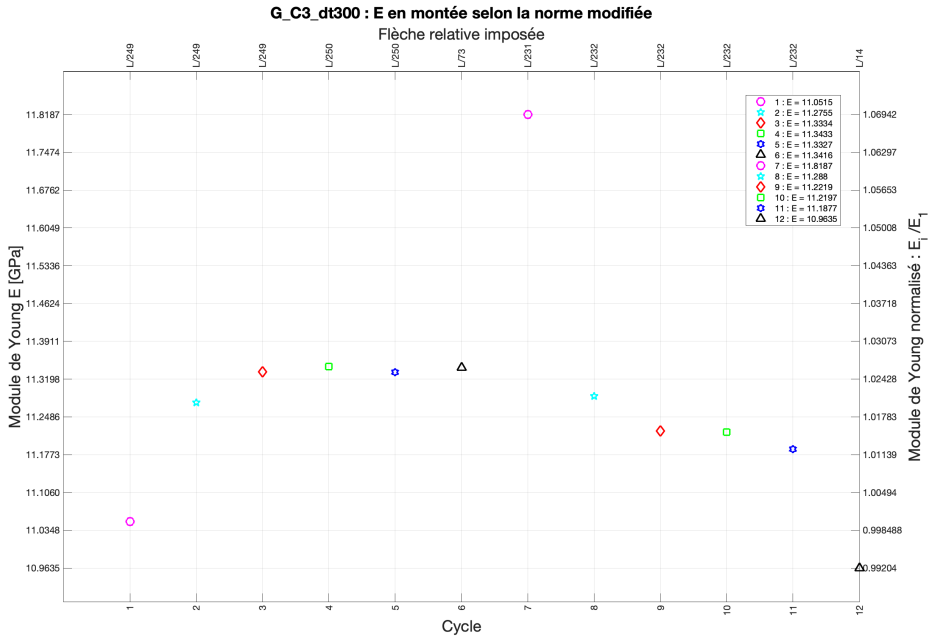


FIGURE M.587 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_C3_dt300 de la batterie 7

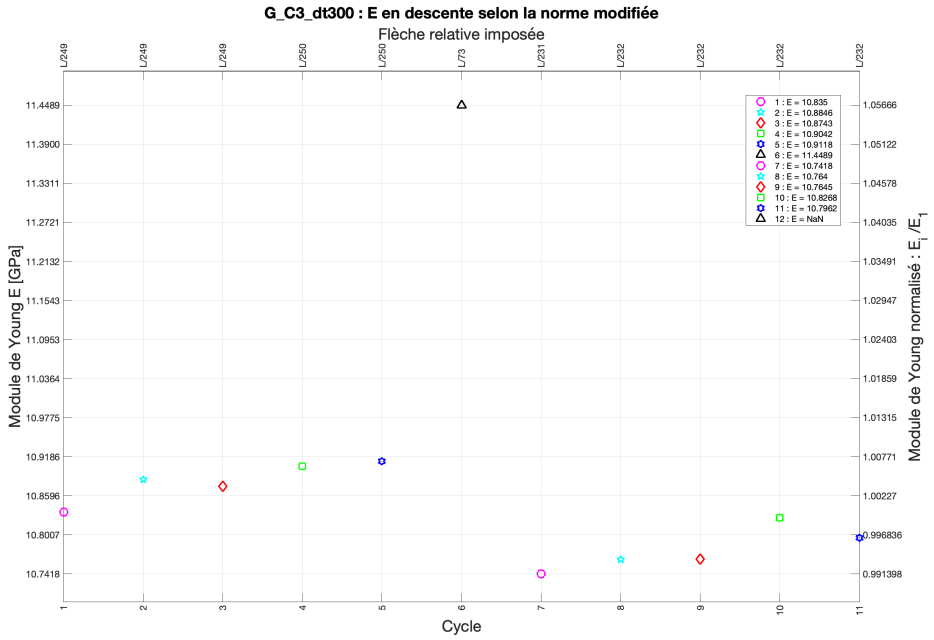


FIGURE M.588 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_C3_dt300 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

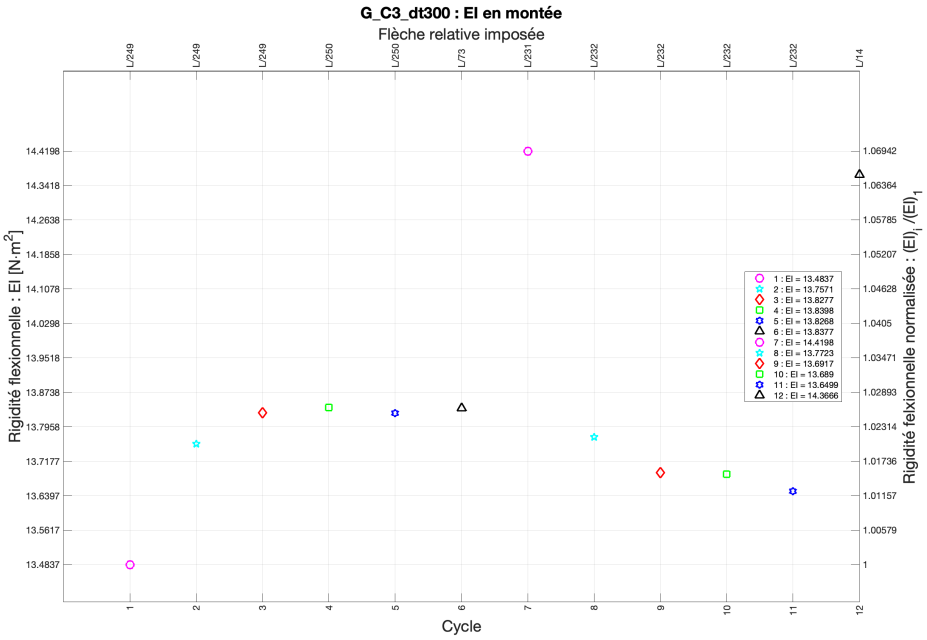


Figure M.589 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_C3_dt300 de la batterie 7

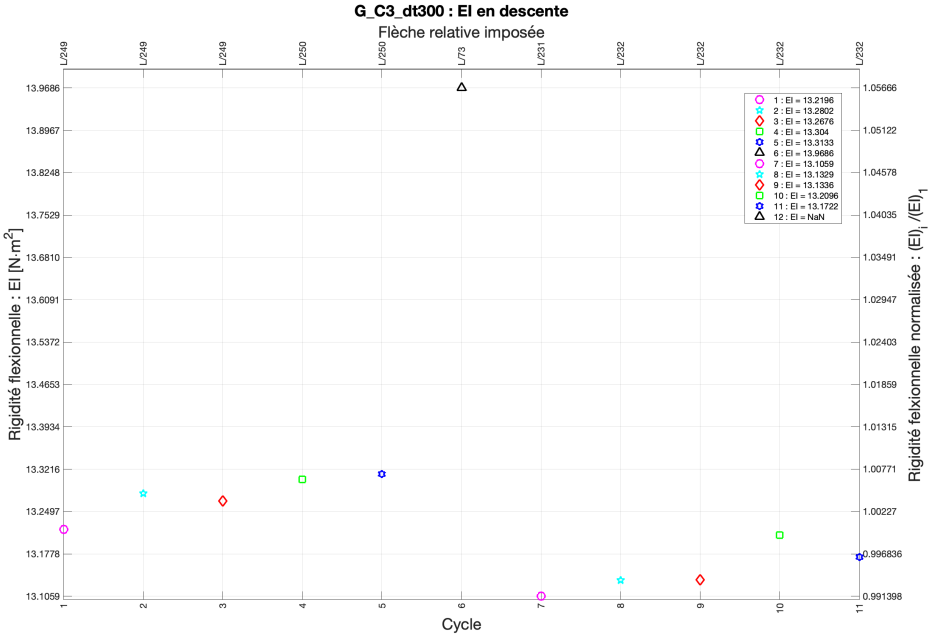


Figure M.590 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_C3_dt300 de la batterie 7

Fonction S

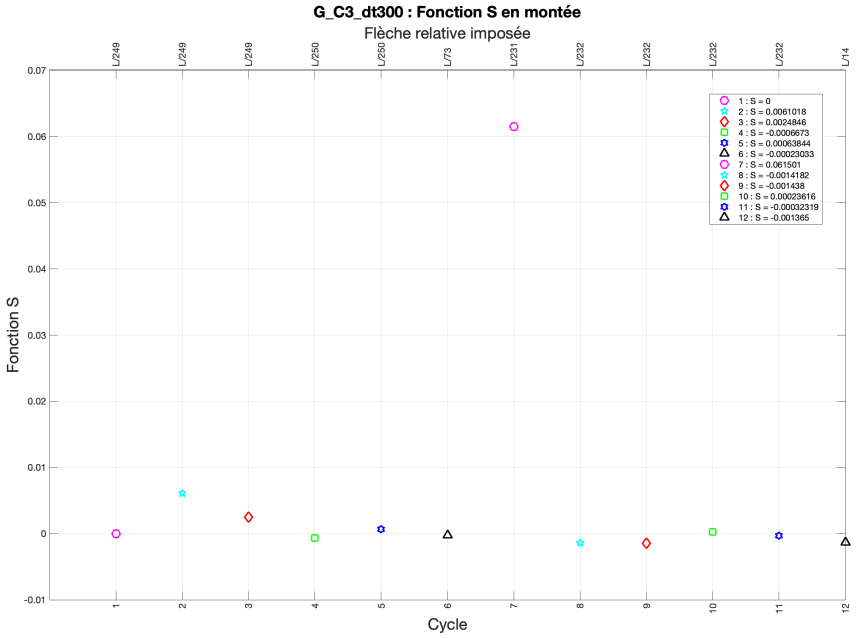


FIGURE M.591 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_C3_dt300 de la batterie 7

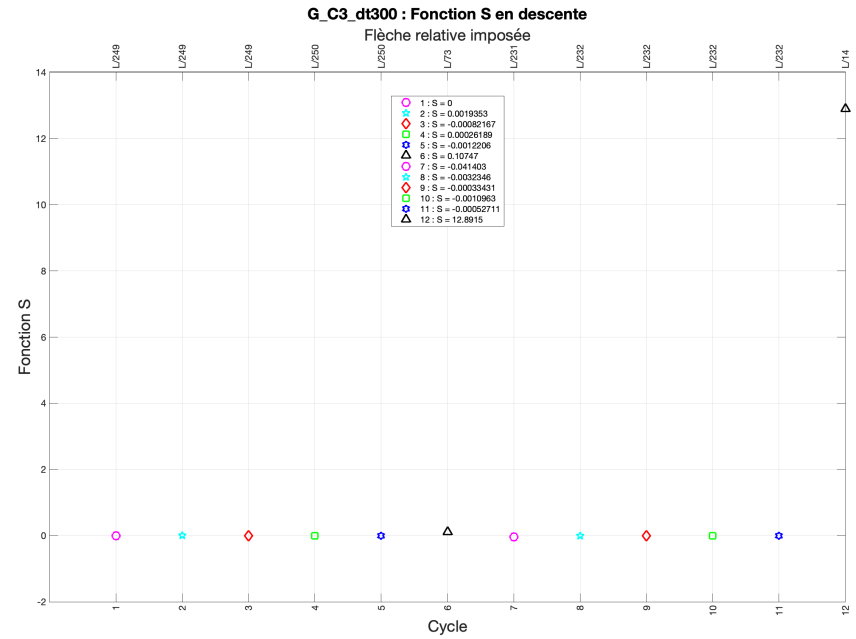


FIGURE M.592 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_C3_dt300 de la batterie 7

Éprouvette G_C4_dt000

Global

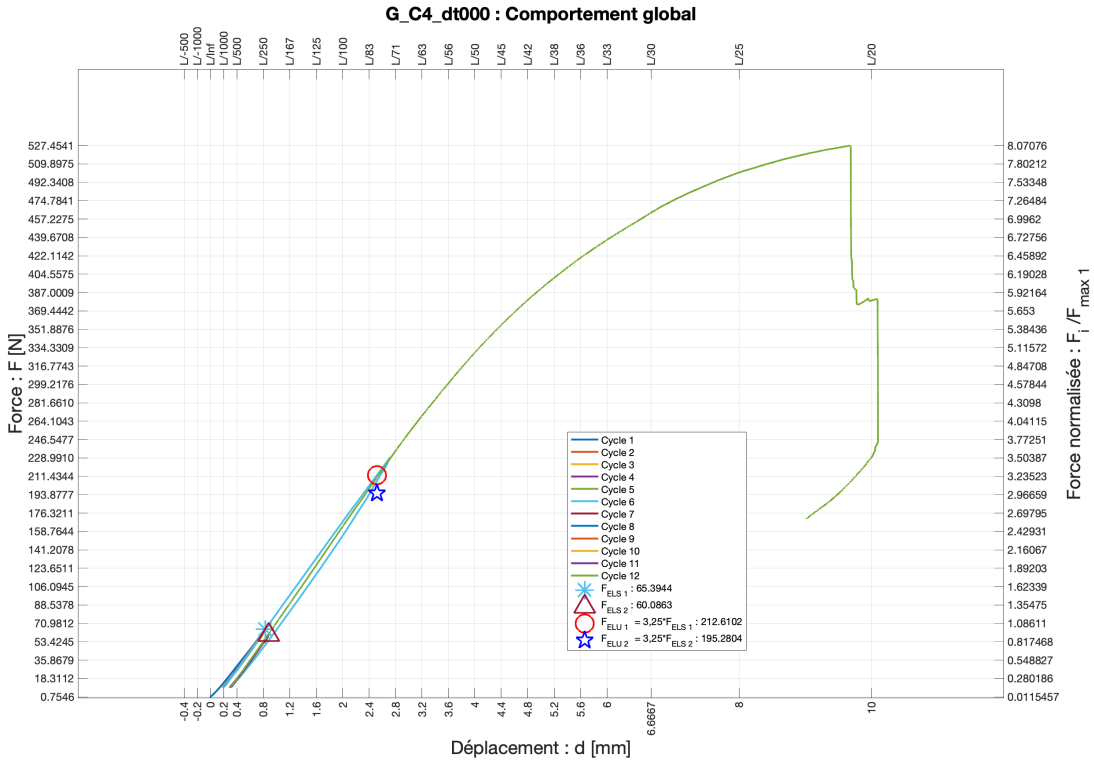


Figure M.593 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_C4_dt000 de la batterie 7

Déplacement résiduel

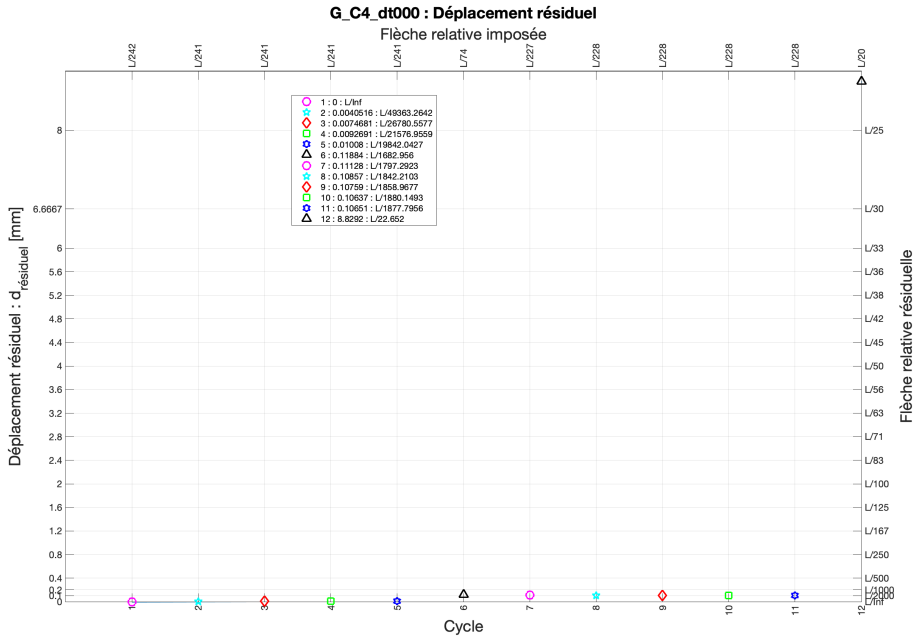


FIGURE M.594 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_C4_dt000 de la batterie 7

Force maximale

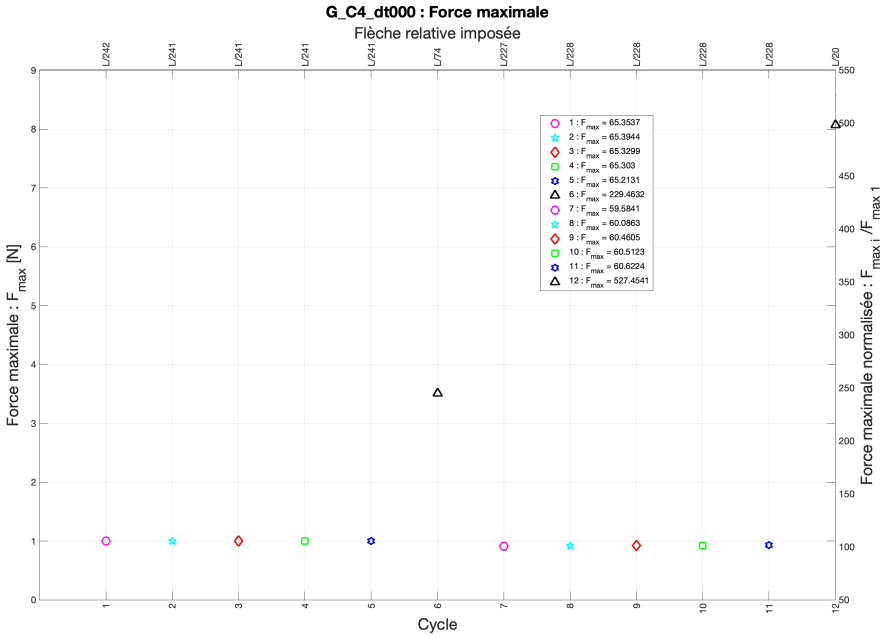


FIGURE M.595 – Force maximale de l'éprouvette G_C4_dt000 de la batterie 7

Module de Young

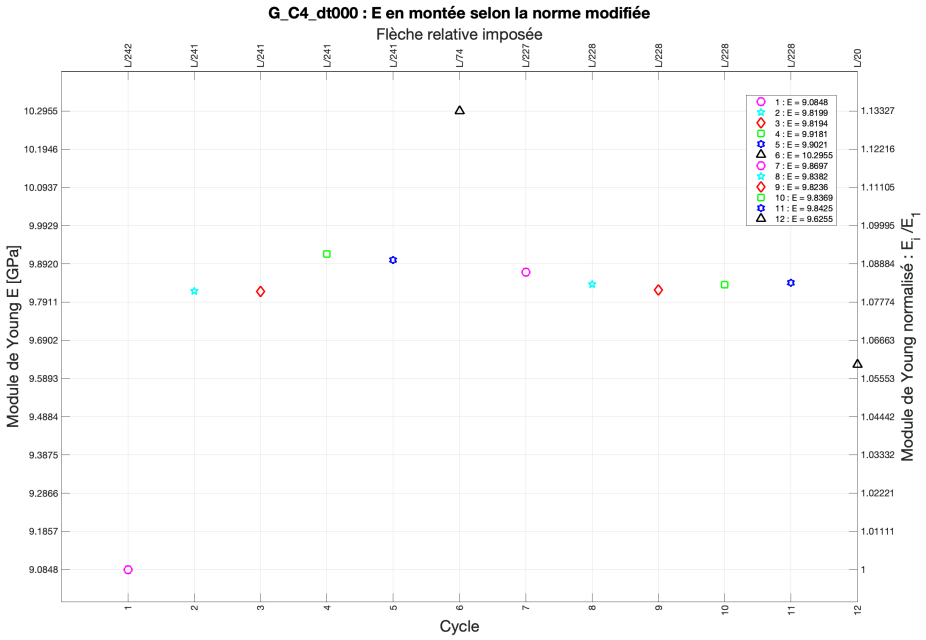


Figure M.596 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_C4_dt000 de la batterie 7

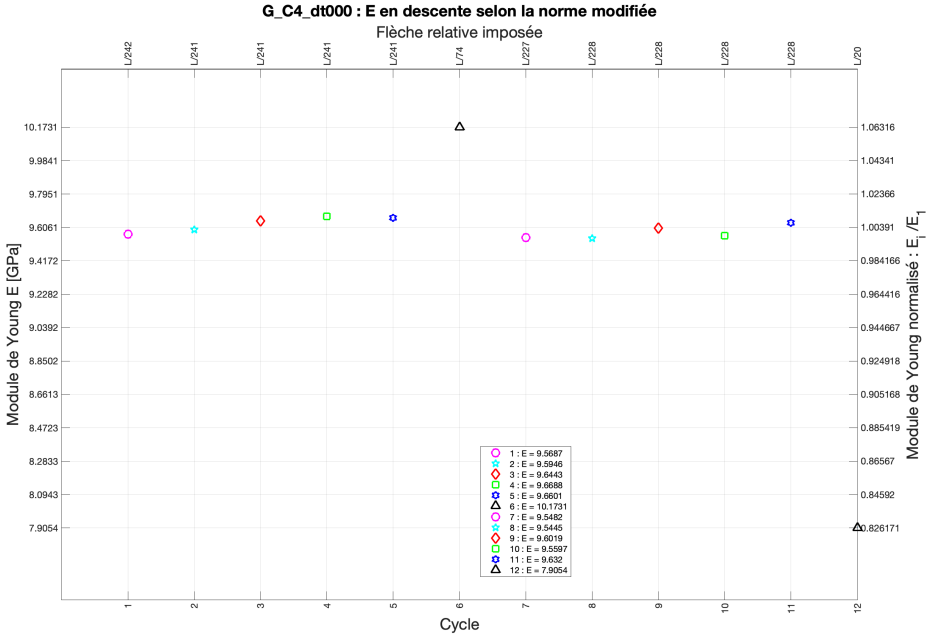


Figure M.597 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_C4_dt000 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

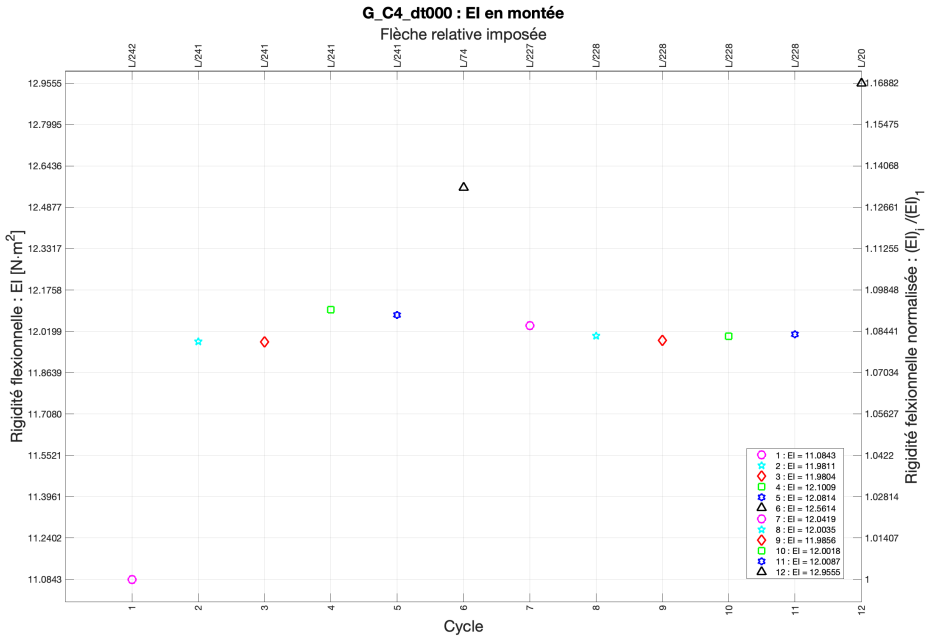


FIGURE M.598 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_C4_dt000 de la batterie 7

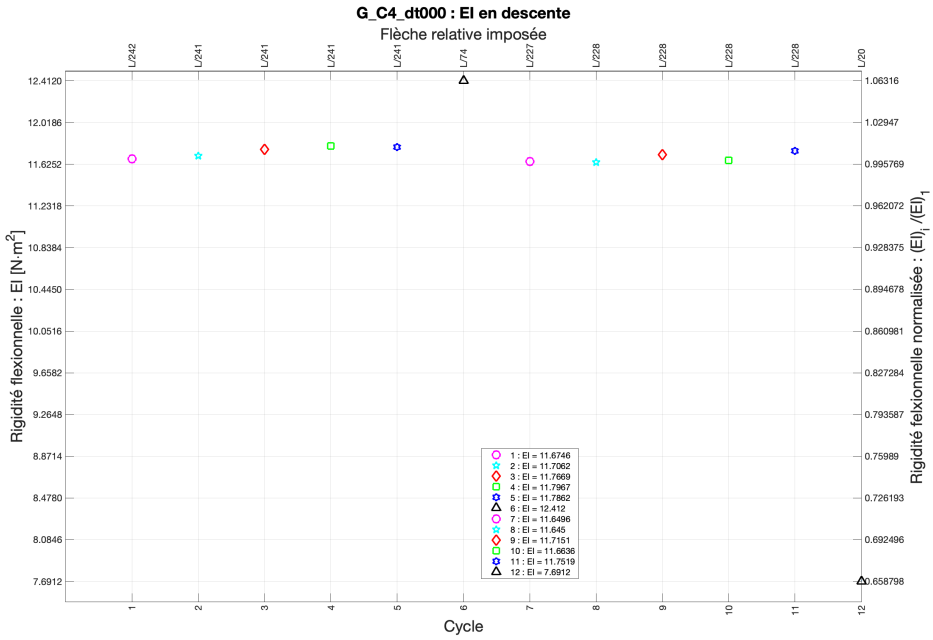


FIGURE M.599 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_C4_dt000 de la batterie 7

Fonction S

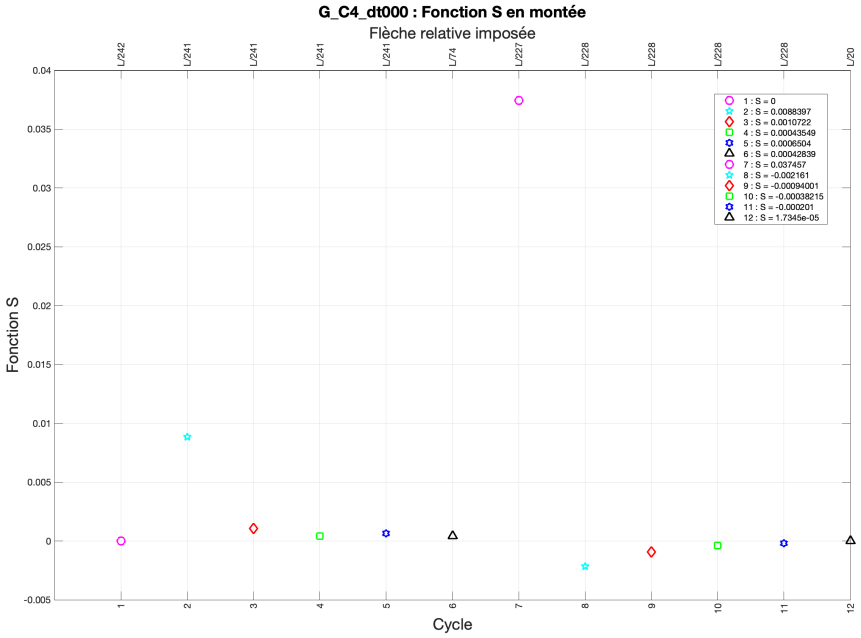


Figure M.600 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_C4_dt000 de la batterie 7

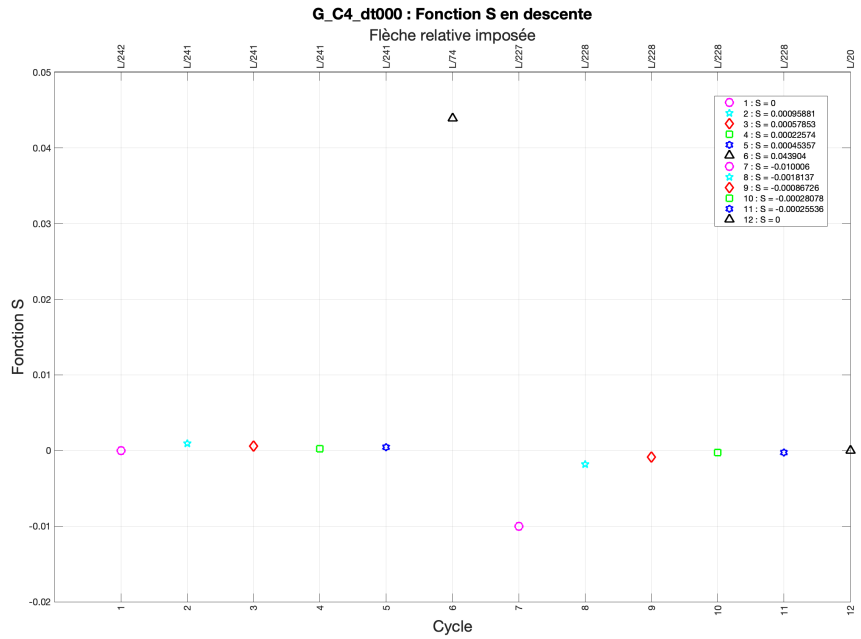


Figure M.601 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_C4_dt000 de la batterie 7

Éprouvette G_C4_dt300

Global

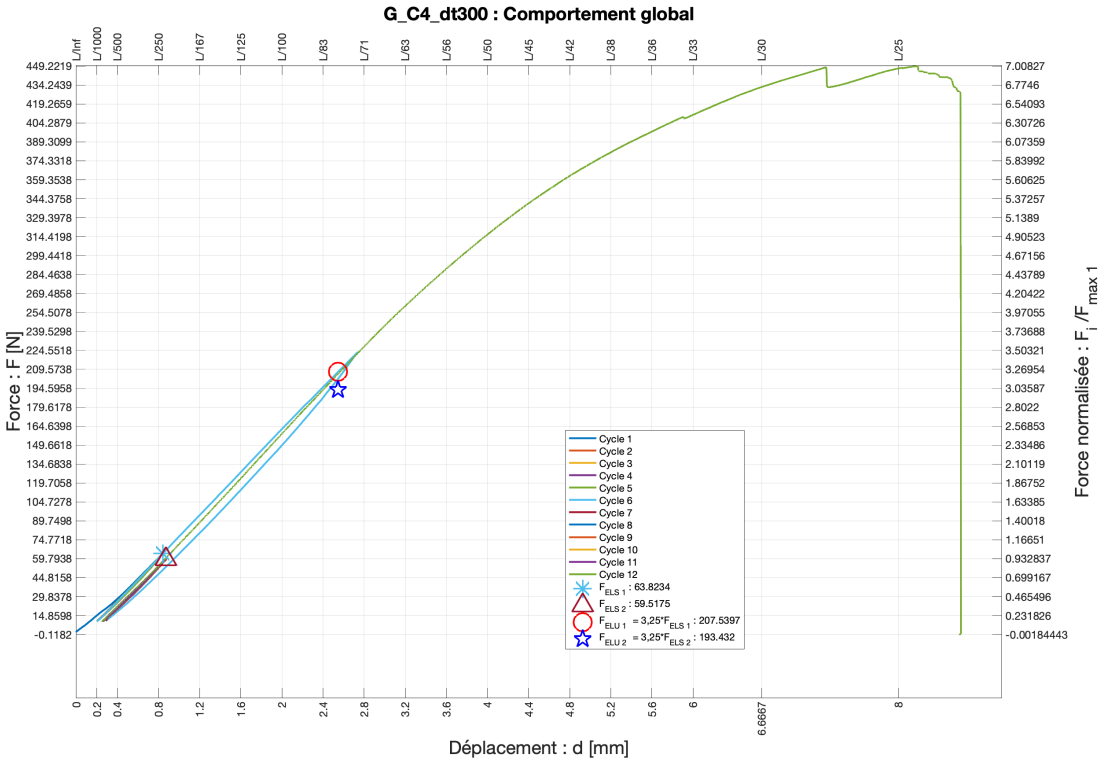


FIGURE M.602 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_C4_dt300 de la batterie 7

Déplacement résiduel

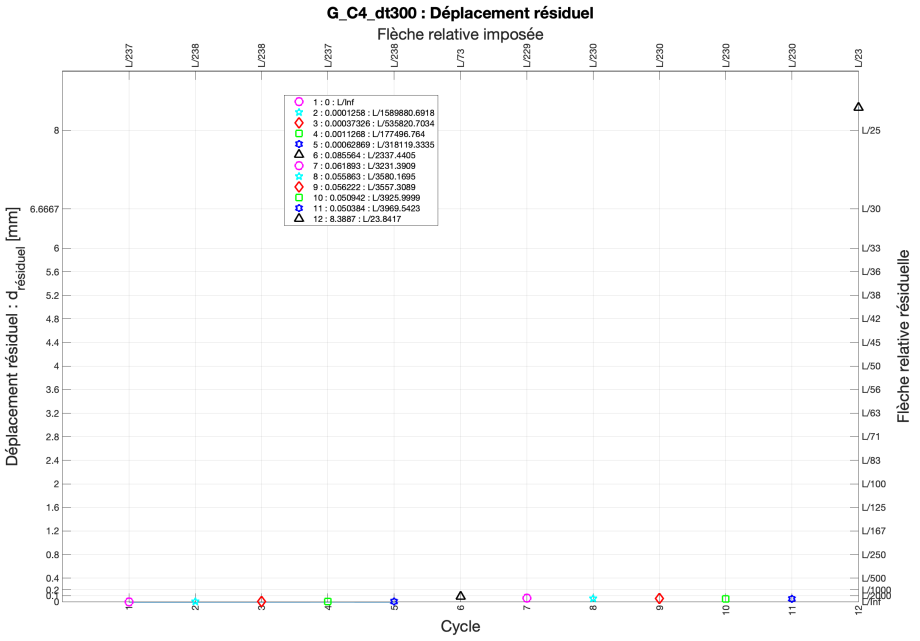


FIGURE M.603 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_C4_dt300 de la batterie 7

Force maximale

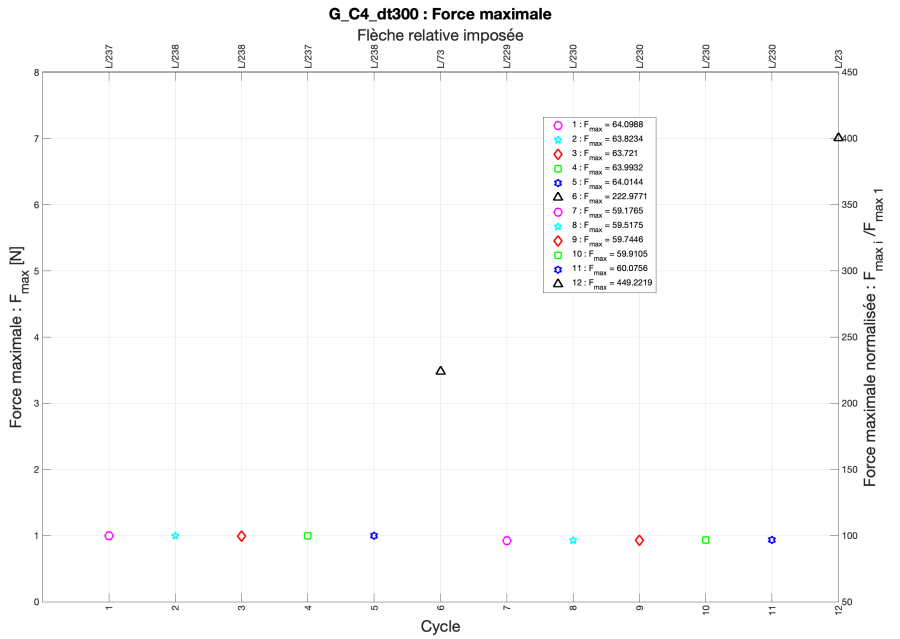


FIGURE M.604 – Force maximale de l'éprouvette G_C4_dt300 de la batterie 7

Module de Young

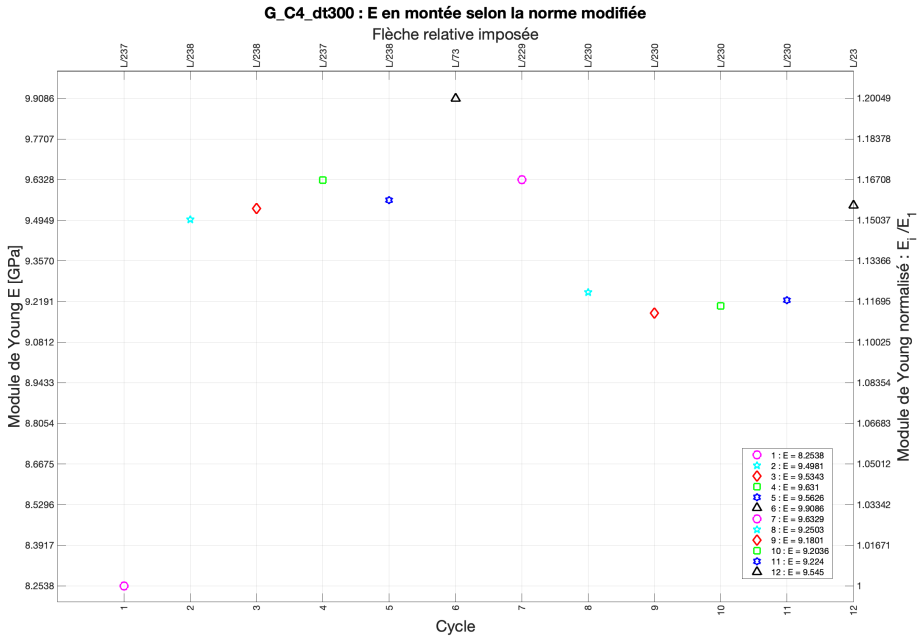


FIGURE M.605 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_C4_dt300 de la batterie 7

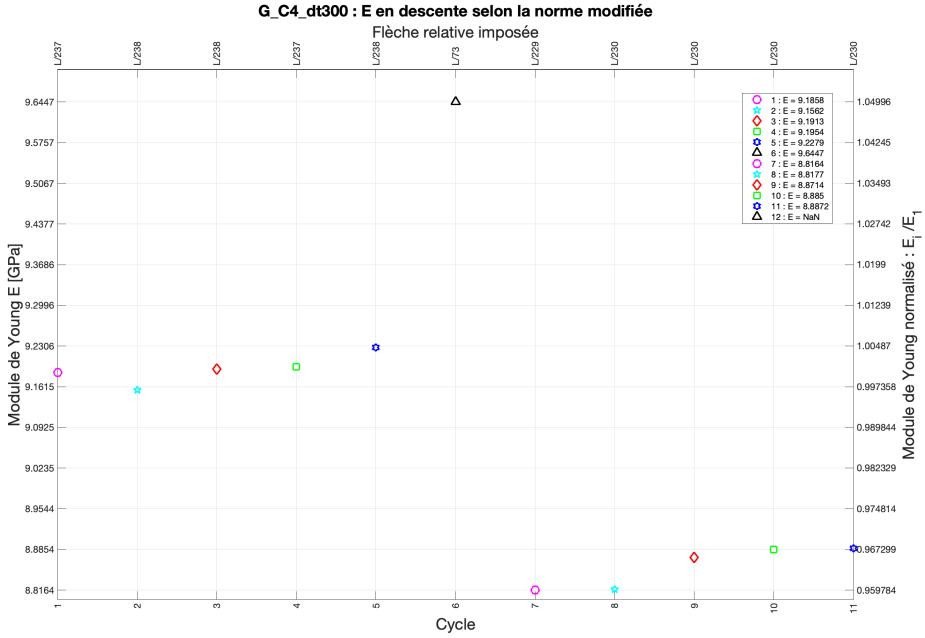


FIGURE M.606 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_C4_dt300 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

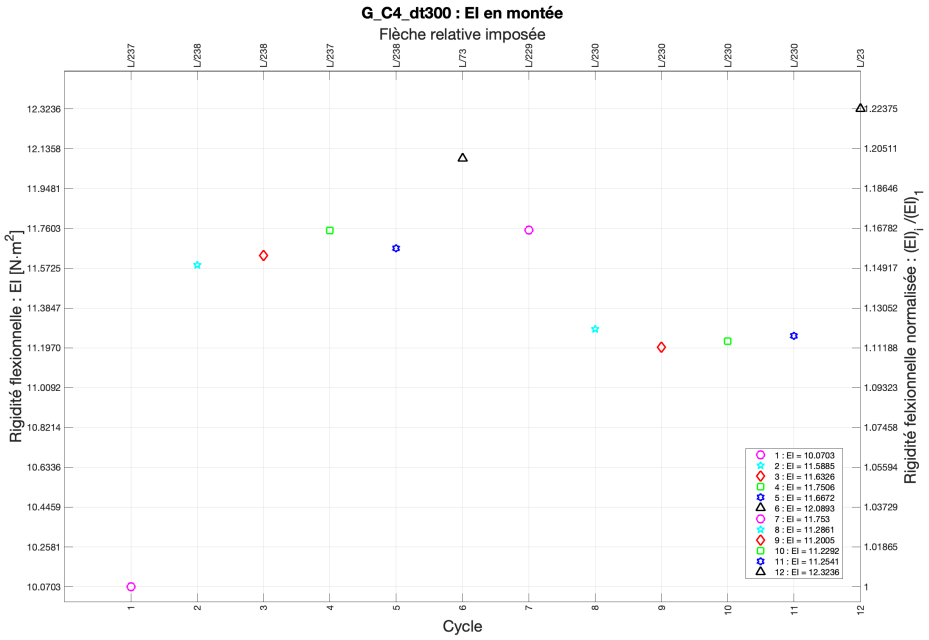


Figure M.607 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_C4_dt300 de la batterie 7

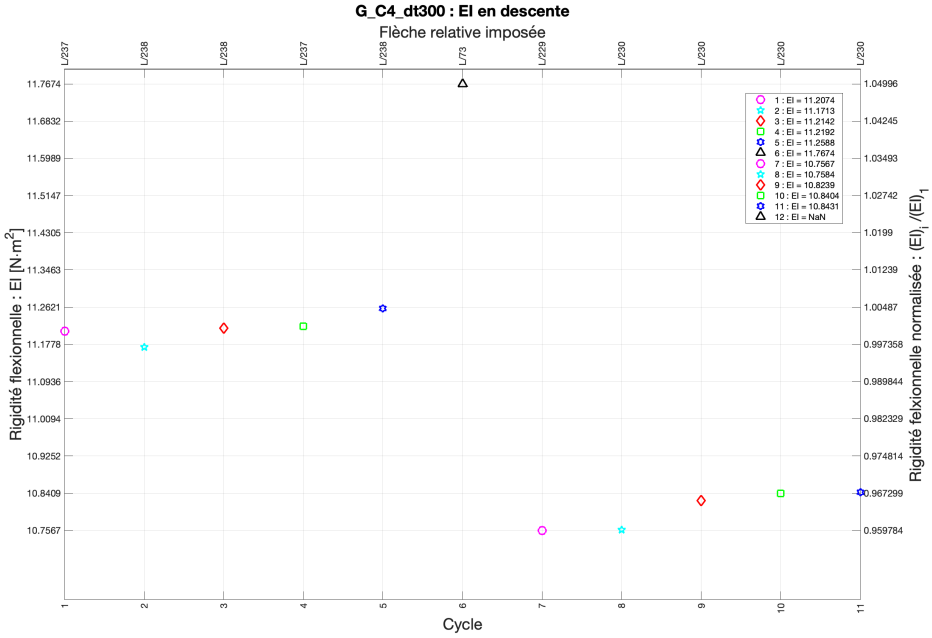


Figure M.608 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_C4_dt300 de la batterie 7

Fonction S

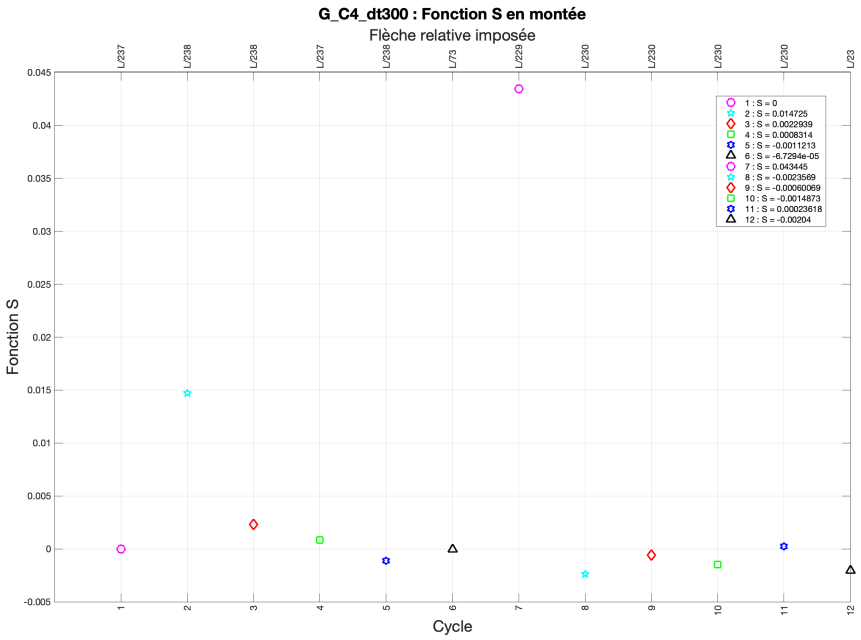


FIGURE M.609 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_C4_dt300 de la batterie 7

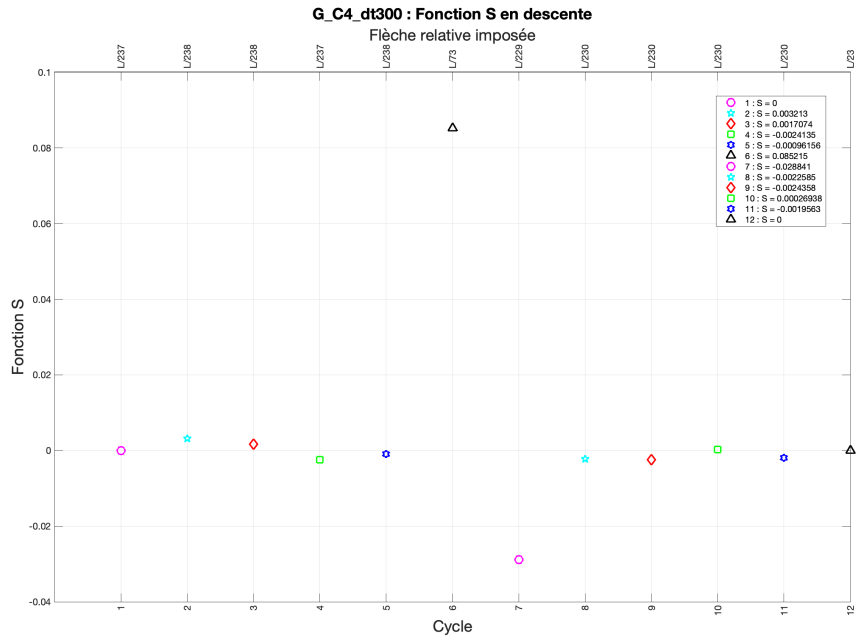


FIGURE M.610 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_C4_dt300 de la batterie 7

Éprouvette G_C5_dt000

Global

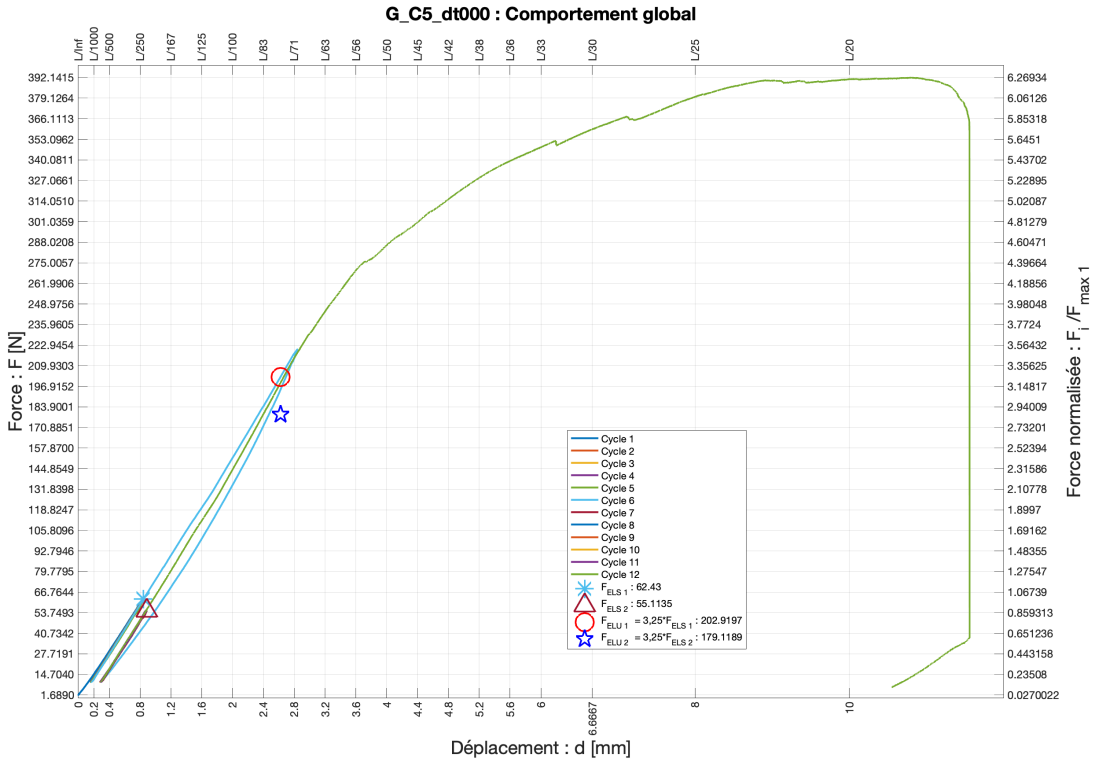


Figure M.611 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_C5_dt000 de la batterie 7

Déplacement résiduel

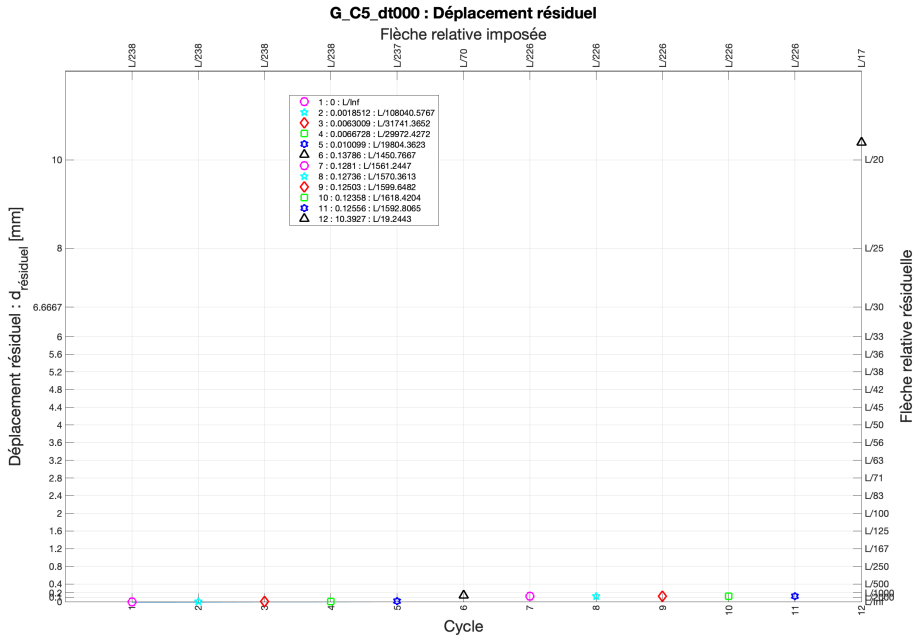


FIGURE M.612 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_C5_dt000 de la batterie 7

Force maximale

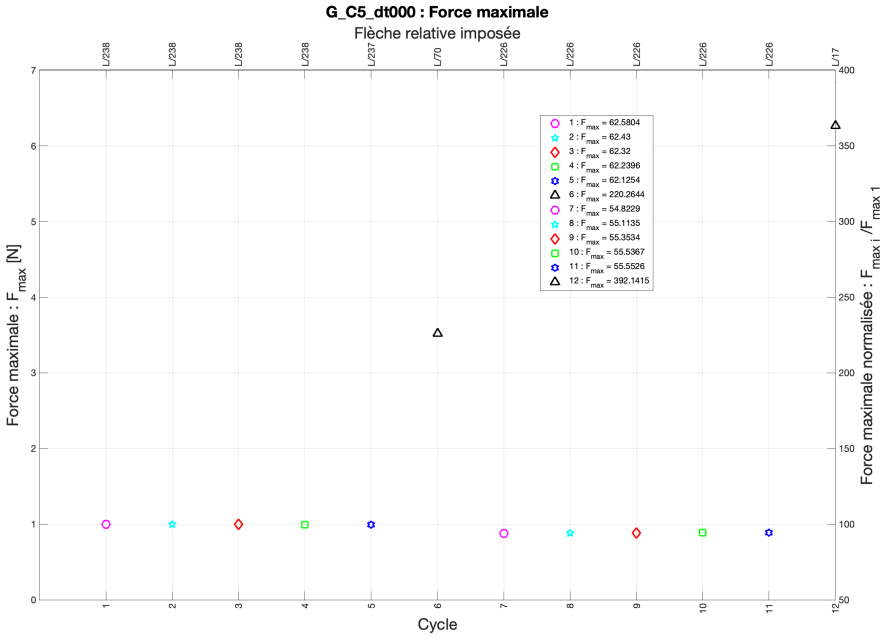


FIGURE M.613 – Force maximale de l'éprouvette G_C5_dt000 de la batterie 7

Module de Young

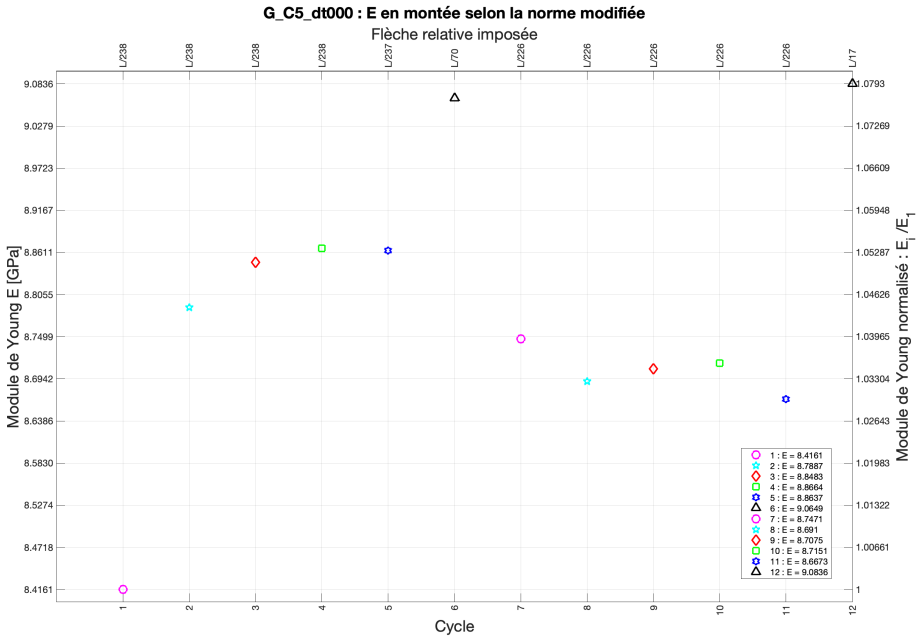


Figure M.614 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_C5_dt000 de la batterie 7

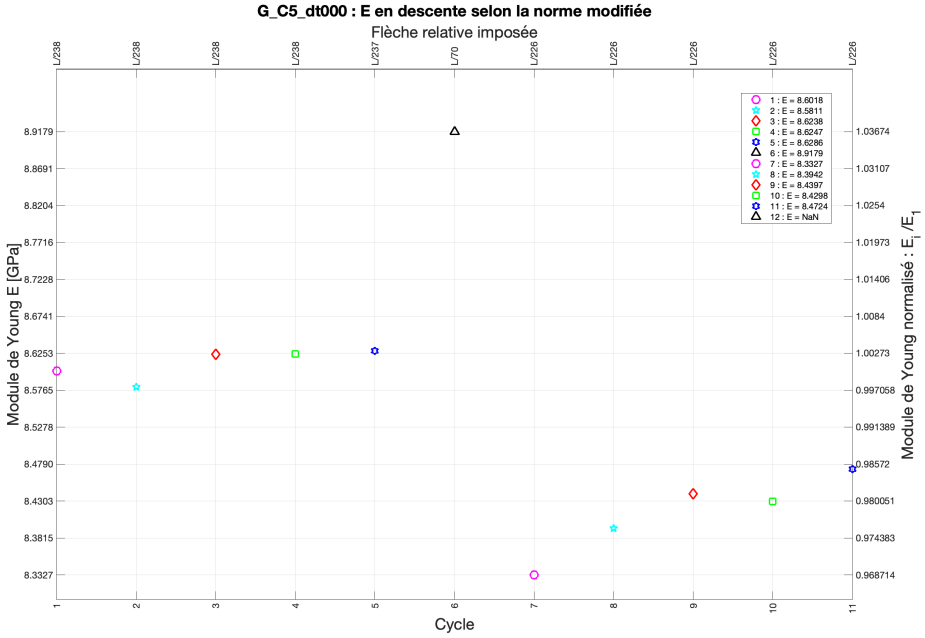


Figure M.615 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_C5_dt000 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

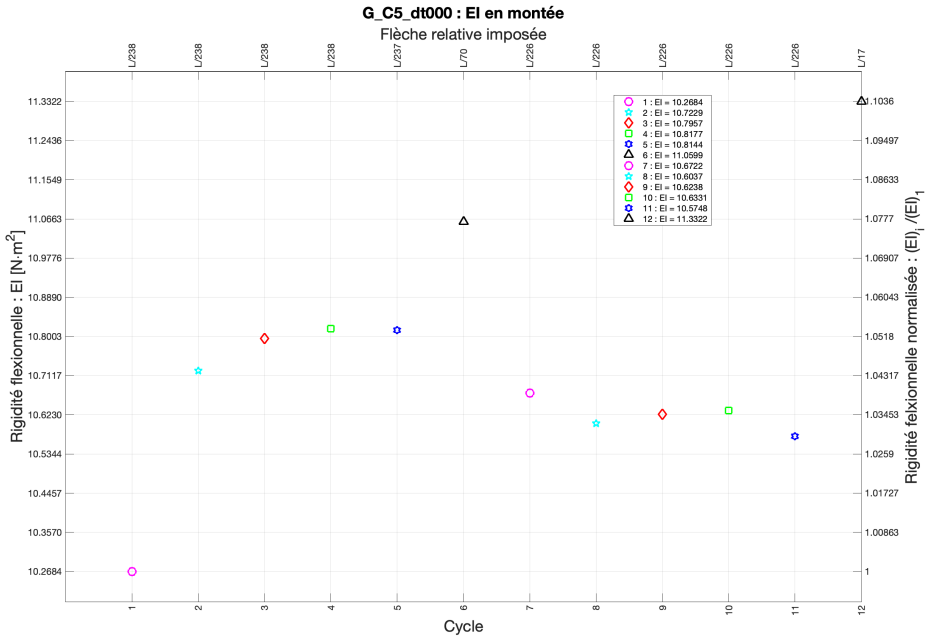


FIGURE M.616 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_C5_dt000 de la batterie 7

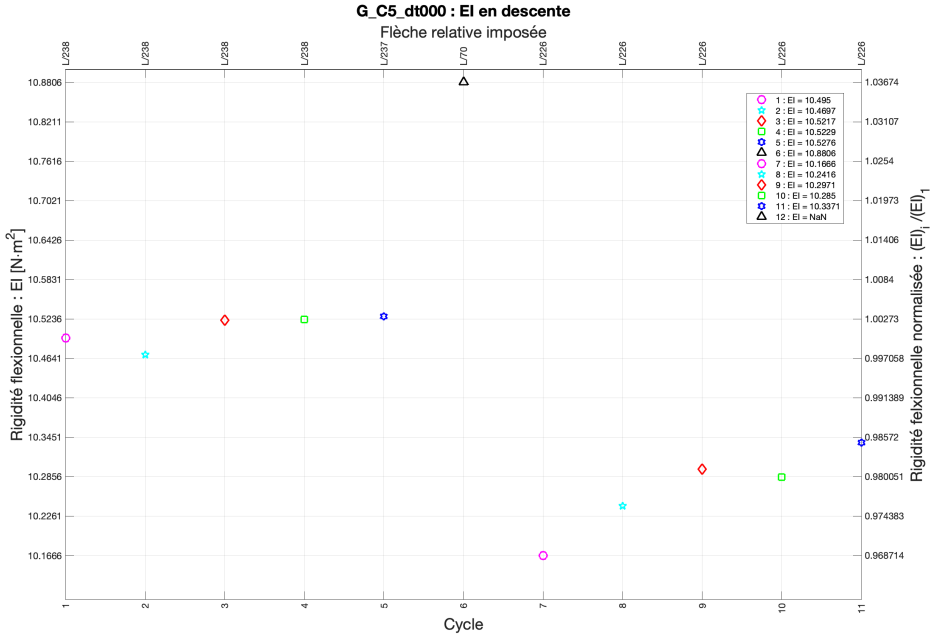


FIGURE M.617 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_C5_dt000 de la batterie 7

Fonction S

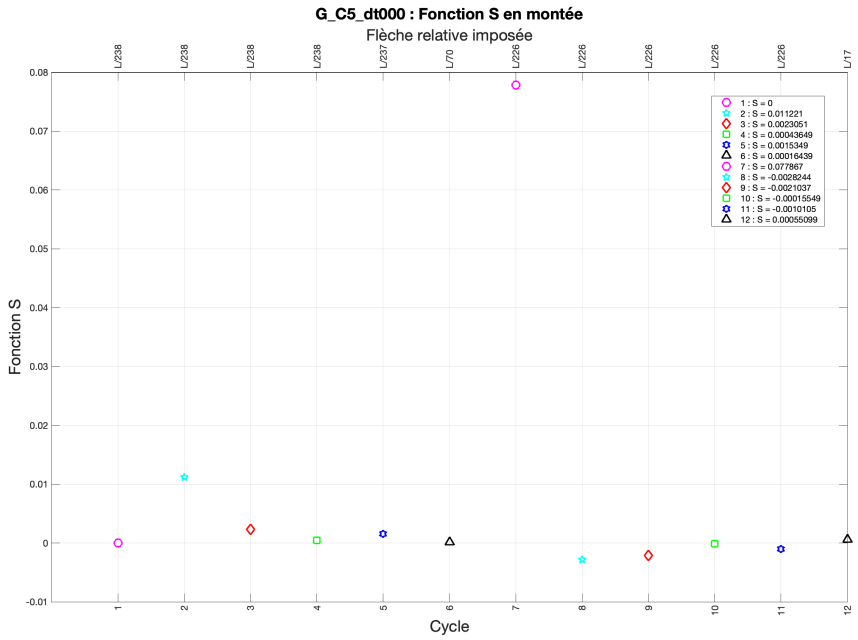


Figure M.618 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_C5_dt000 de la batterie 7

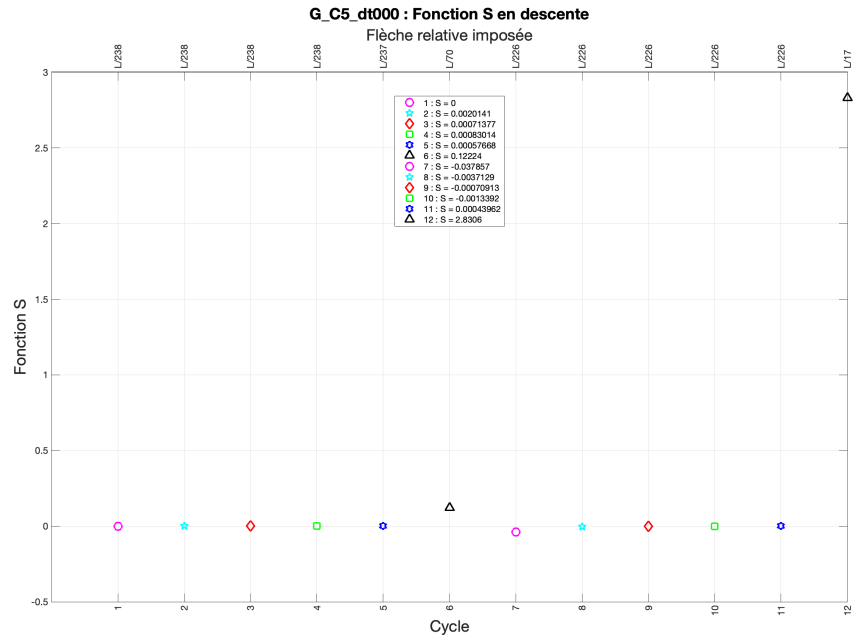


Figure M.619 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_C5_dt000 de la batterie 7

Éprouvette G_C5_dt300

Global

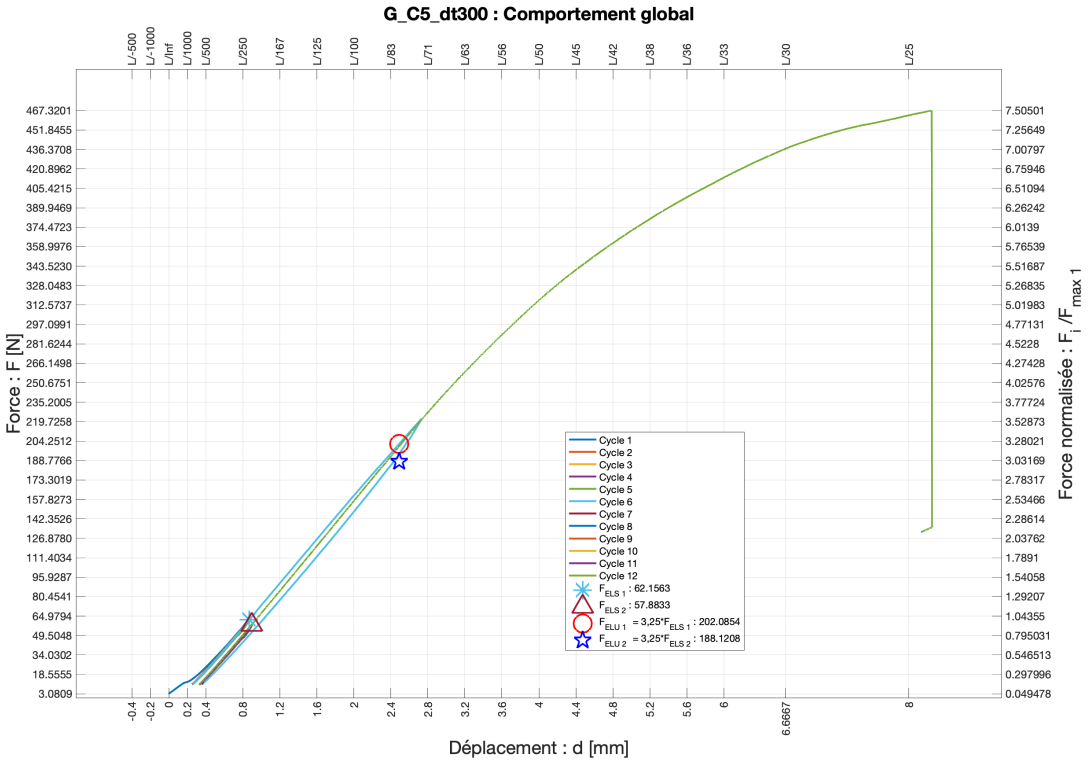


FIGURE M.620 – Comportement global avec les valeurs ELS et ELU de l'éprouvette G_C5_dt300 de la batterie 7

Déplacement résiduel

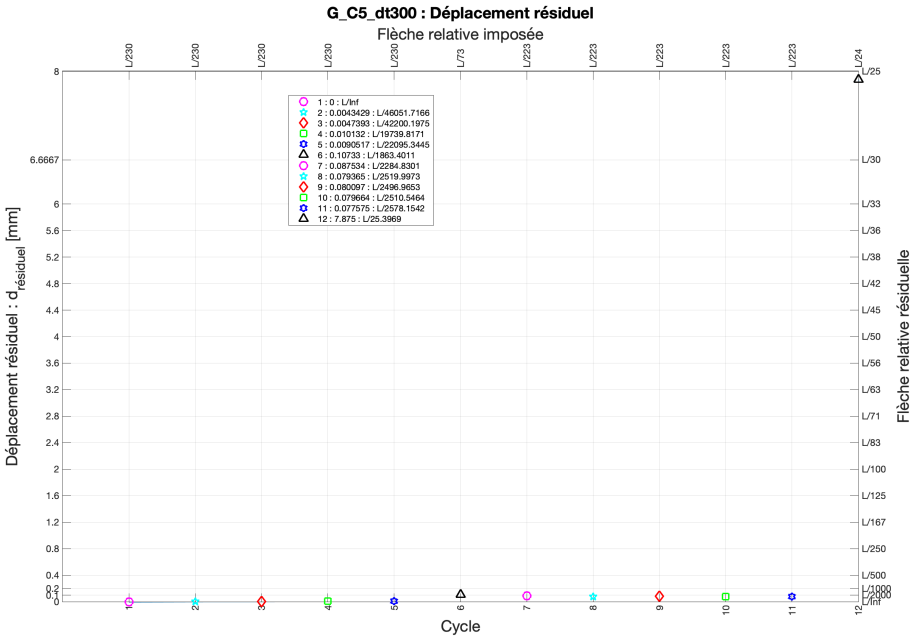


Figure M.621 – Déplacement résiduel de l'éprouvette G_C5_dt300 de la batterie 7

Force maximale

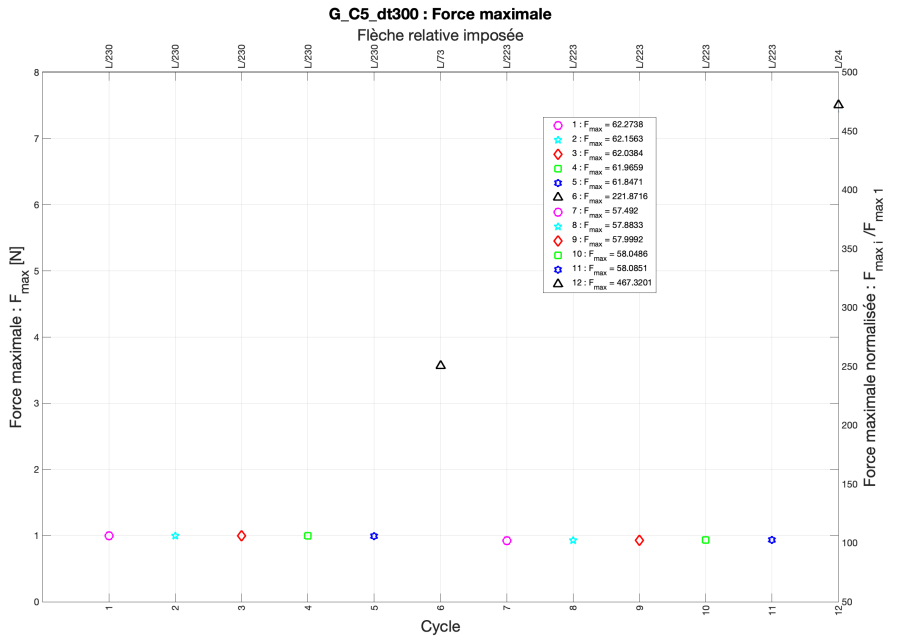


Figure M.622 – Force maximale de l'éprouvette G_C5_dt300 de la batterie 7

Module de Young

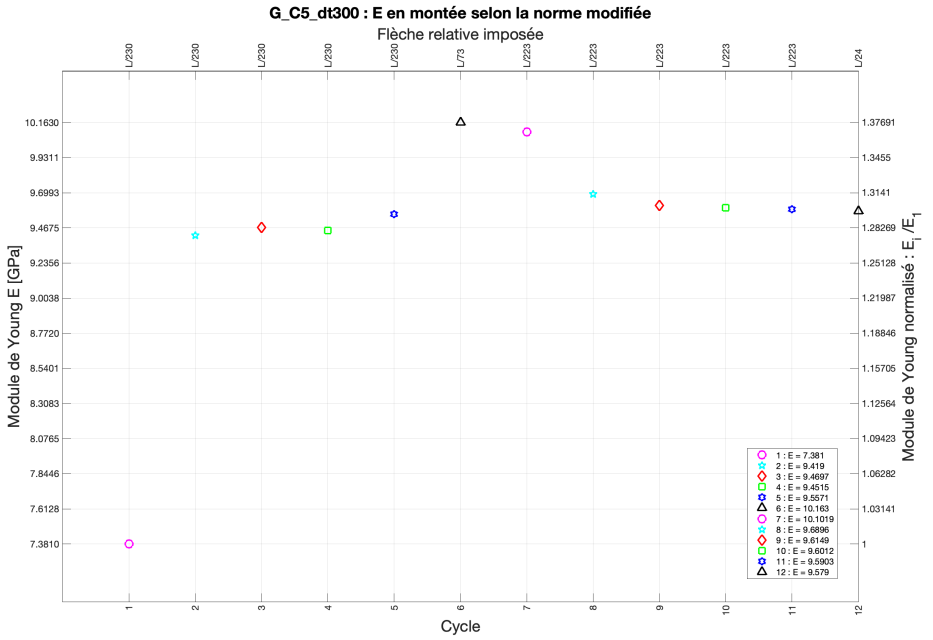


FIGURE M.623 – Module de Young en montée de l'éprouvette G_C5_dt300 de la batterie 7

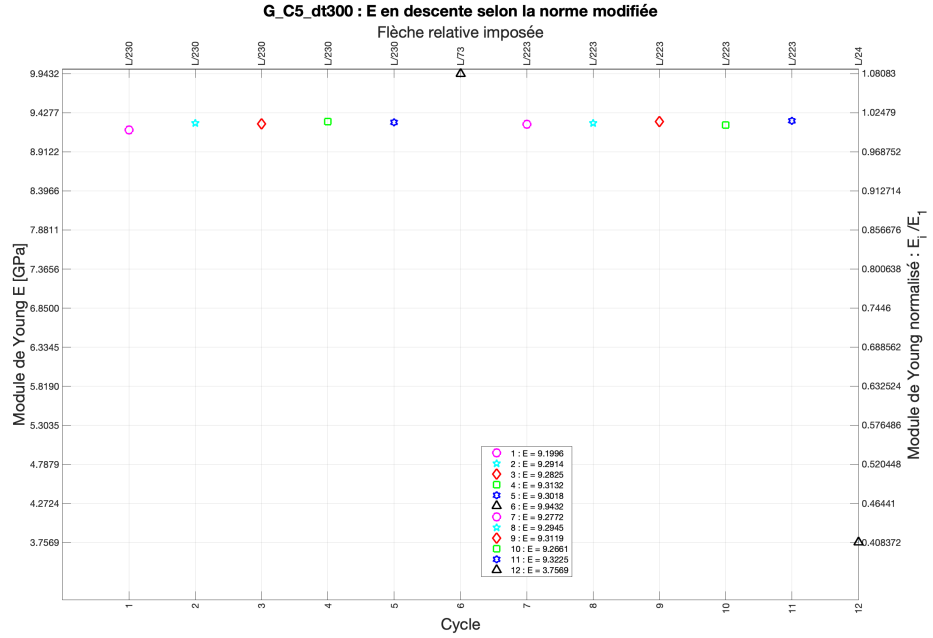


FIGURE M.624 – Module de Young en descente de l'éprouvette G_C5_dt300 de la batterie 7

Rigidité flexionnelle

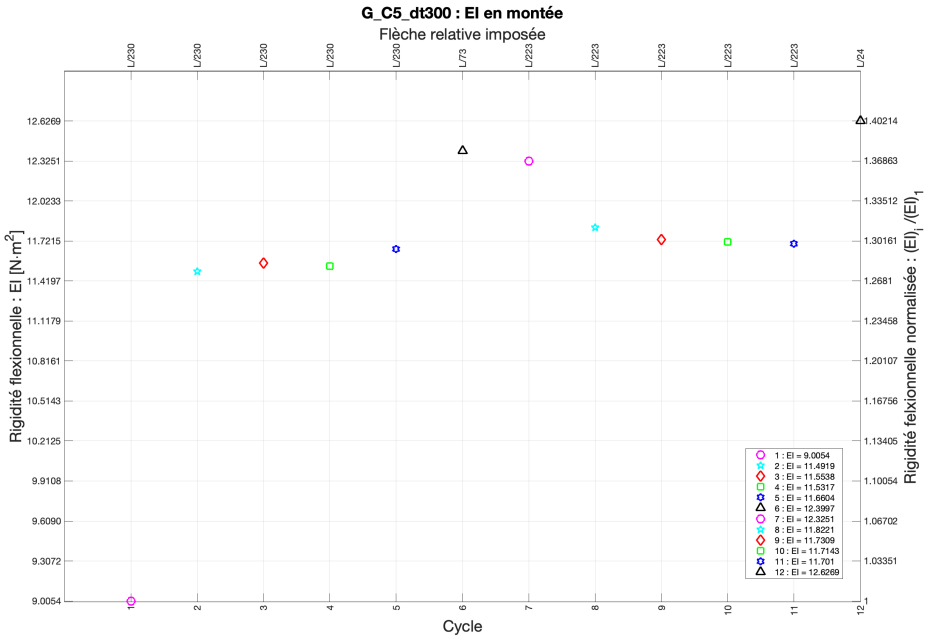


Figure M.625 – Rigidité flexionnelle en montée de l'éprouvette G_C5_dt300 de la batterie 7

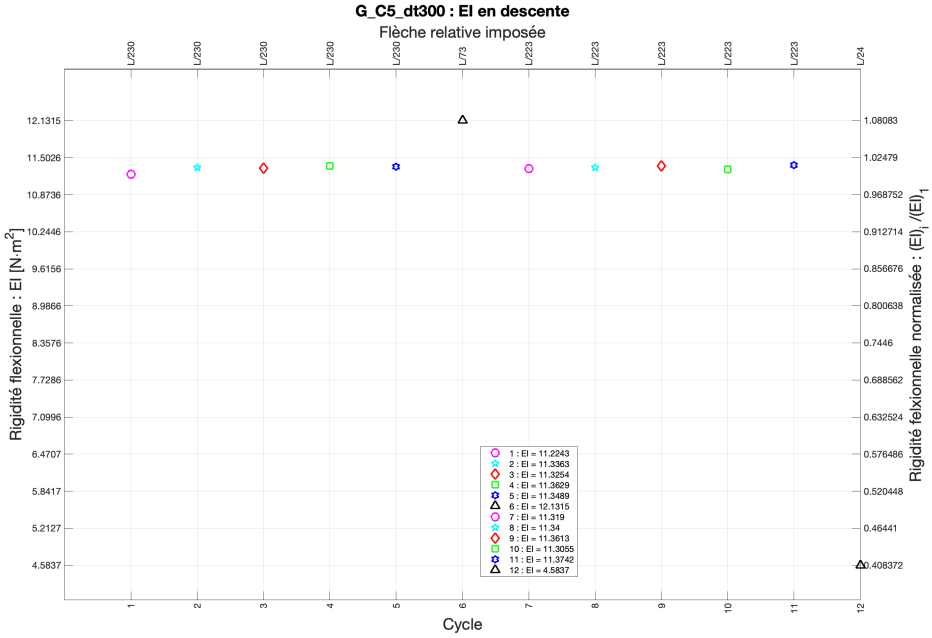


Figure M.626 – Rigidité flexionnelle en descente de l'éprouvette G_C5_dt300 de la batterie 7

Fonction S

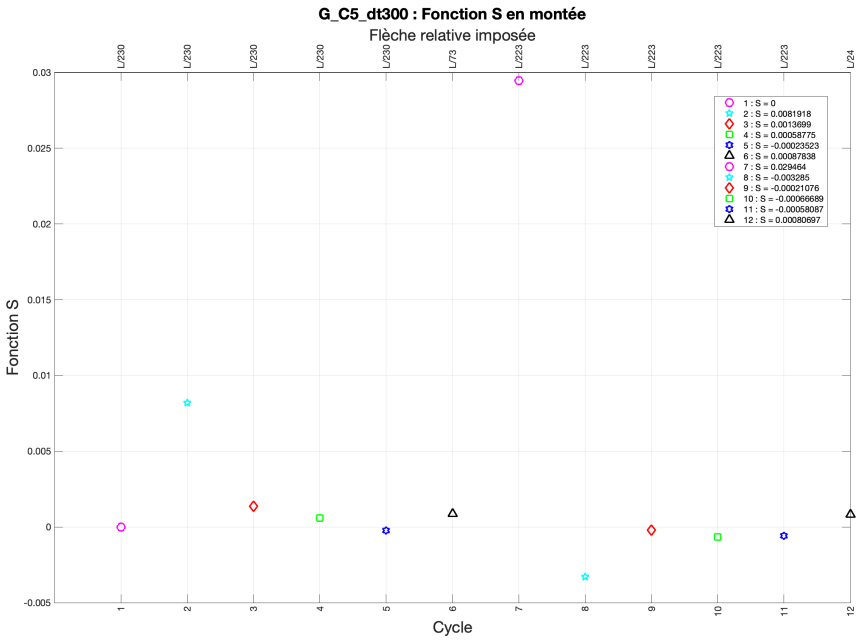


FIGURE M.627 – Fonction S en montée de l'éprouvette G_C5_dt300 de la batterie 7

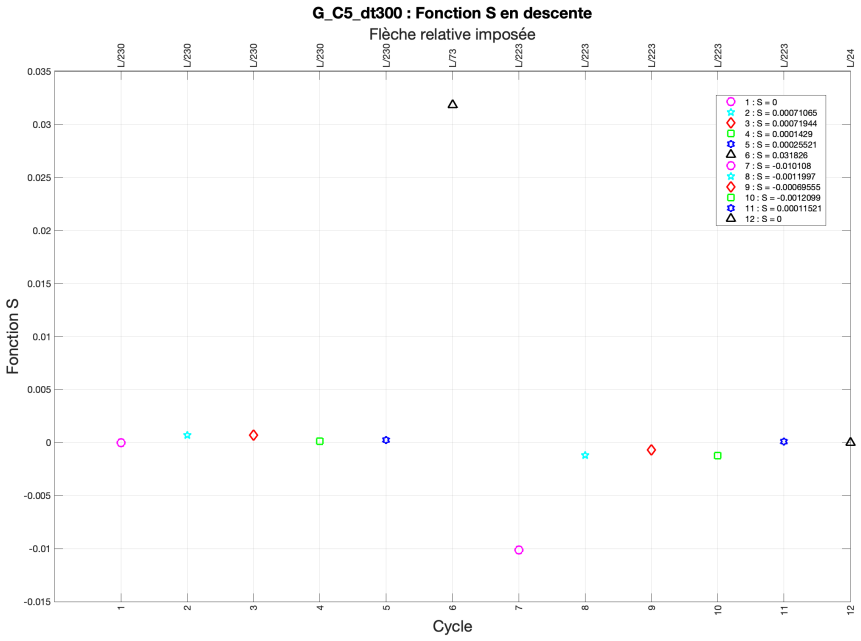


FIGURE M.628 – Fonction S en descente de l'éprouvette G_C5_dt300 de la batterie 7

ANNEXE N

DÉTAILS DES RÉSULTATS SUR GRUMES

Grume 01

Protocole et comportement dans le temps

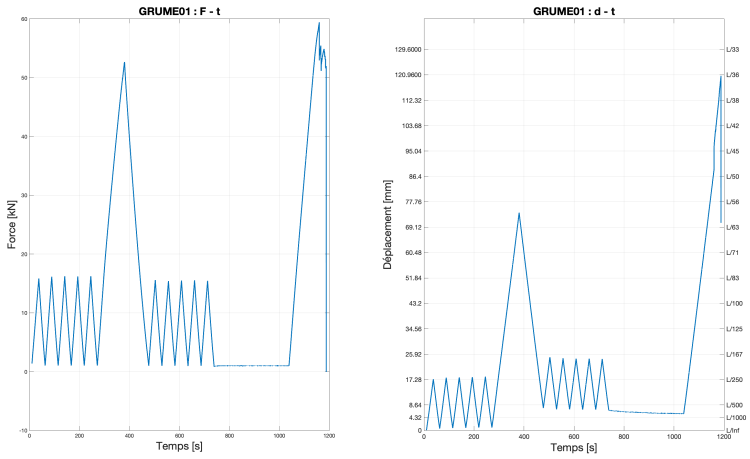


Figure N.1 – Comportement en fonction du temps de la grume 01

Global

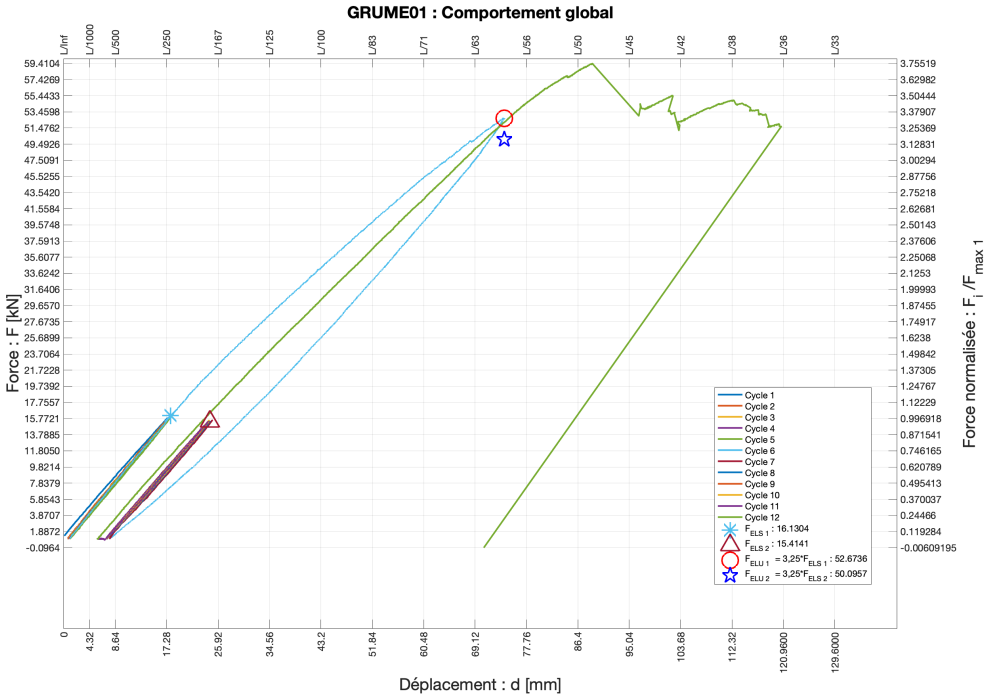


Figure N.2 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 01

Déplacement résiduel

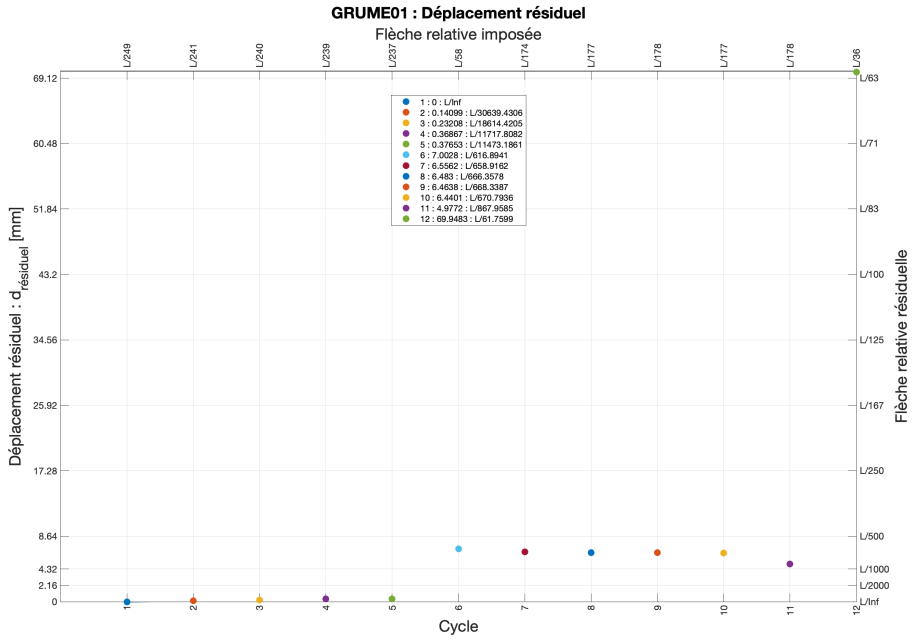


FIGURE N.3 – Déplacement résiduel de la grume 01

Force maximale

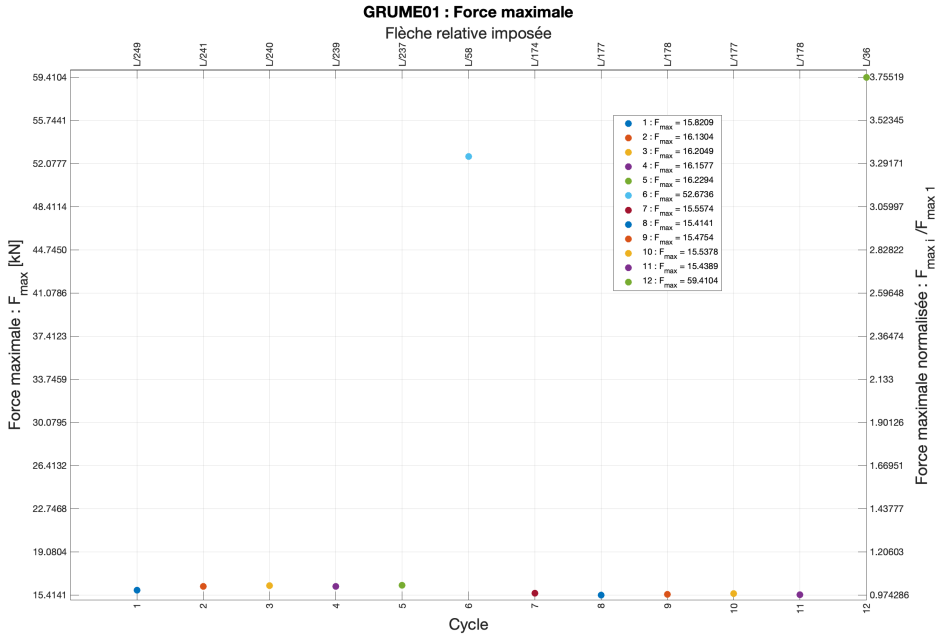


FIGURE N.4 – Force maximale de la grume 01

Rigidité flexionnelle

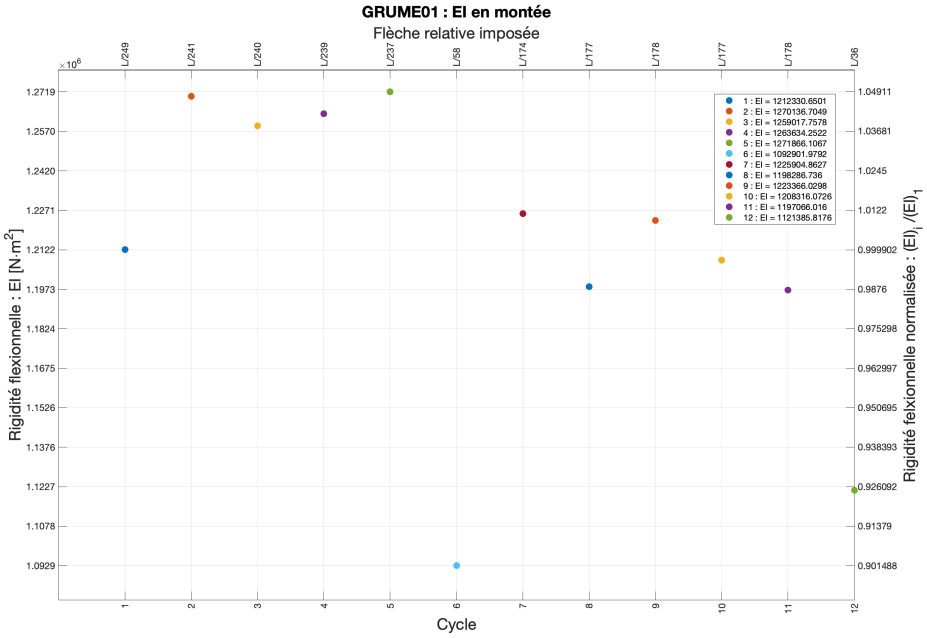


Figure N.5 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 01

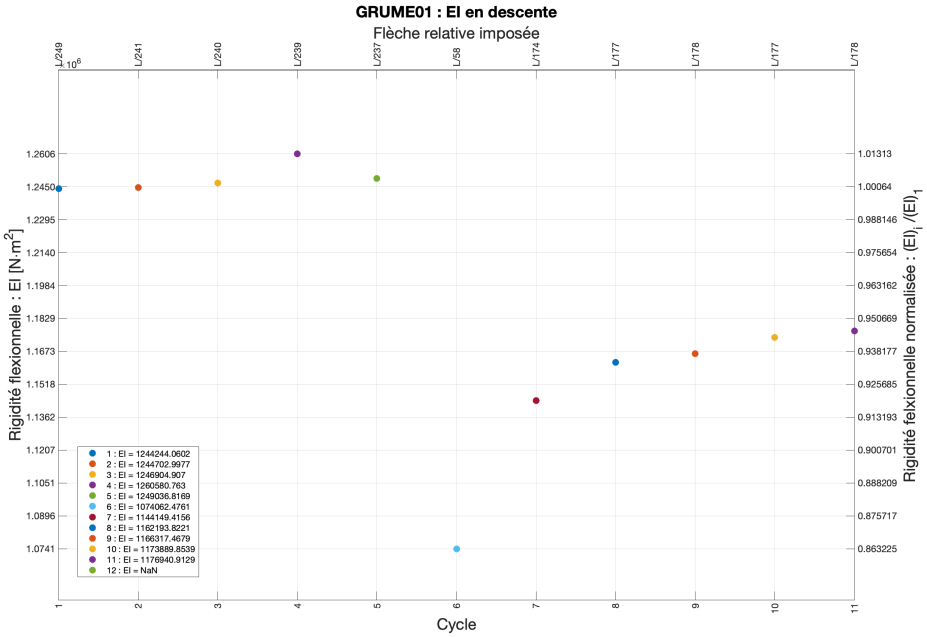


Figure N.6 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 01

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

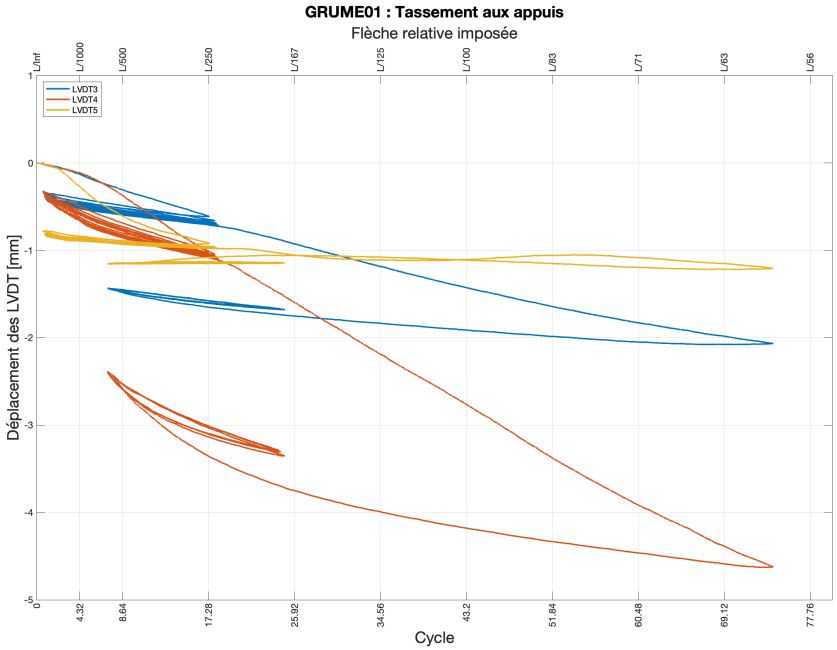


FIGURE N.7 – Tassements d'appui de la grume 01

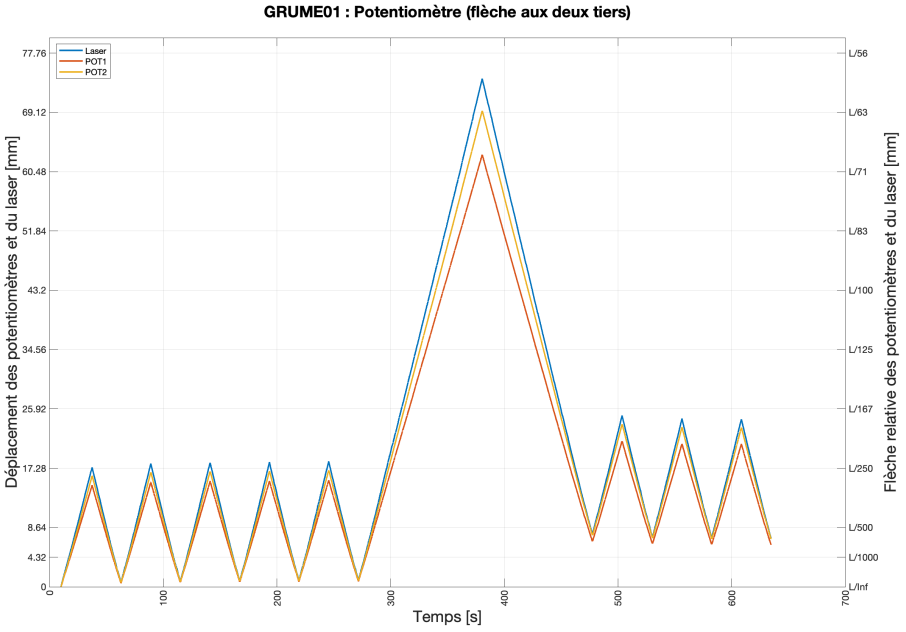


FIGURE N.8 – Flèches aux tiers de la grume 01

Grume 02

Protocole et comportement dans le temps

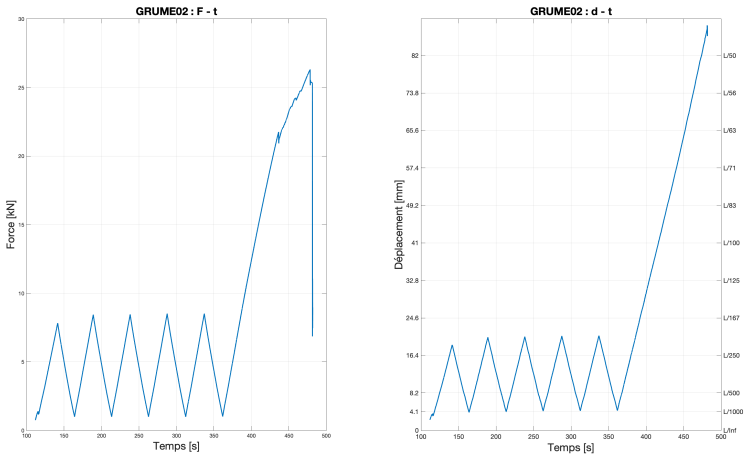


Figure N.9 – Comportement en fonction du temps de la grume 02

Global

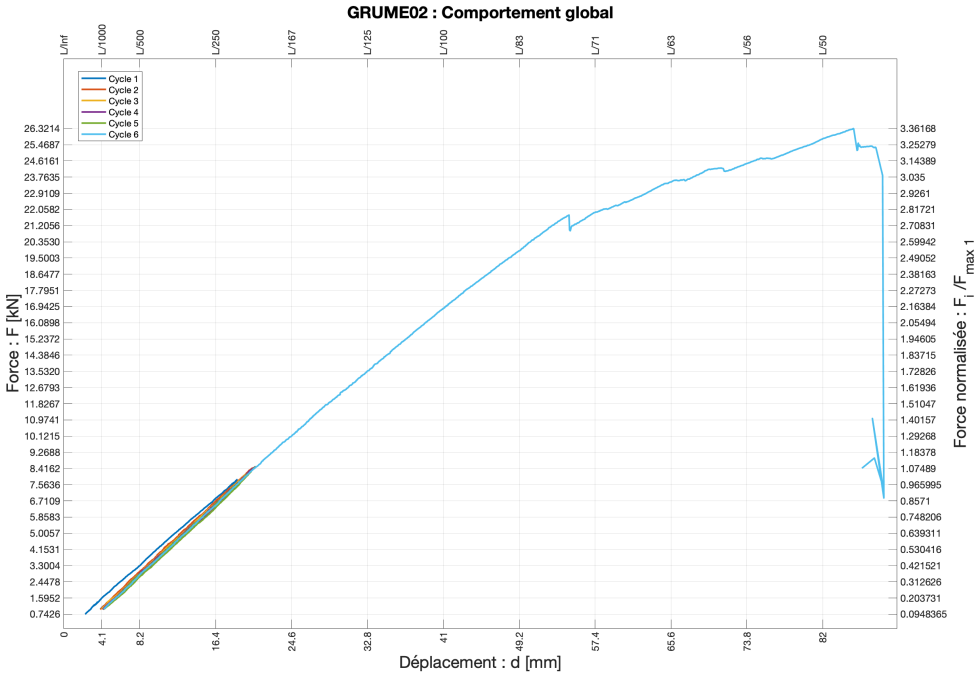


Figure N.10 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 02

Déplacement résiduel

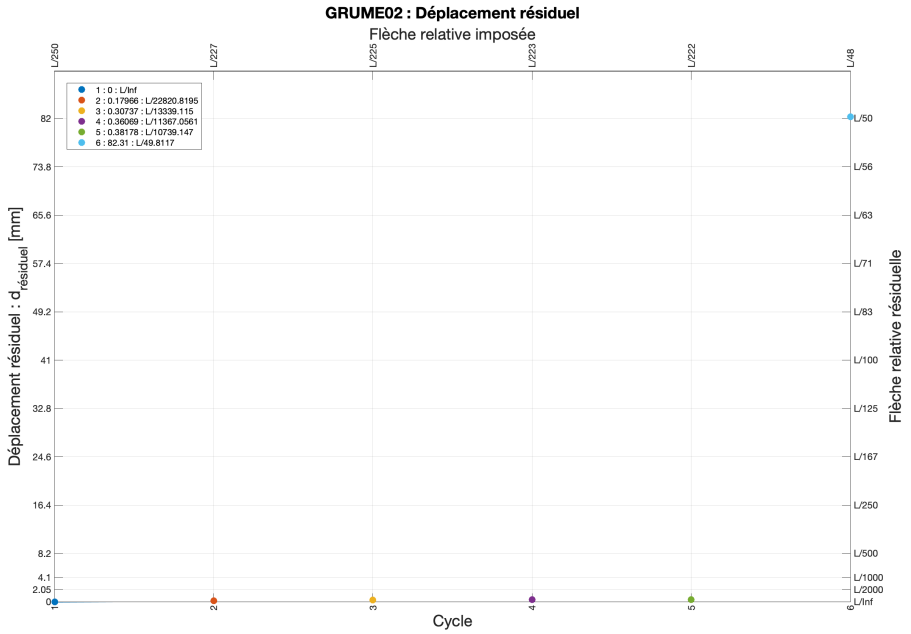


FIGURE N.11 – Déplacement résiduel de la grume 02

Force maximale

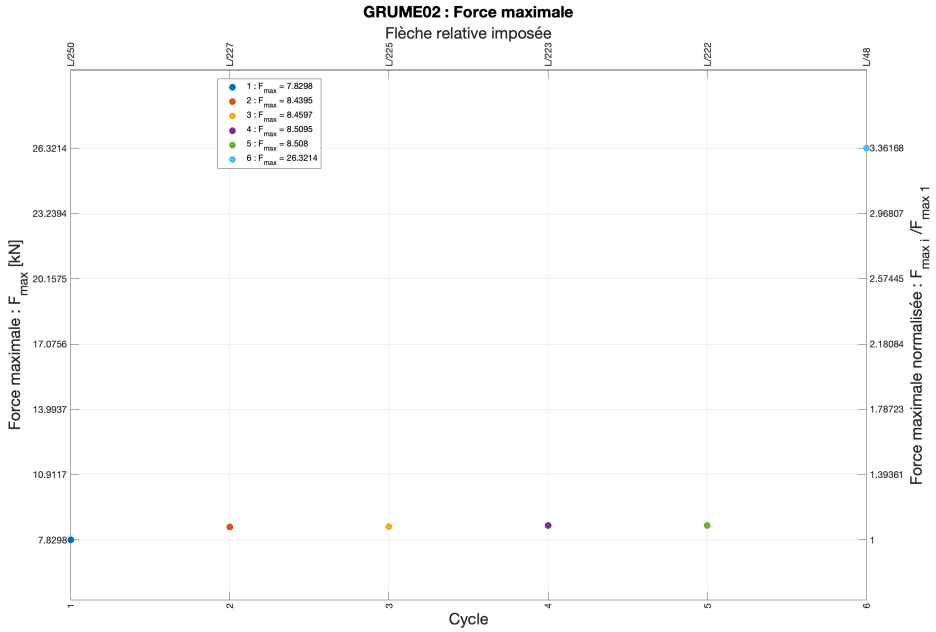


FIGURE N.12 – Force maximale de la grume 02

Rigidité flexionnelle

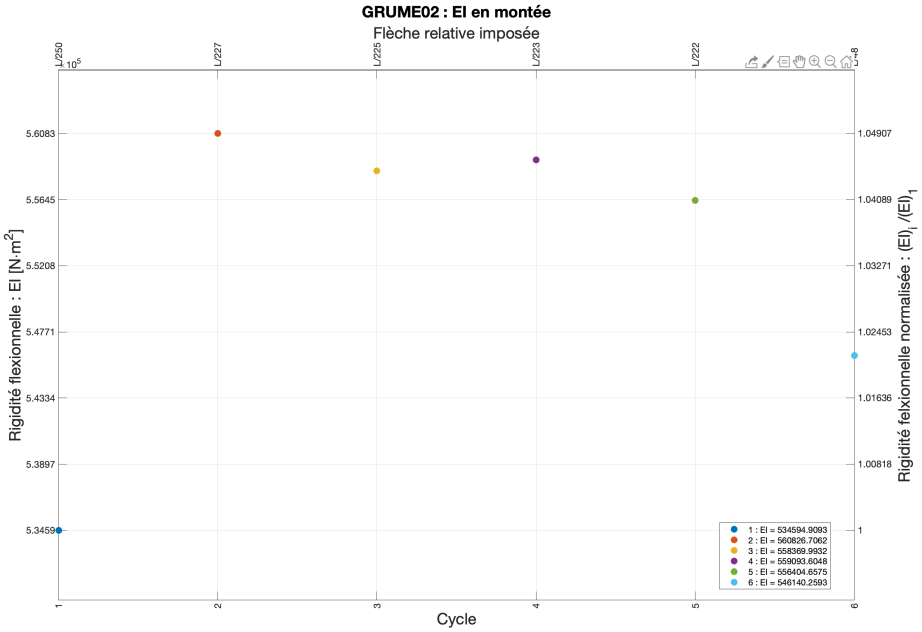


FIGURE N.13 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 02

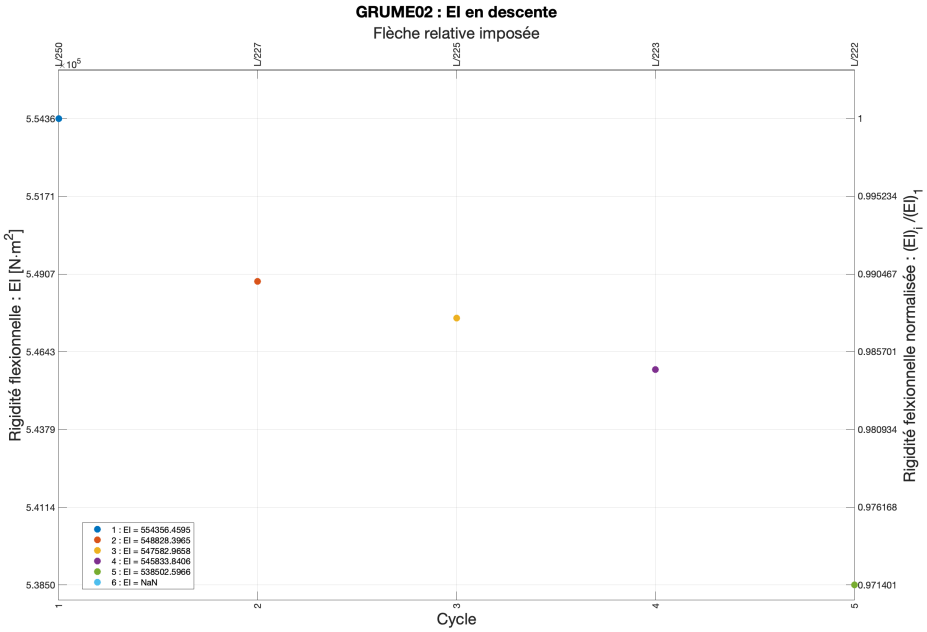


FIGURE N.14 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 02

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

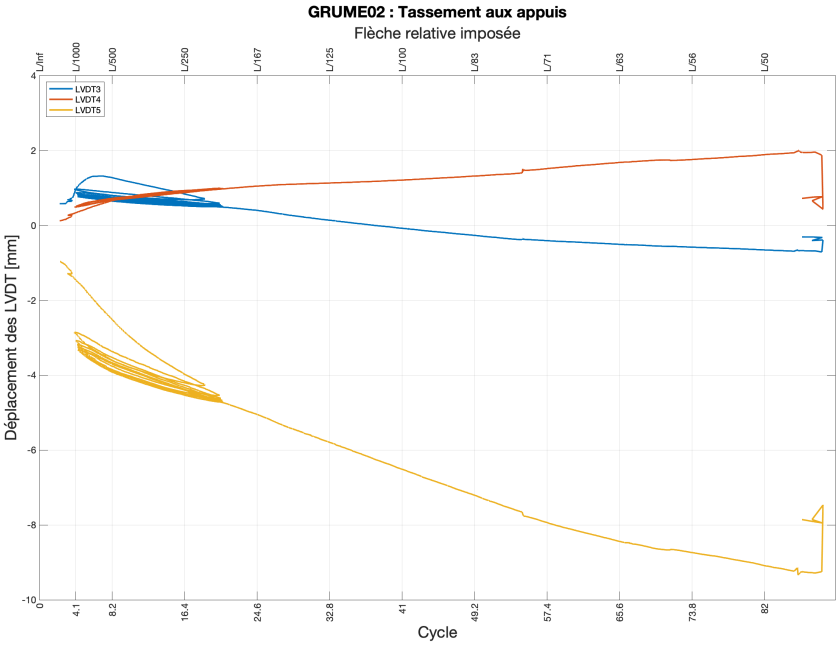


FIGURE N.15 – Tassements d'appui de la grume 02

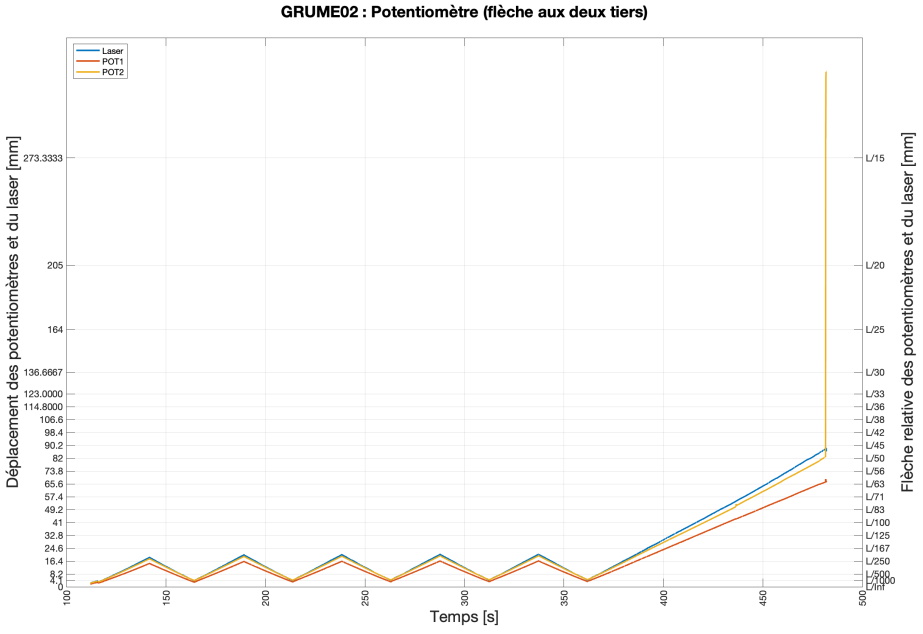


FIGURE N.16 – Flèches aux tiers de la grume 02

Grume 03

Protocole et comportement dans le temps

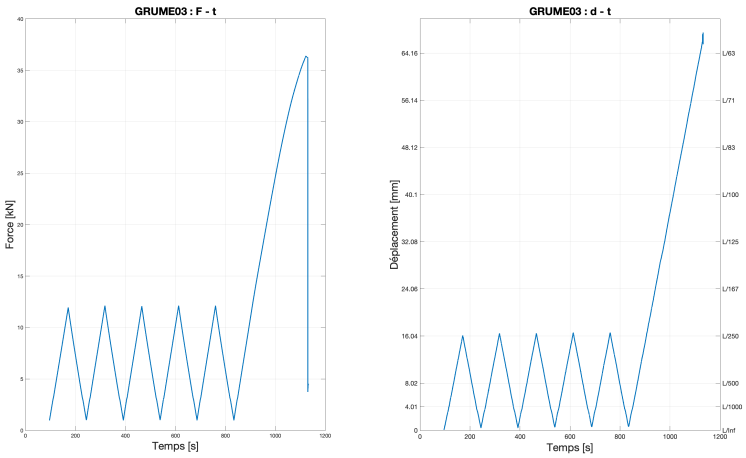


Figure N.17 – Comportement en fonction du temps de la grume 03

Global

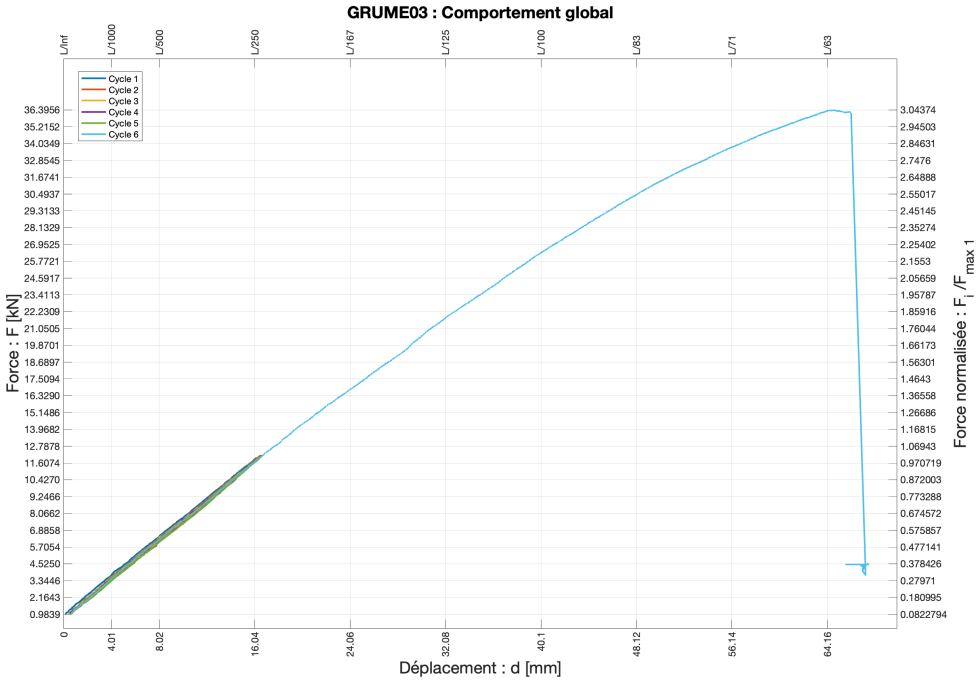


Figure N.18 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 03

Déplacement résiduel

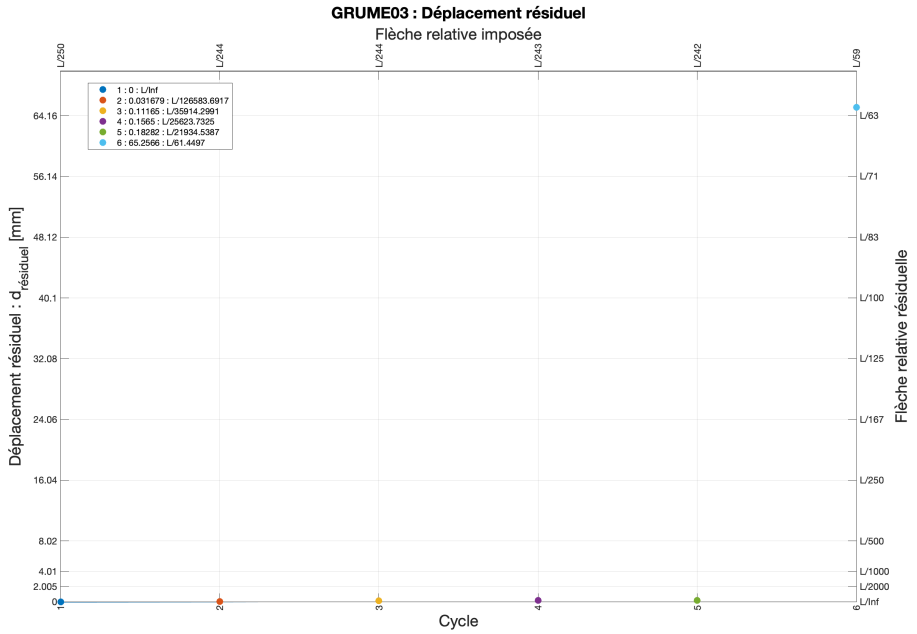


FIGURE N.19 – Déplacement résiduel de la grume 03

Force maximale

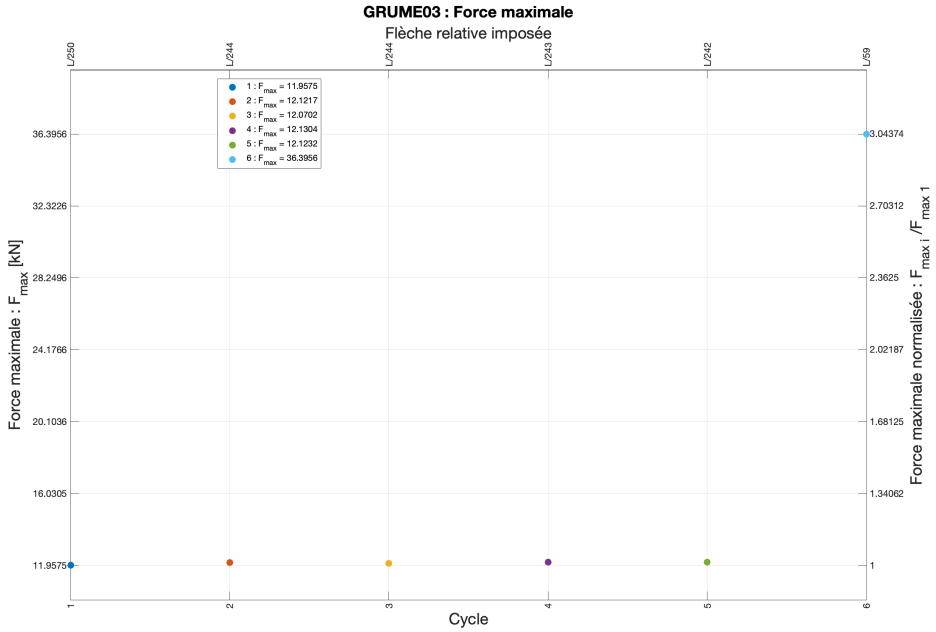


FIGURE N.20 – Force maximale de la grume 03

Rigidité flexionnelle

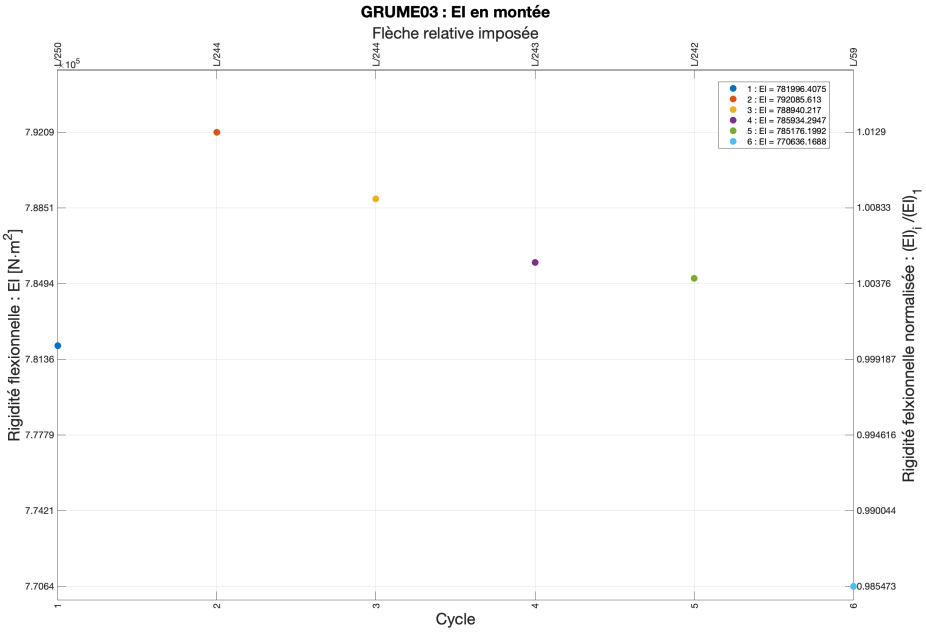


FIGURE N.21 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 03

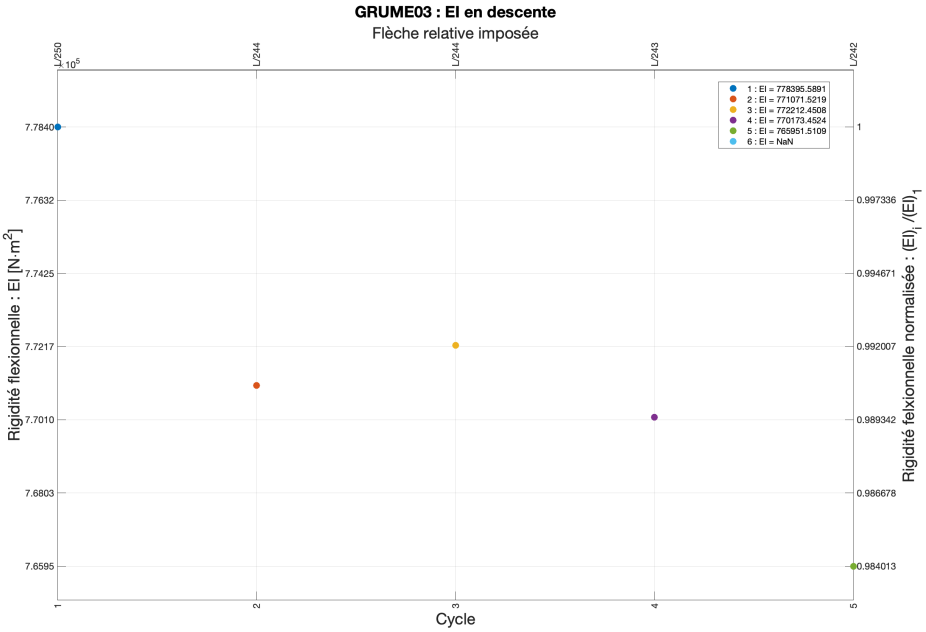


FIGURE N.22 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 03

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

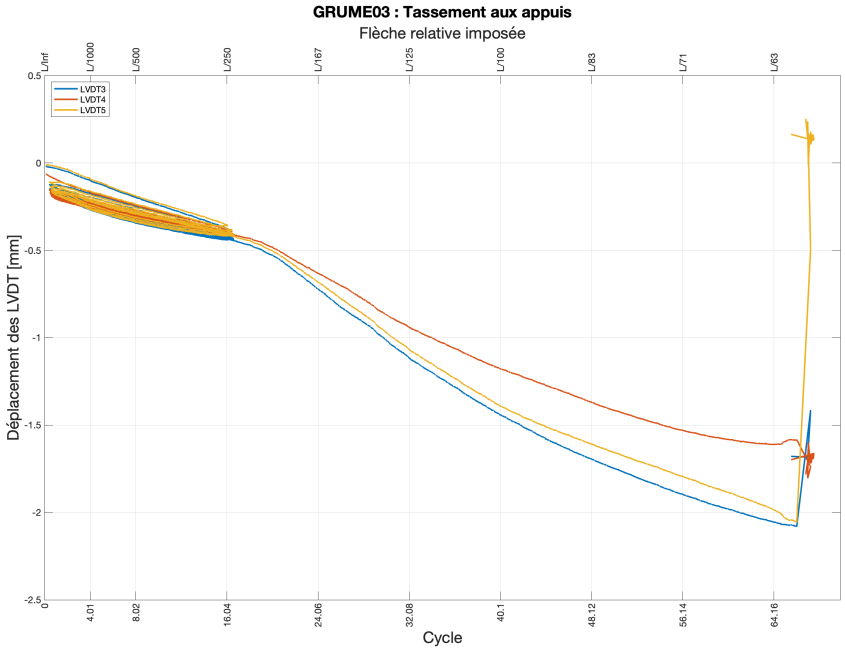


FIGURE N.23 – Tassements d'appui de la grume 03

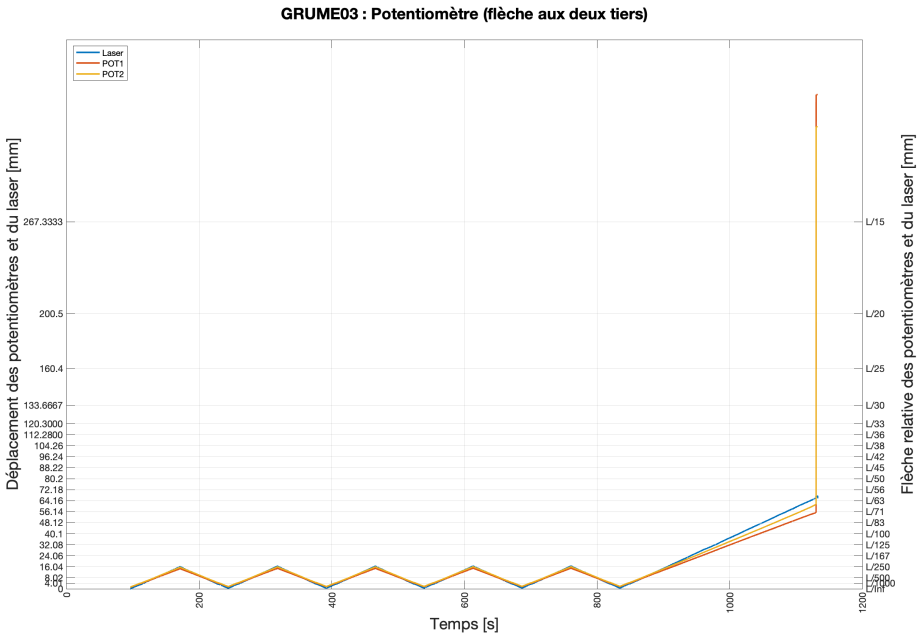


FIGURE N.24 – Flèches aux tiers de la grume 03

Grume 04

Protocole et comportement dans le temps

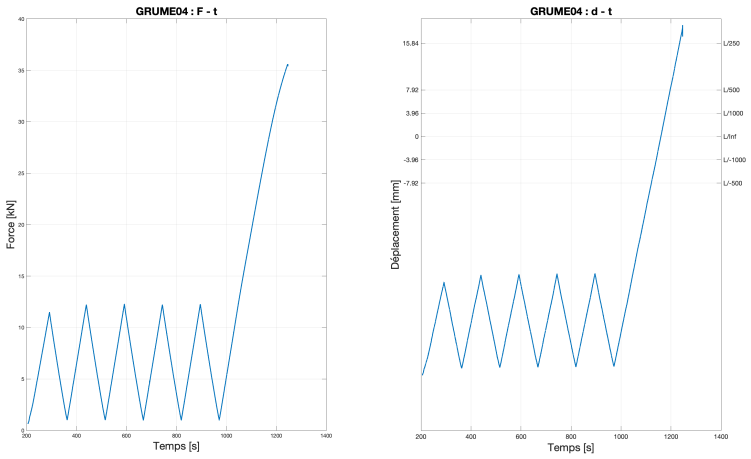


Figure N.25 – Comportement en fonction du temps de la grume 04

Global

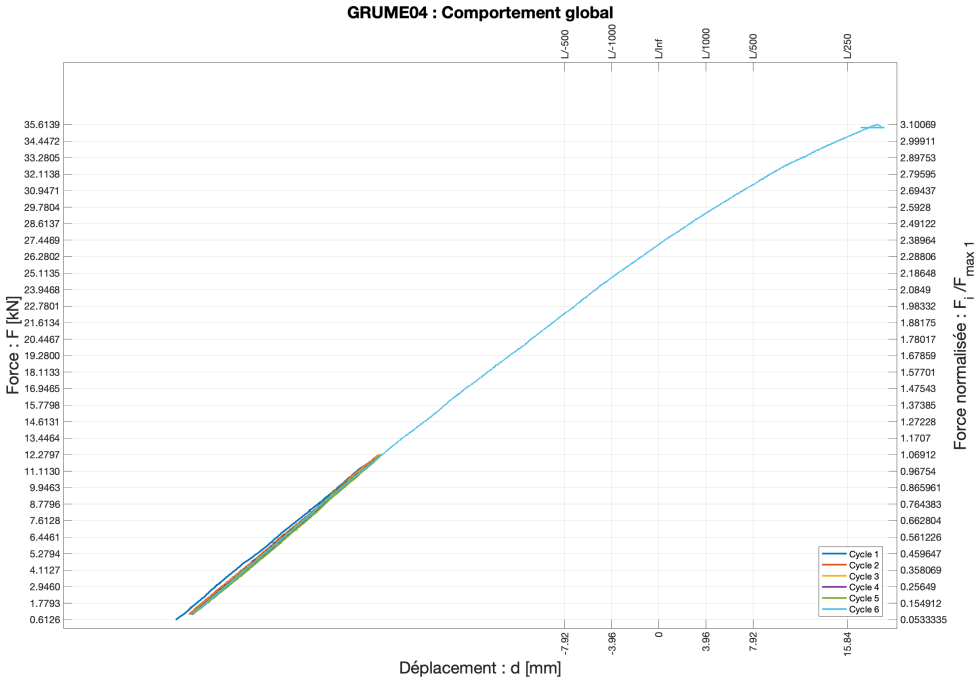


Figure N.26 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 04

Déplacement résiduel

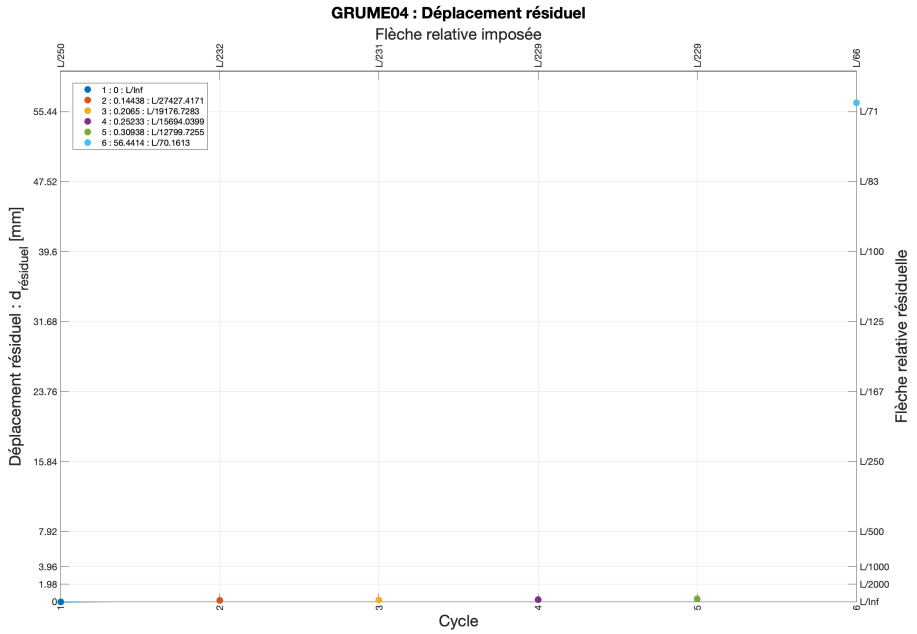


FIGURE N.27 – Déplacement résiduel de la grume 04

Force maximale

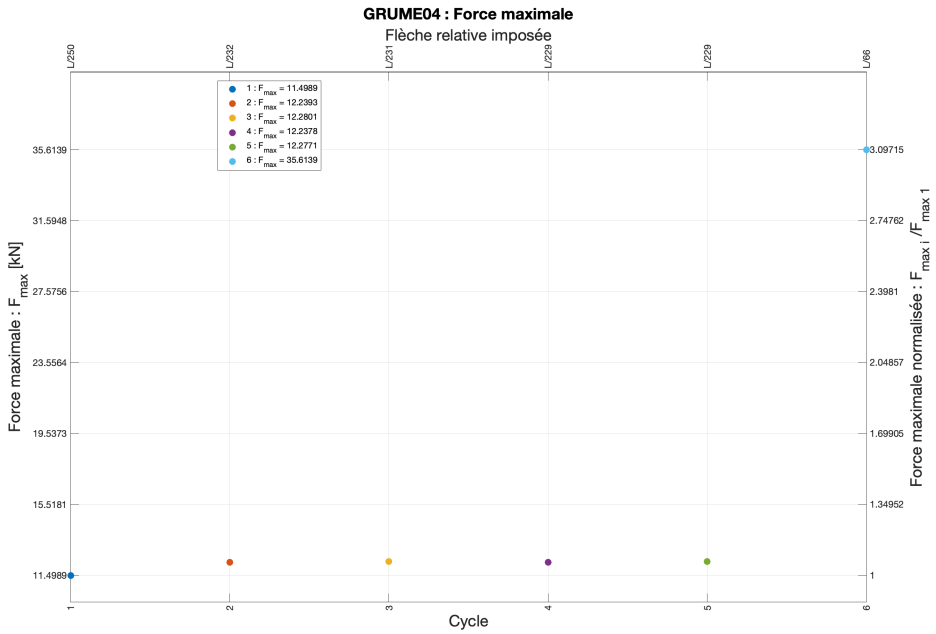


FIGURE N.28 – Force maximale de la grume 04

Rigidité flexionnelle

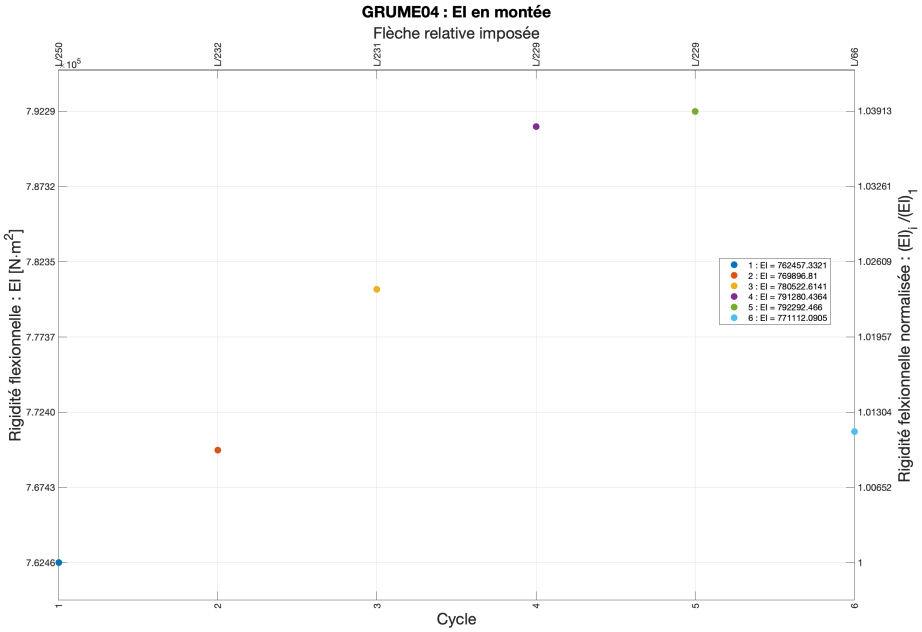


Figure N.29 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 04

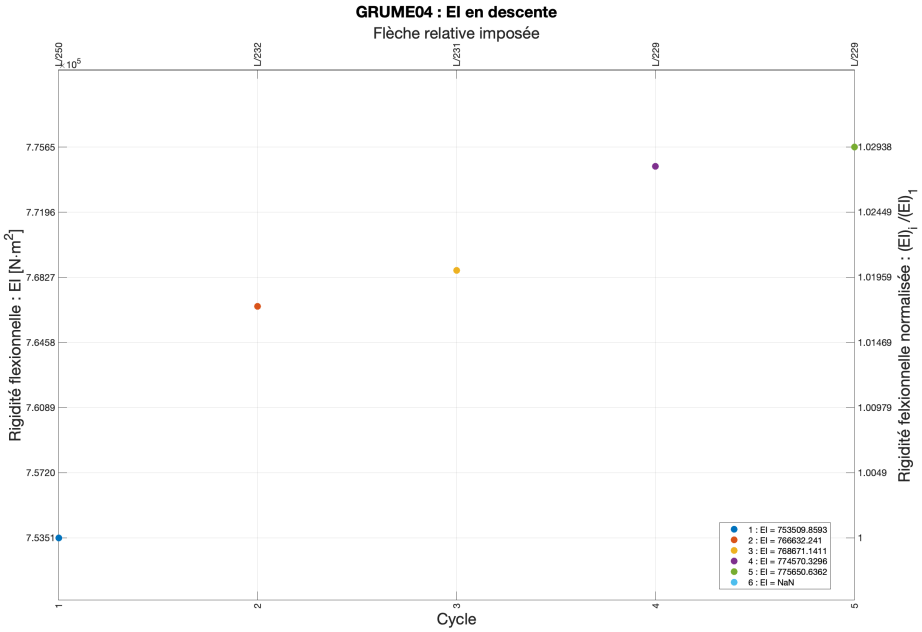


Figure N.30 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 04

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

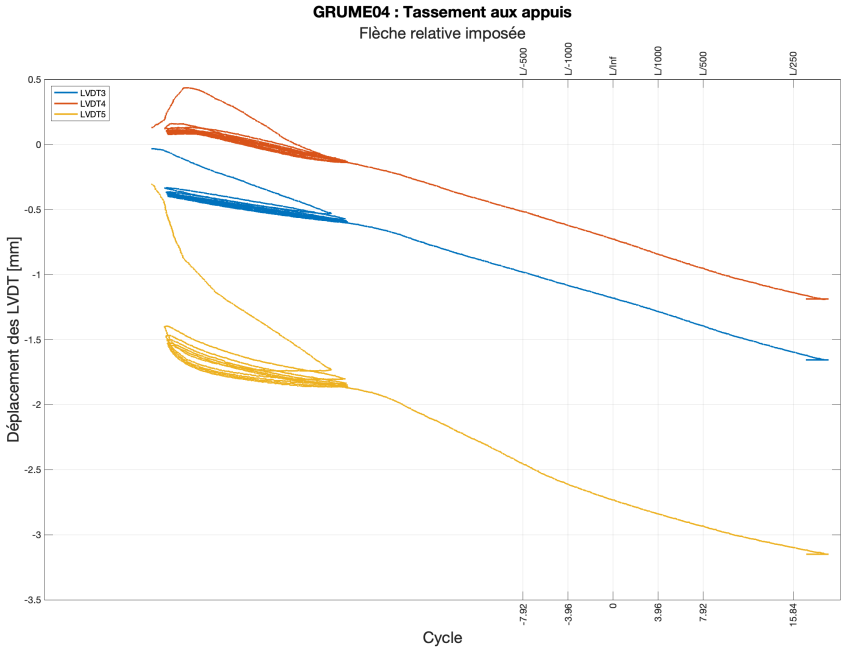


FIGURE N.31 – Tassements d'appui de la grume 04

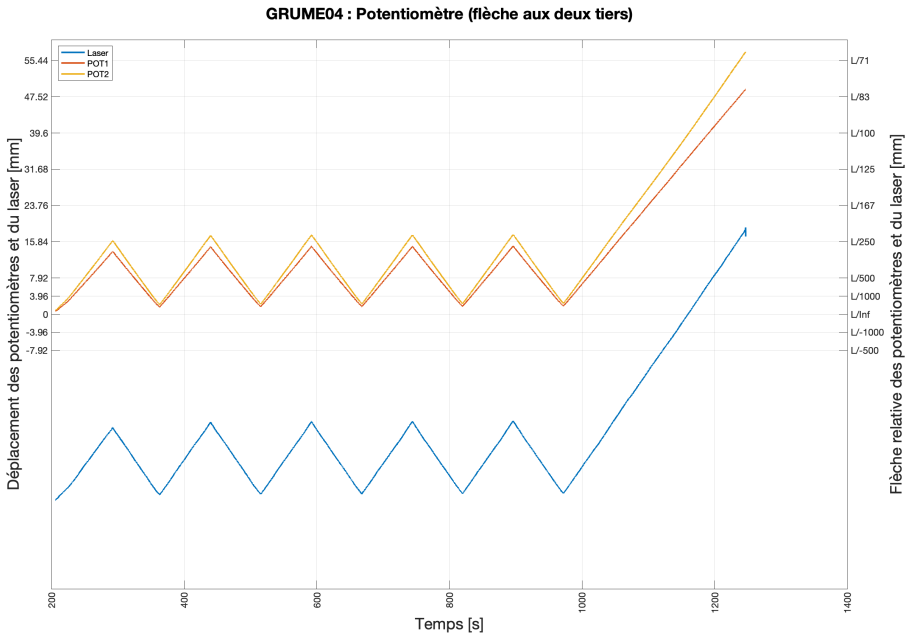


FIGURE N.32 – Flèches aux tiers de la grume 04

Grume 05

Protocole et comportement dans le temps

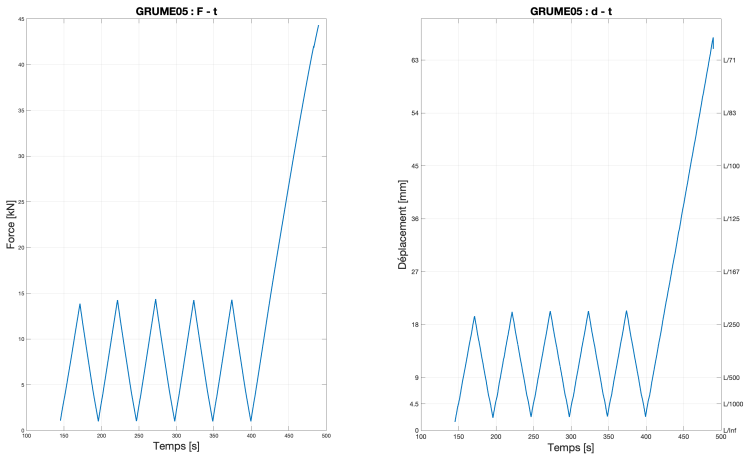


Figure N.33 – Comportement en fonction du temps de la grume 05

Global

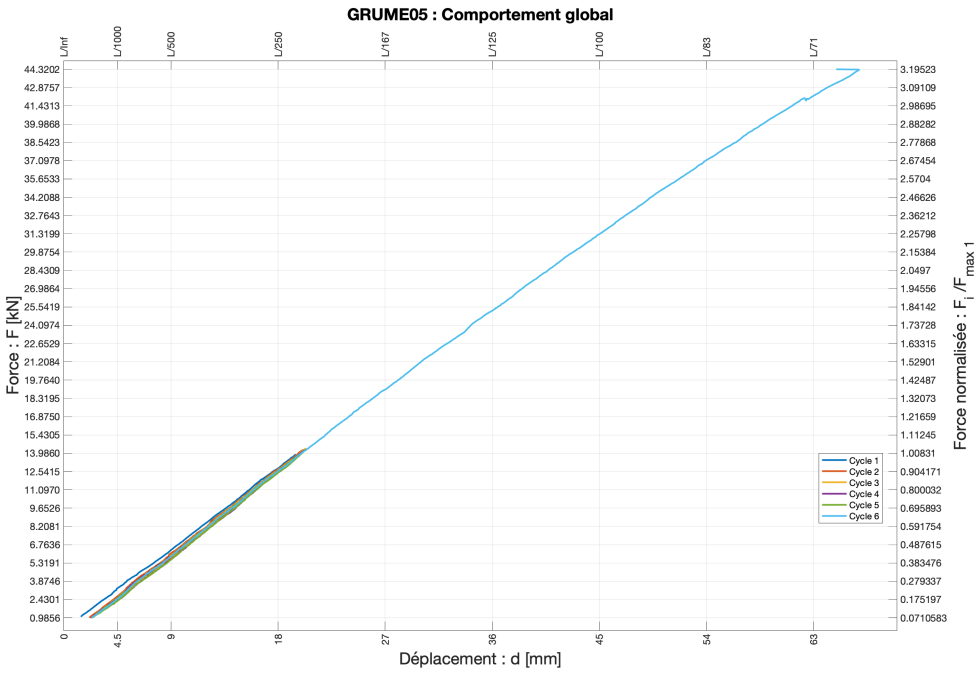


Figure N.34 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 05

Déplacement résiduel

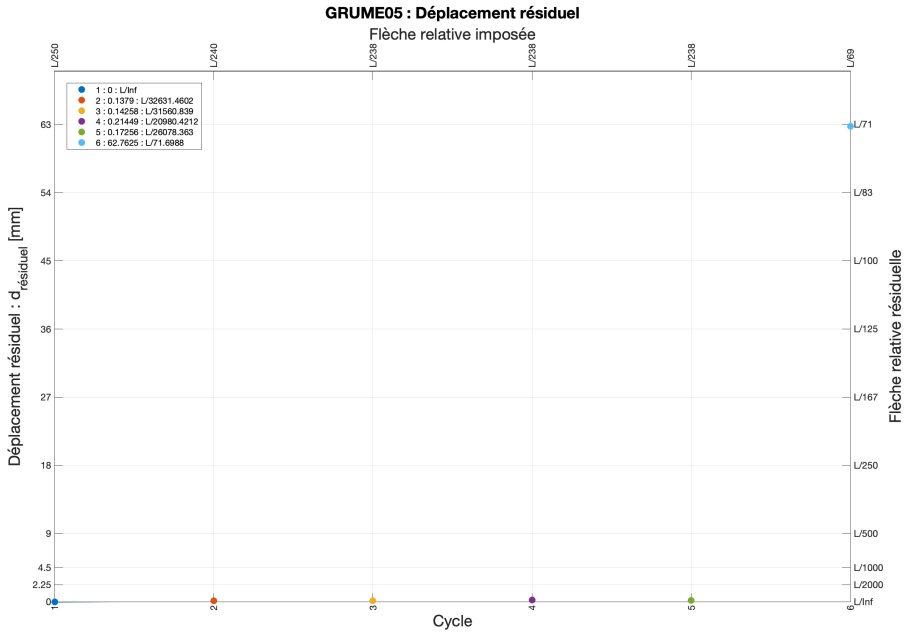


FIGURE N.35 – Déplacement résiduel de la grume 05

Force maximale

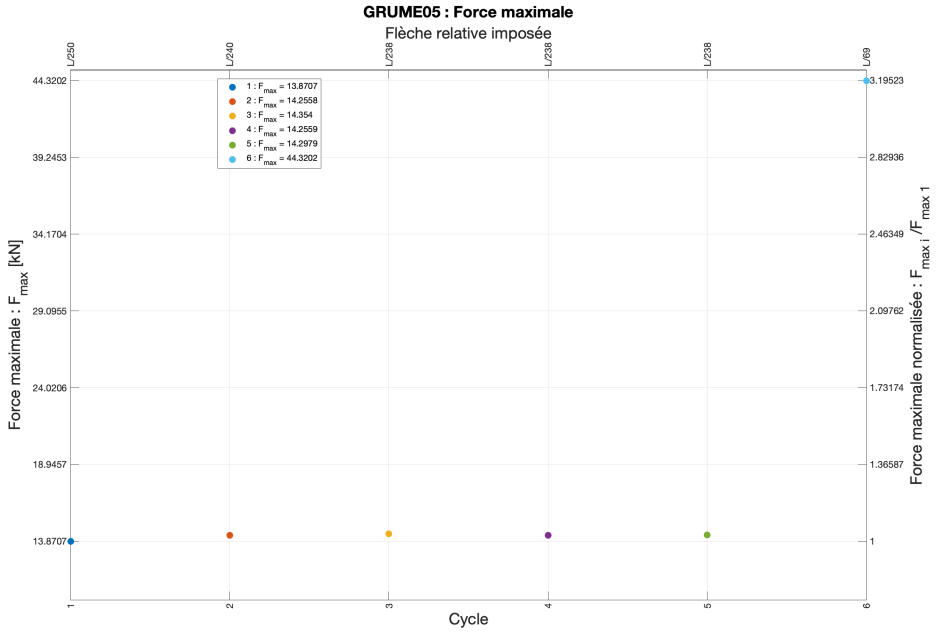


FIGURE N.36 – Force maximale de la grume 05

Rigidité flexionnelle

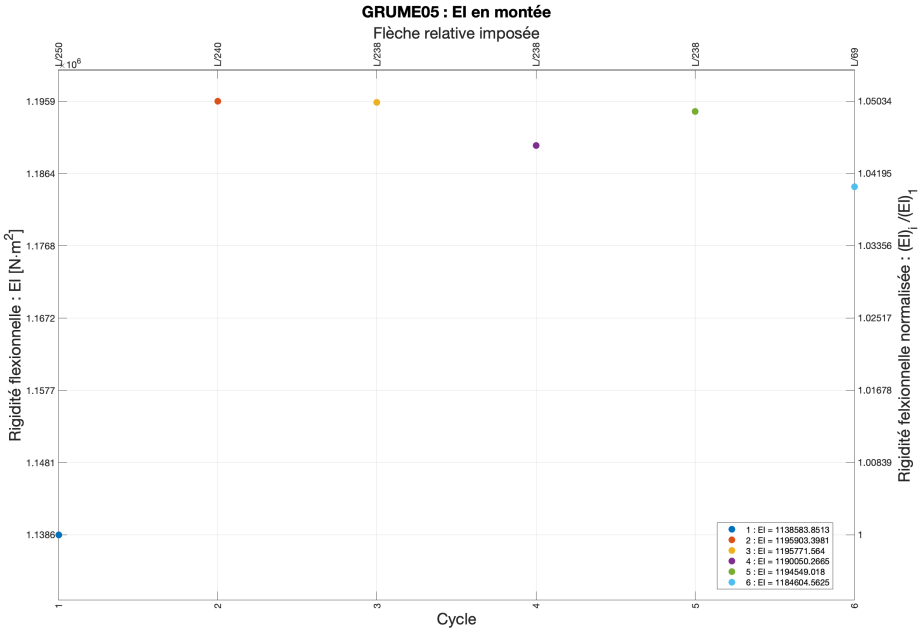


Figure N.37 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 05

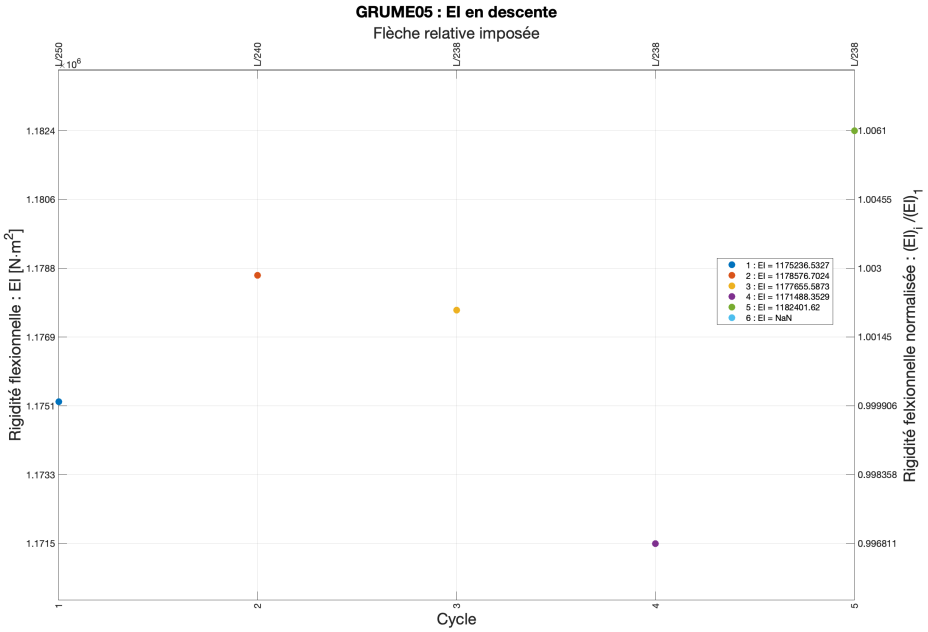


Figure N.38 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 05

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

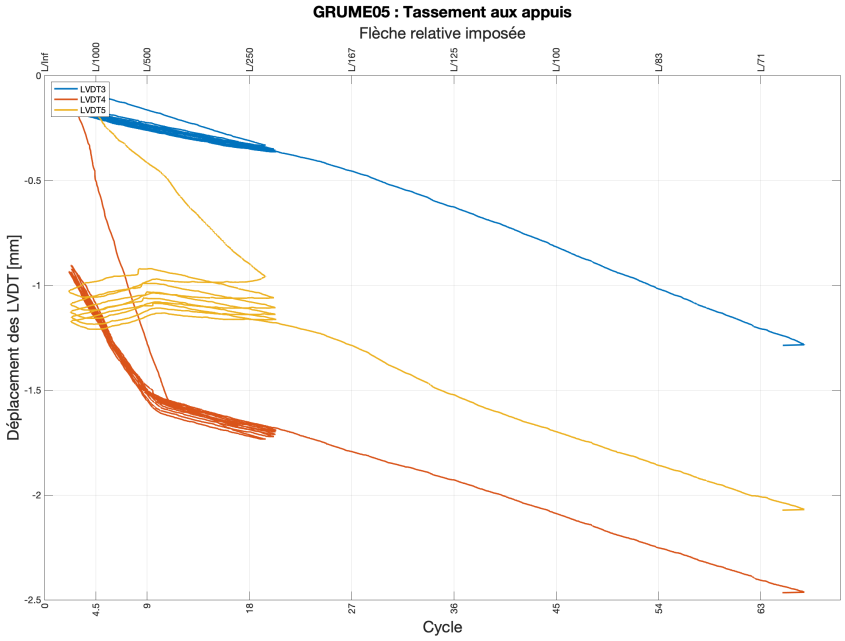


FIGURE N.39 – Tassements d'appui de la grume 05

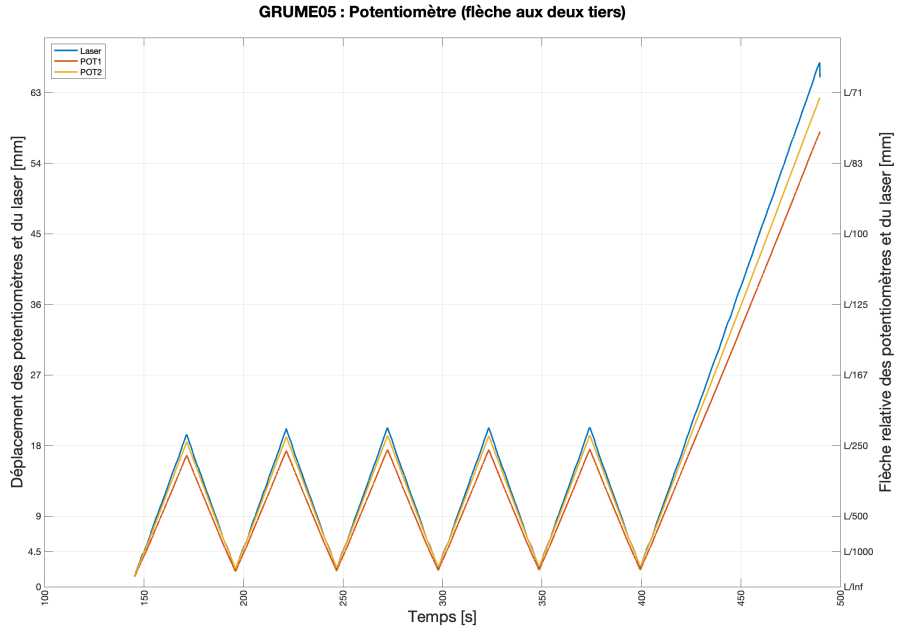


FIGURE N.40 – Flèches aux tiers de la grume 05

Grume 06

Protocole et comportement dans le temps

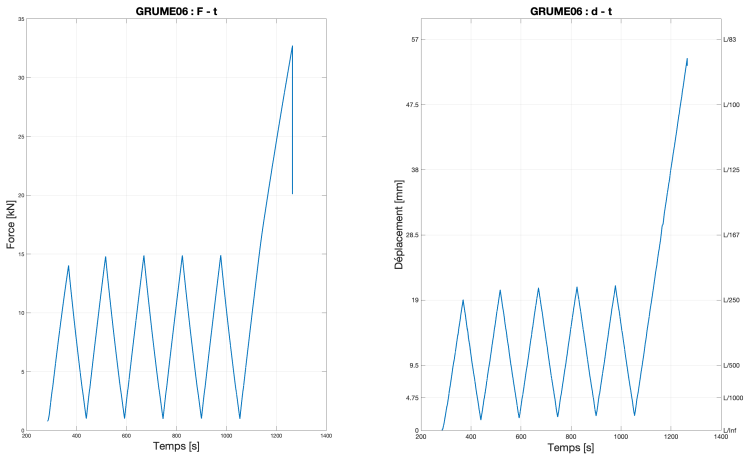


Figure N.41 – Comportement en fonction du temps de la grume 06

Global

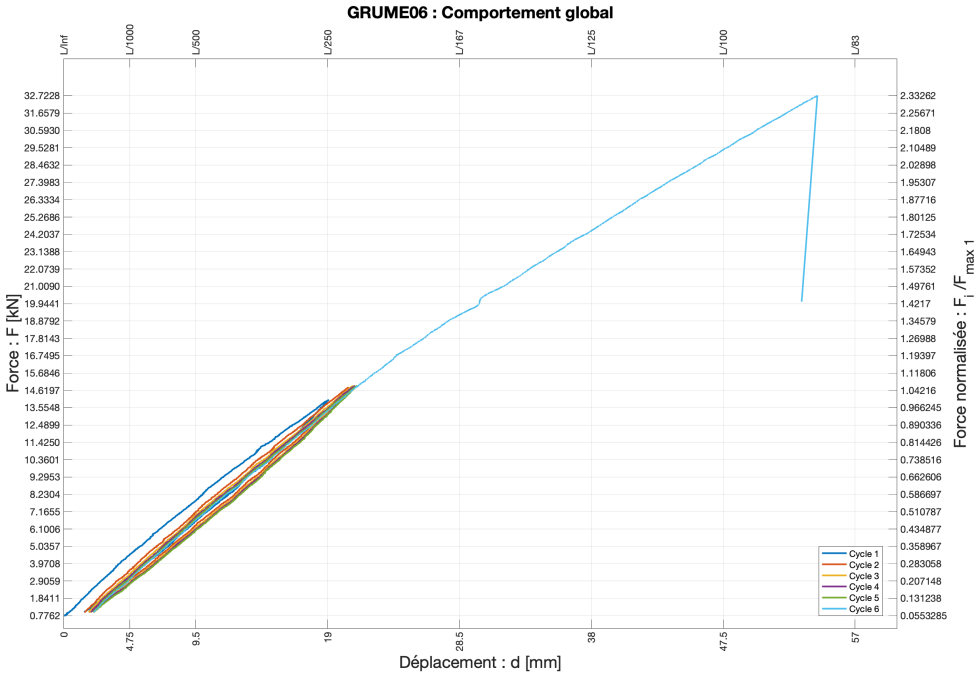


Figure N.42 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 06

Déplacement résiduel

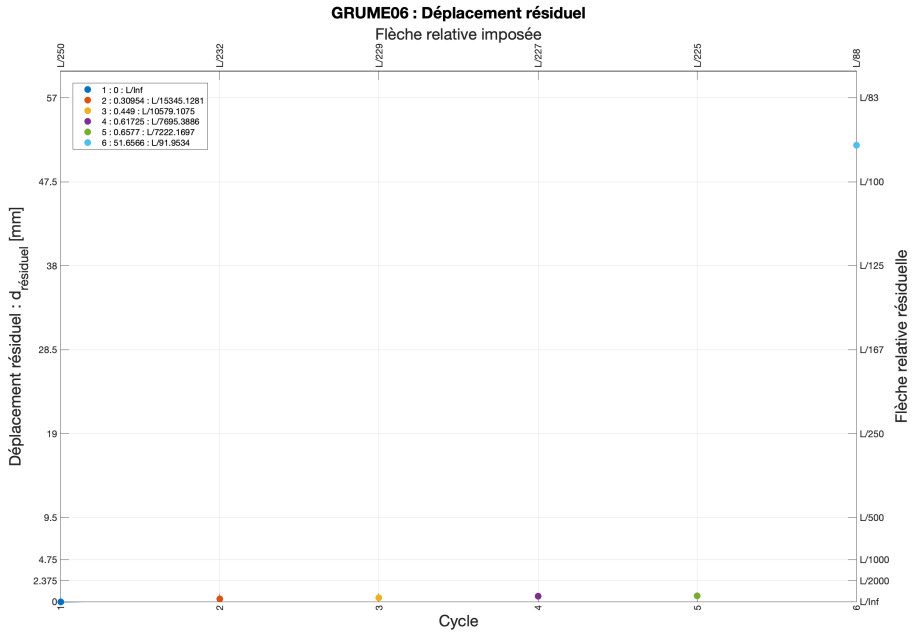


FIGURE N.43 – Déplacement résiduel de la grume 06

Force maximale

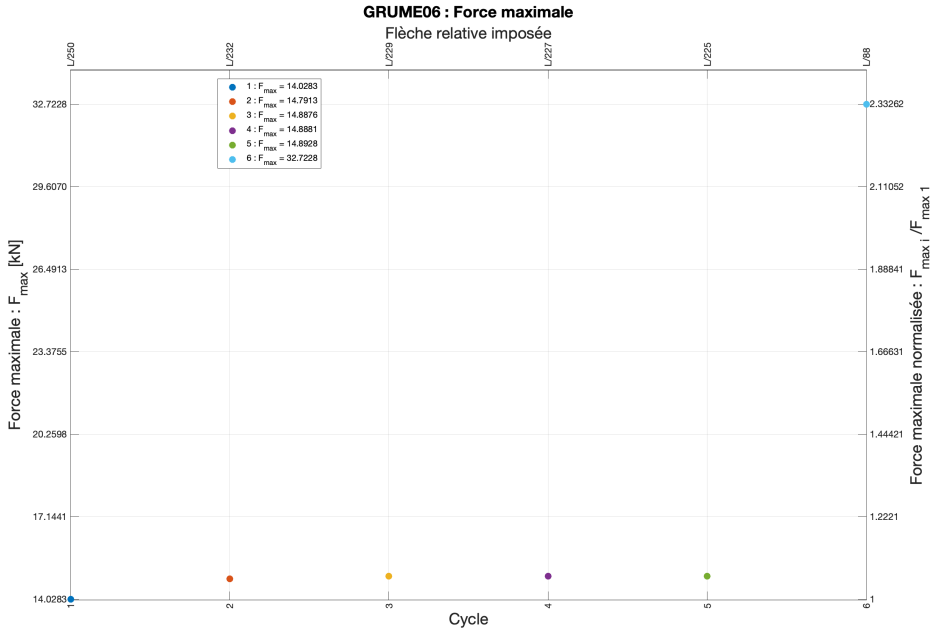


FIGURE N.44 – Force maximale de la grume 06

Rigidité flexionnelle

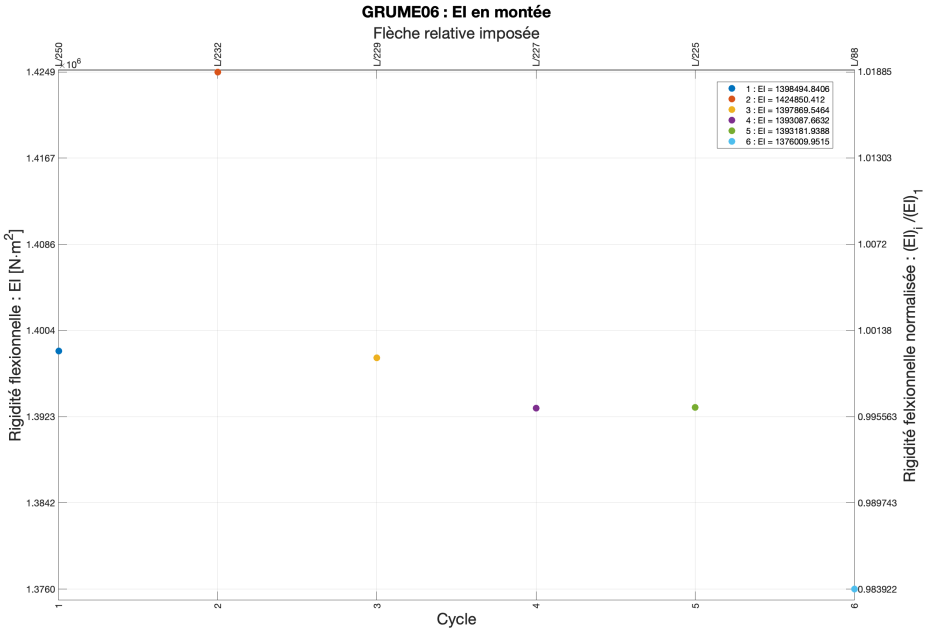


Figure N.45 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 06

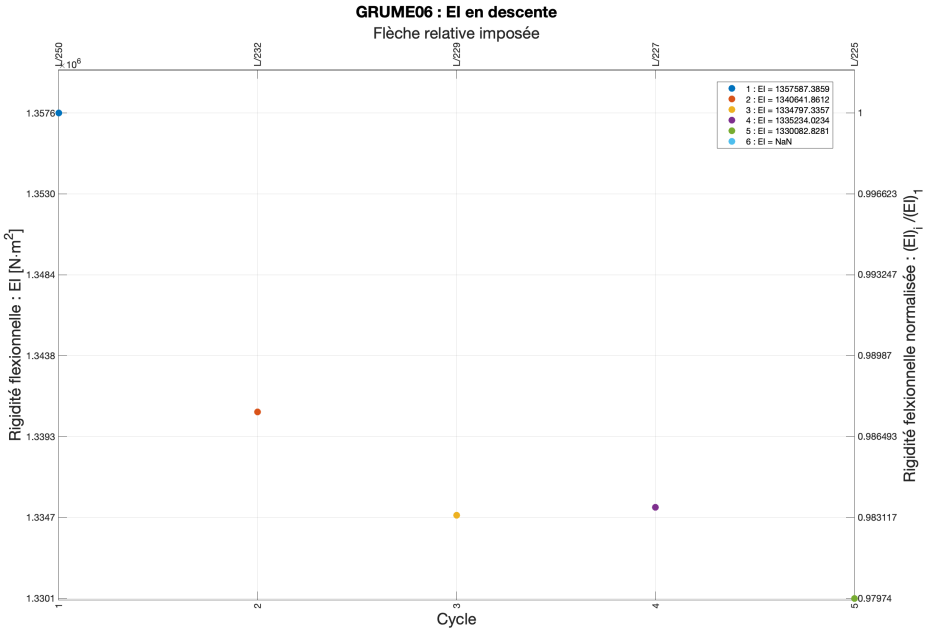


Figure N.46 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 06

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

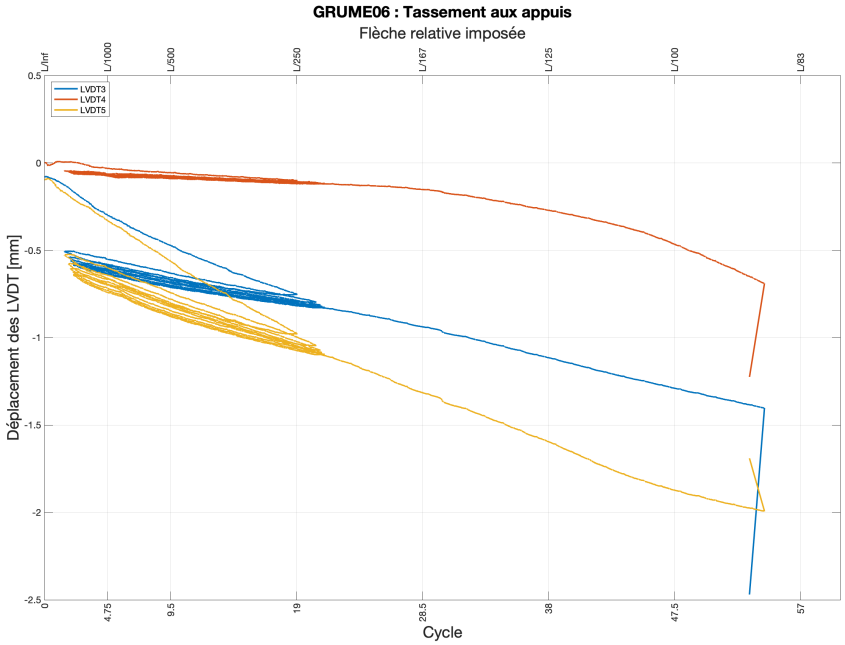


FIGURE N.47 – Tassements d'appui de la grume 06

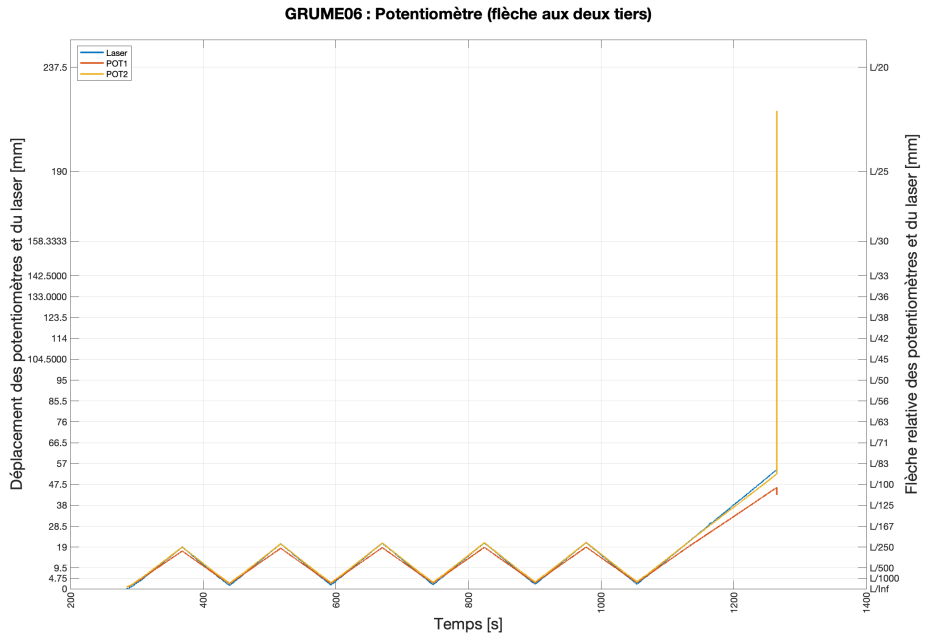


FIGURE N.48 – Flèches aux tiers de la grume 06

Grume 07

Protocole et comportement dans le temps

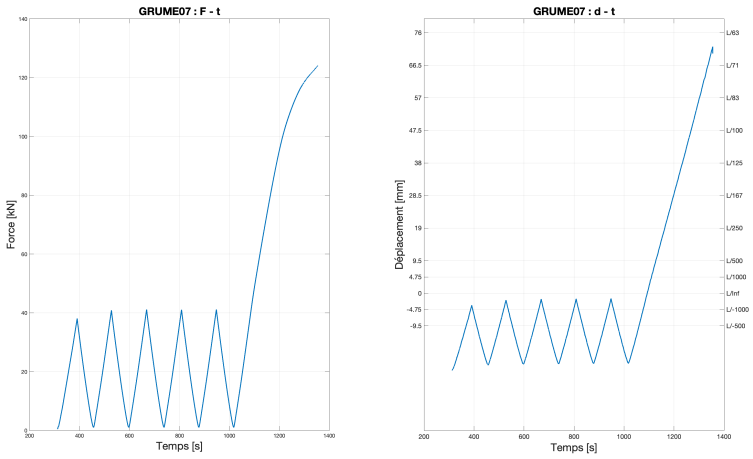


Figure N.49 – Comportement en fonction du temps de la grume 07

Global

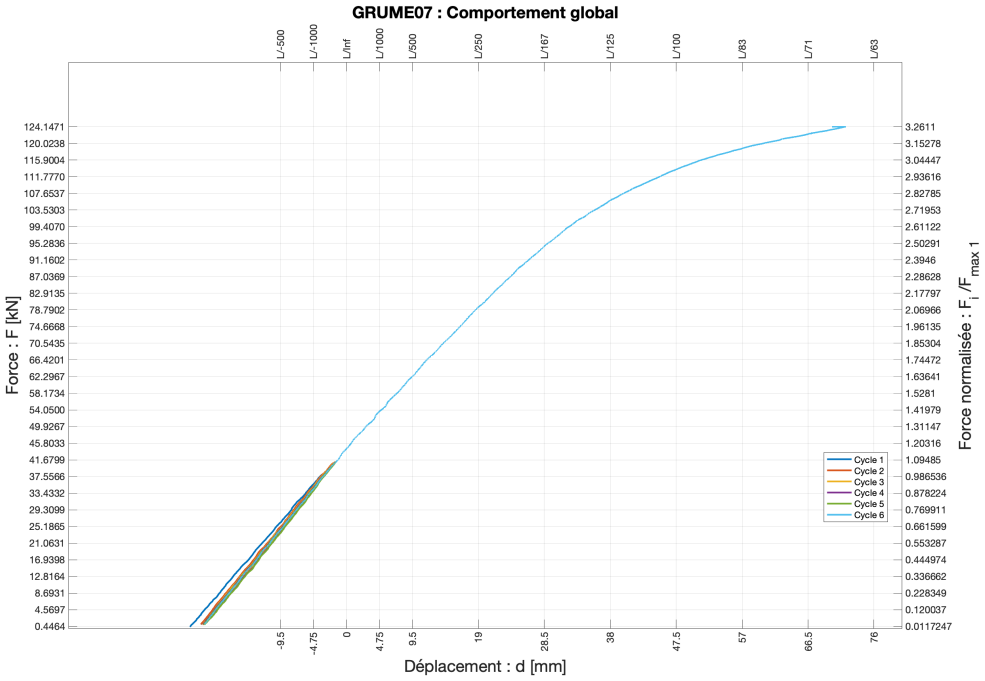


Figure N.50 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 07

Déplacement résiduel

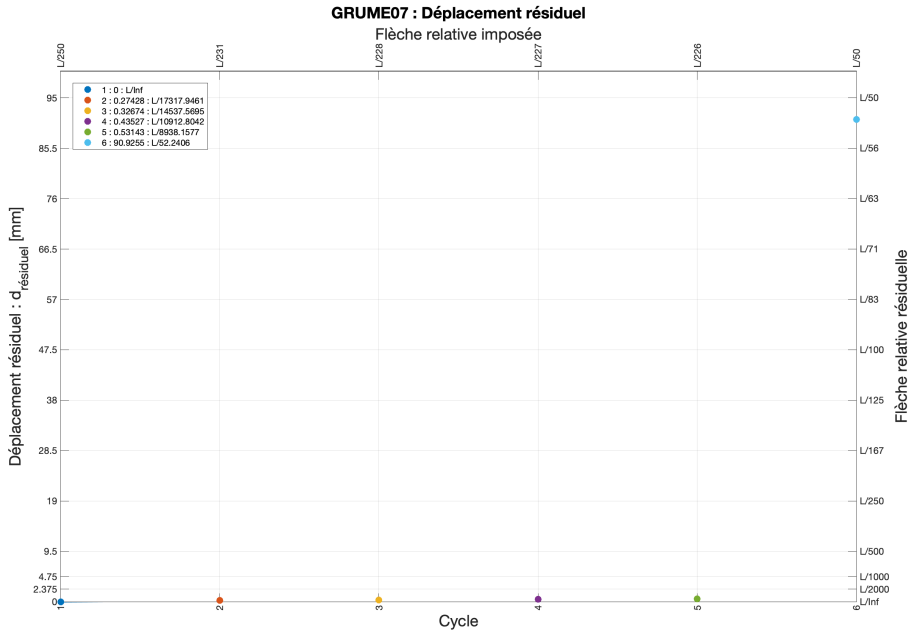


FIGURE N.51 – Déplacement résiduel de la grume 07

Force maximale

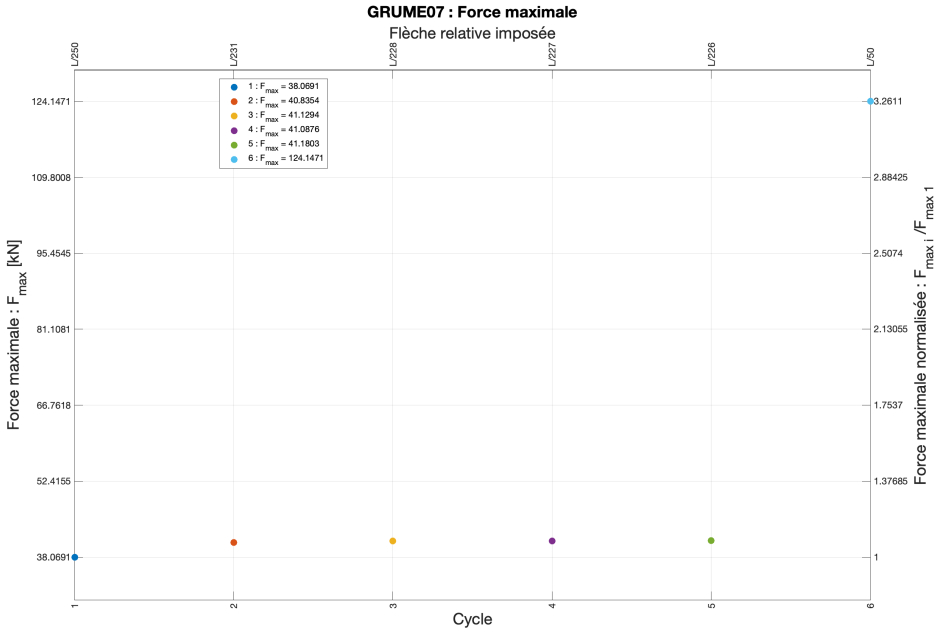


FIGURE N.52 – Force maximale de la grume 07

Rigidité flexionnelle

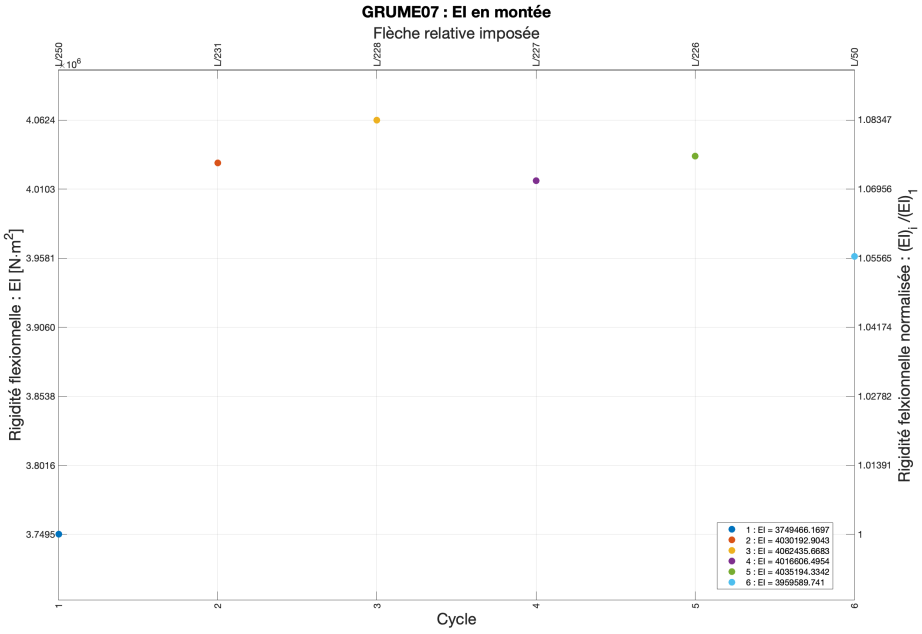


FIGURE N.53 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 07

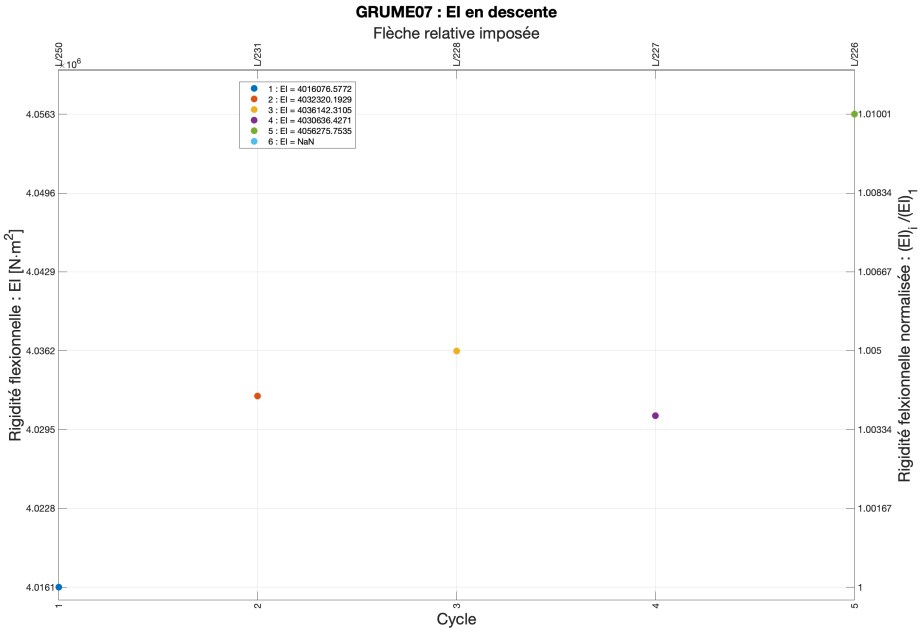


FIGURE N.54 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 07

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

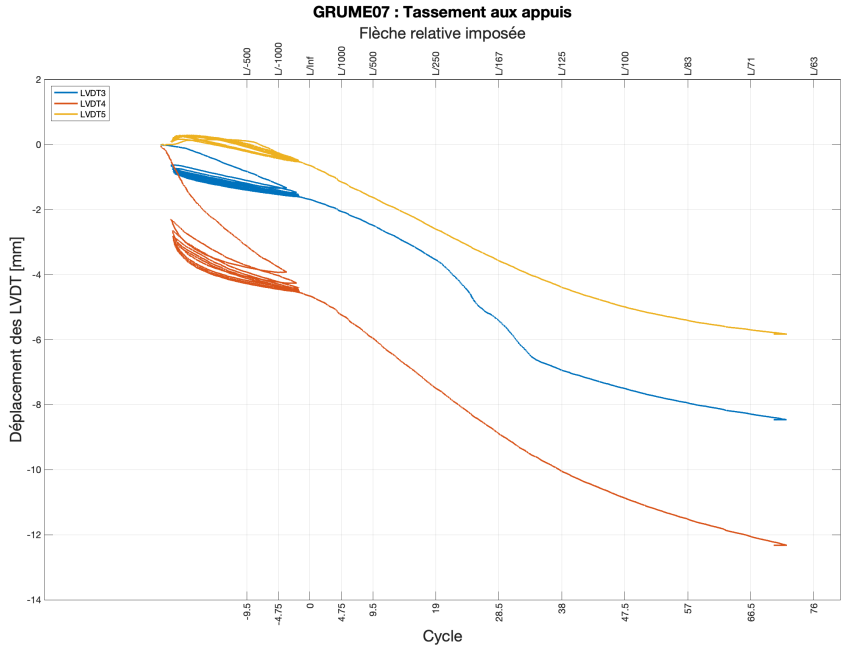


FIGURE N.55 – Tassements d'appui de la grume 07

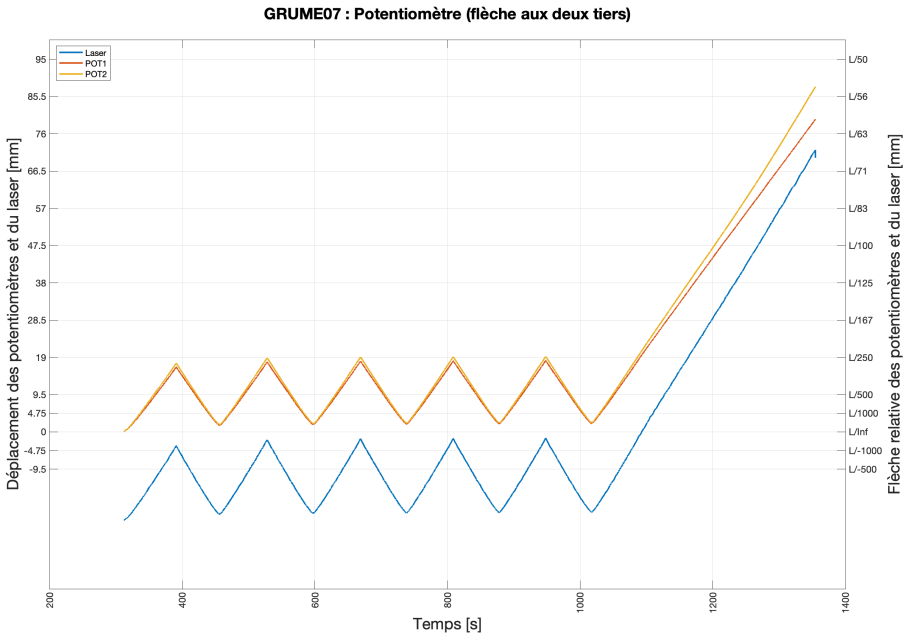


FIGURE N.56 – Flèches aux tiers de la grume 07

Grume 08

Protocole et comportement dans le temps

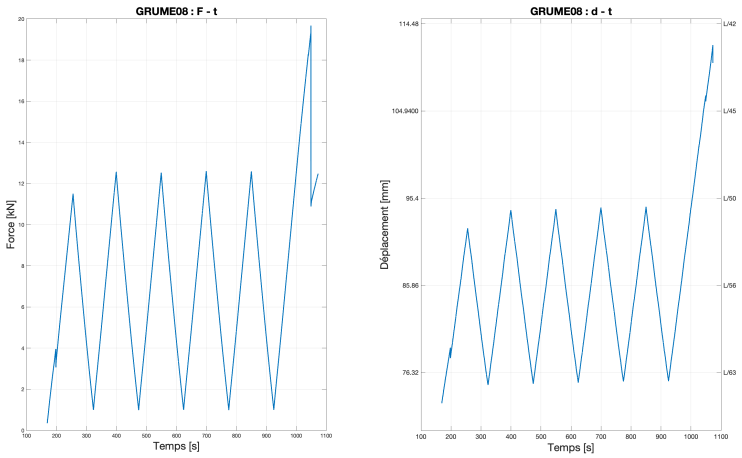


Figure N.57 – Comportement en fonction du temps de la grume 08

Global

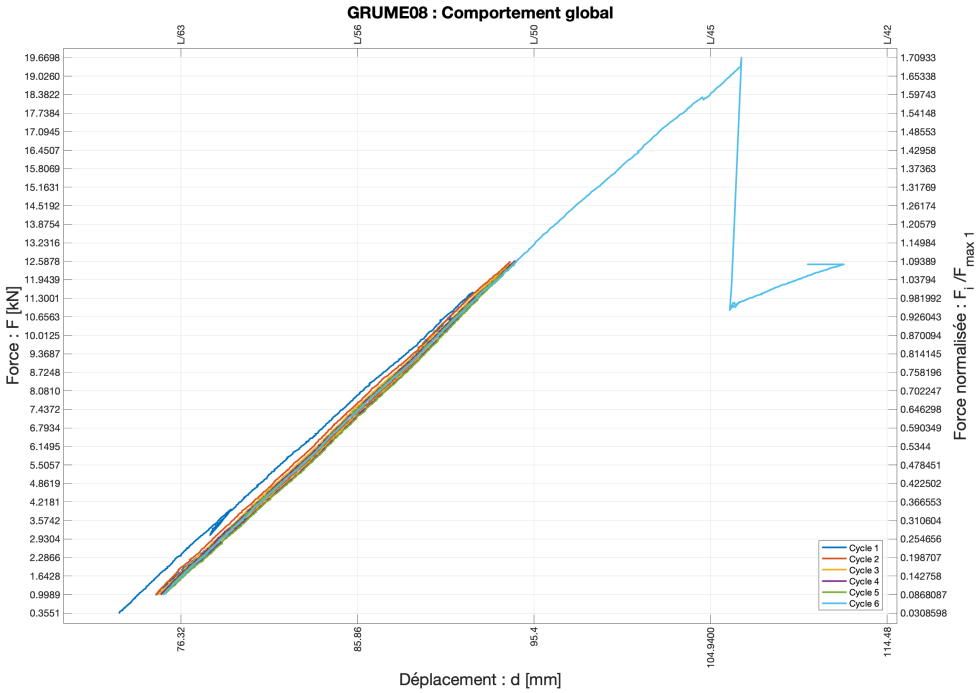


Figure N.58 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 08

Déplacement résiduel

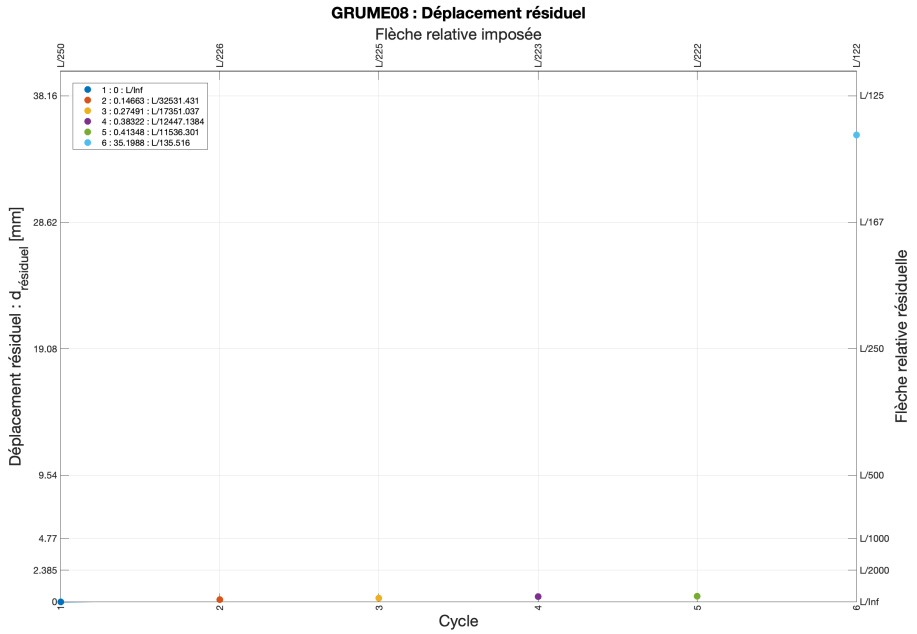


FIGURE N.59 – Déplacement résiduel de la grume 08

Force maximale

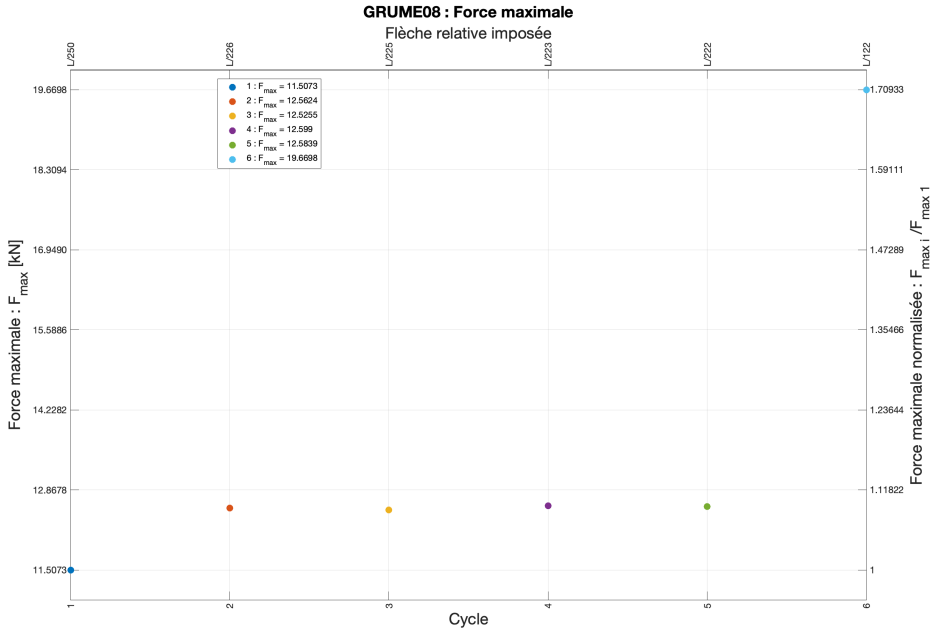


FIGURE N.60 – Force maximale de la grume 08

Rigidité flexionnelle

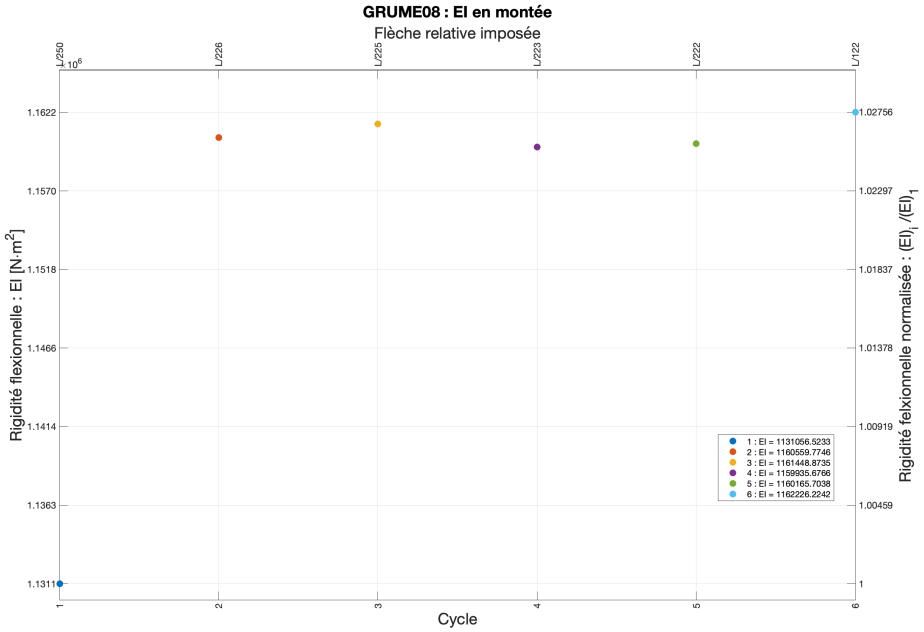


FIGURE N.61 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 08

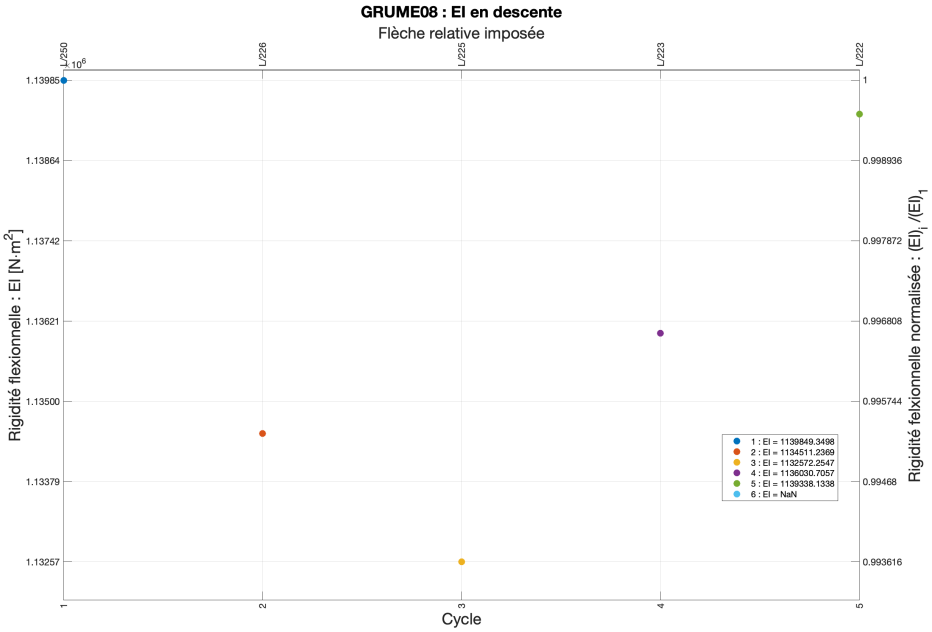


FIGURE N.62 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 08

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

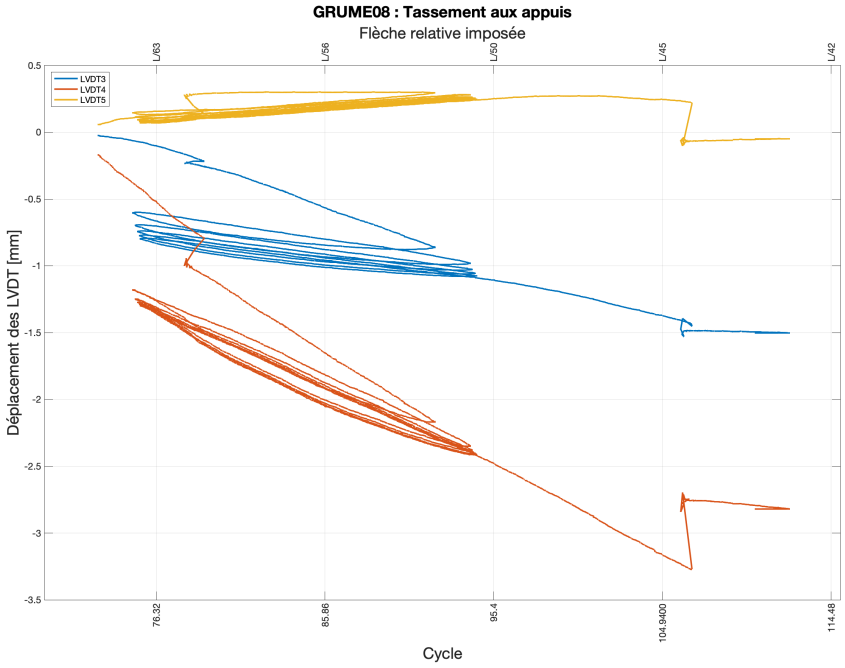


FIGURE N.63 – Tassements d'appui de la grume 08

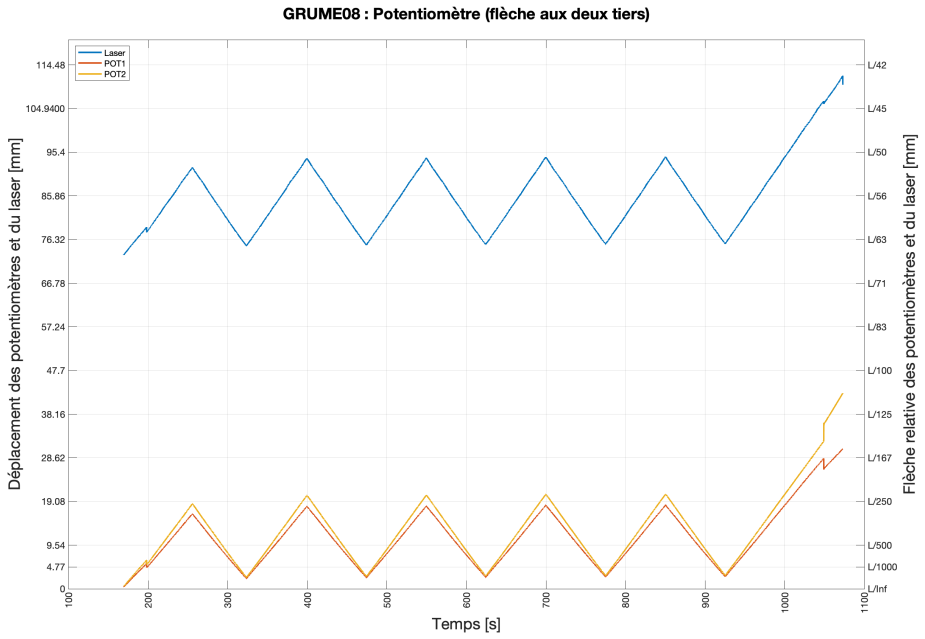


FIGURE N.64 – Flèches aux tiers de la grume 08

Grume 09

Protocole et comportement dans le temps

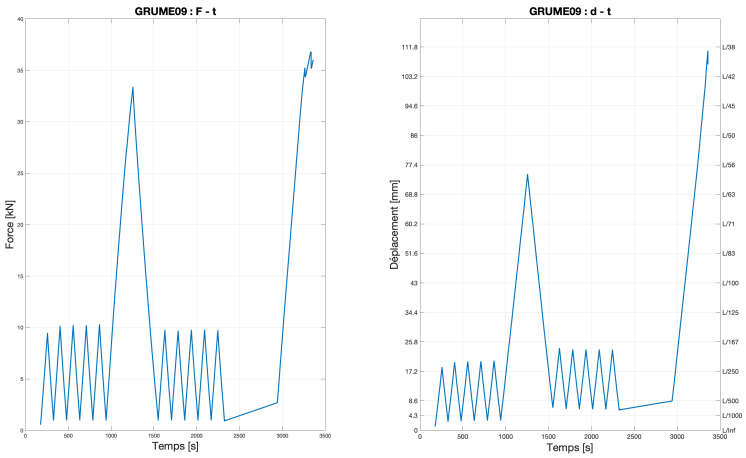


Figure N.65 – Comportement en fonction du temps de la grume 09

Global

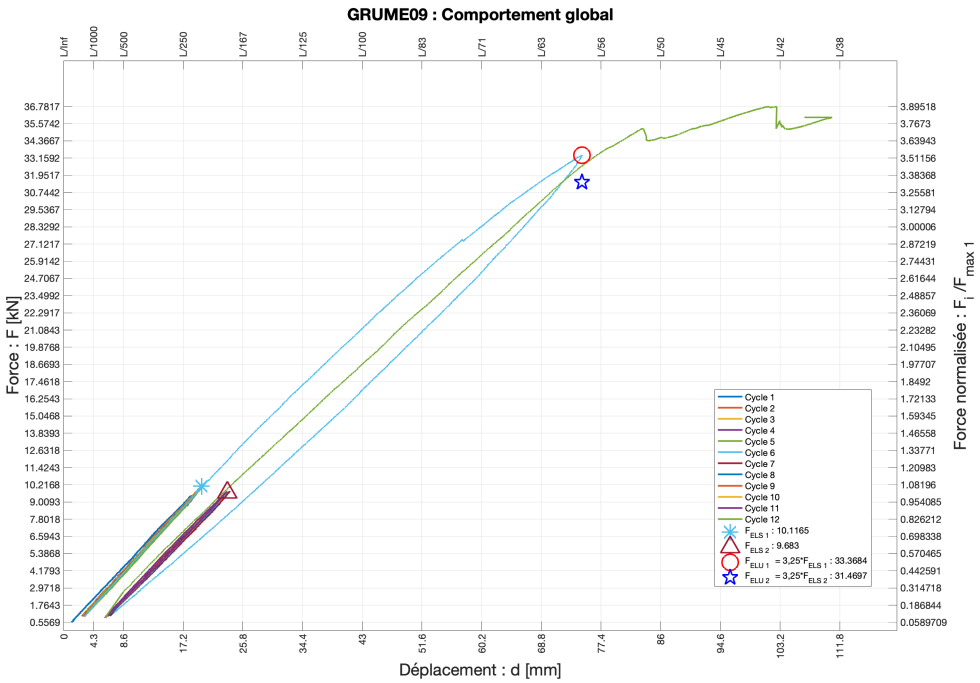


Figure N.66 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 09

Déplacement résiduel

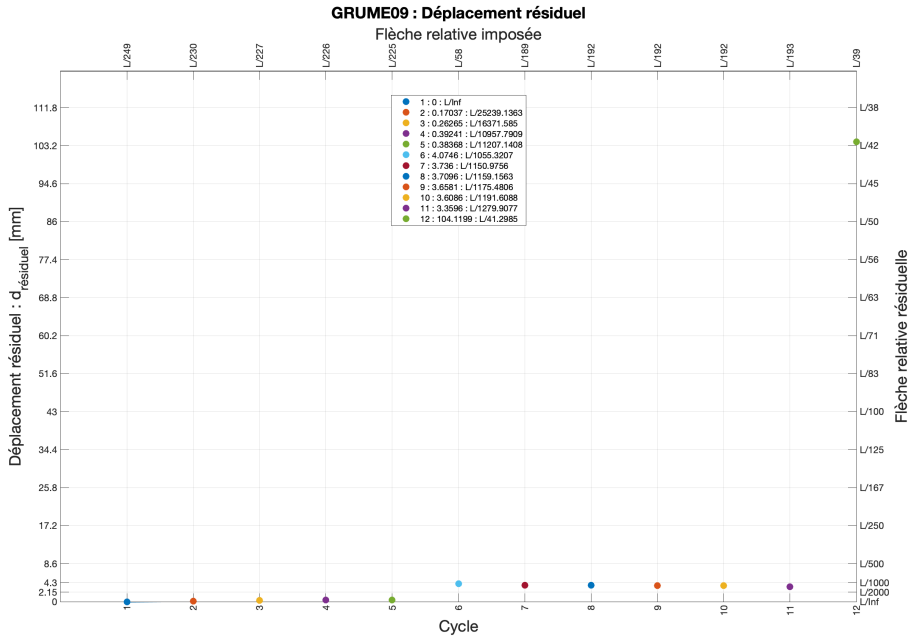


FIGURE N.67 – Déplacement résiduel de la grume 09

Force maximale

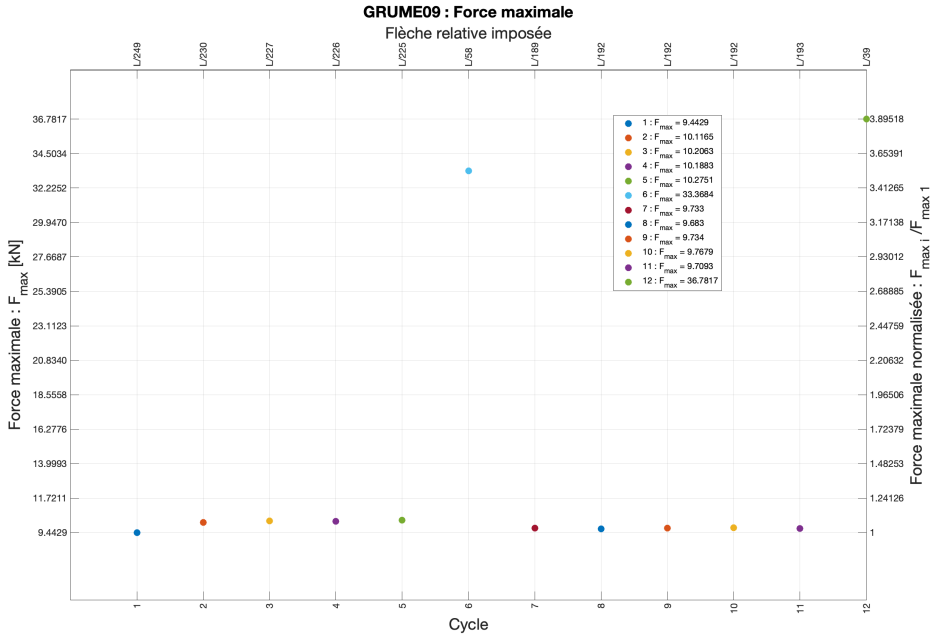


FIGURE N.68 – Force maximale de la grume 09

Rigidité flexionnelle

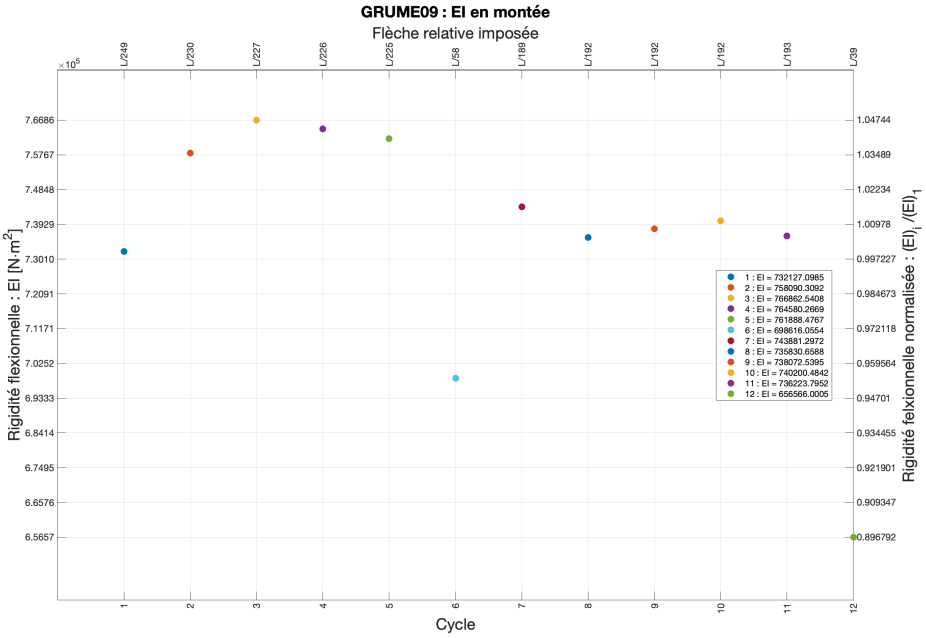


FIGURE N.69 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 09

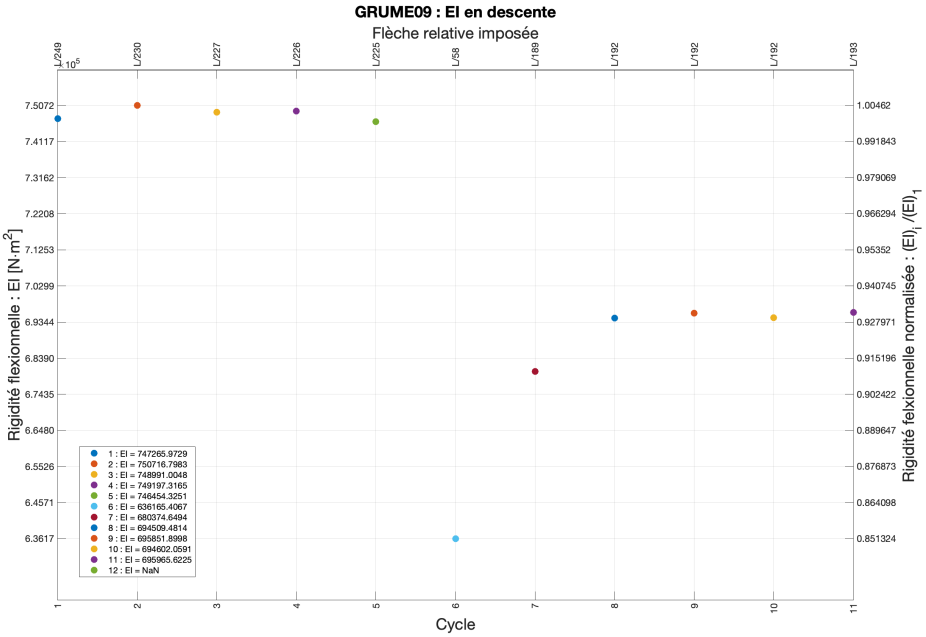


FIGURE N.70 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 09

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

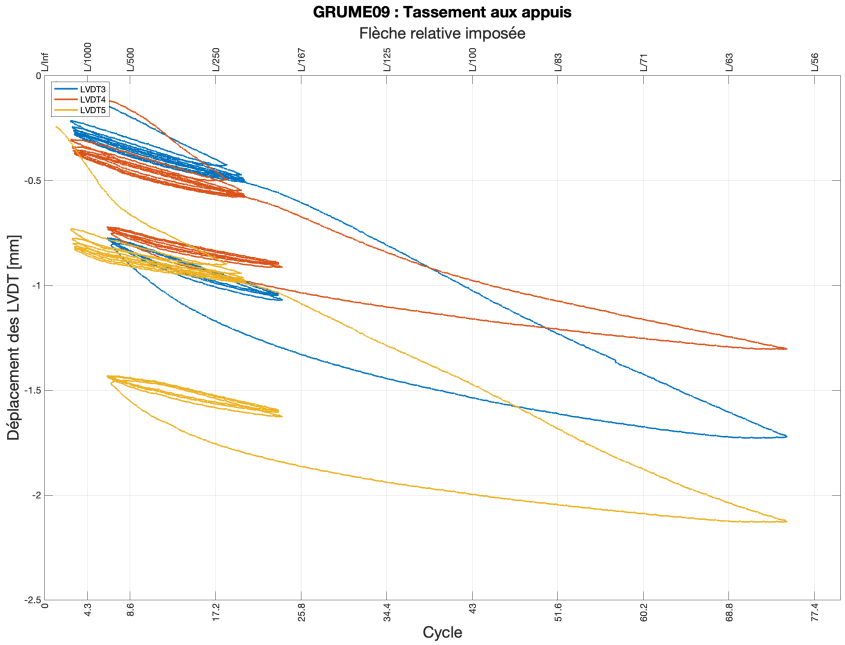


FIGURE N.71 – Tassements d'appui de la grume 09

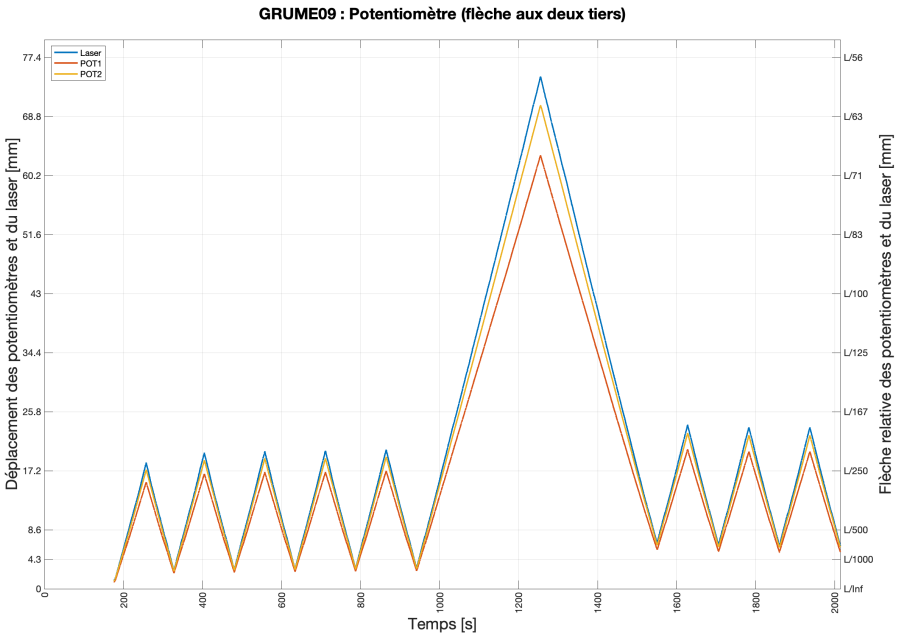


FIGURE N.72 – Flèches aux tiers de la grume 09

Grume 10

Protocole et comportement dans le temps

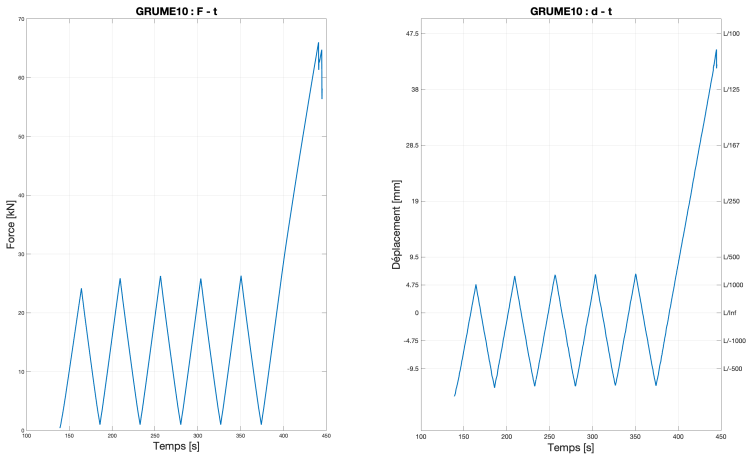


Figure N.73 – Comportement en fonction du temps de la grume 10

Global

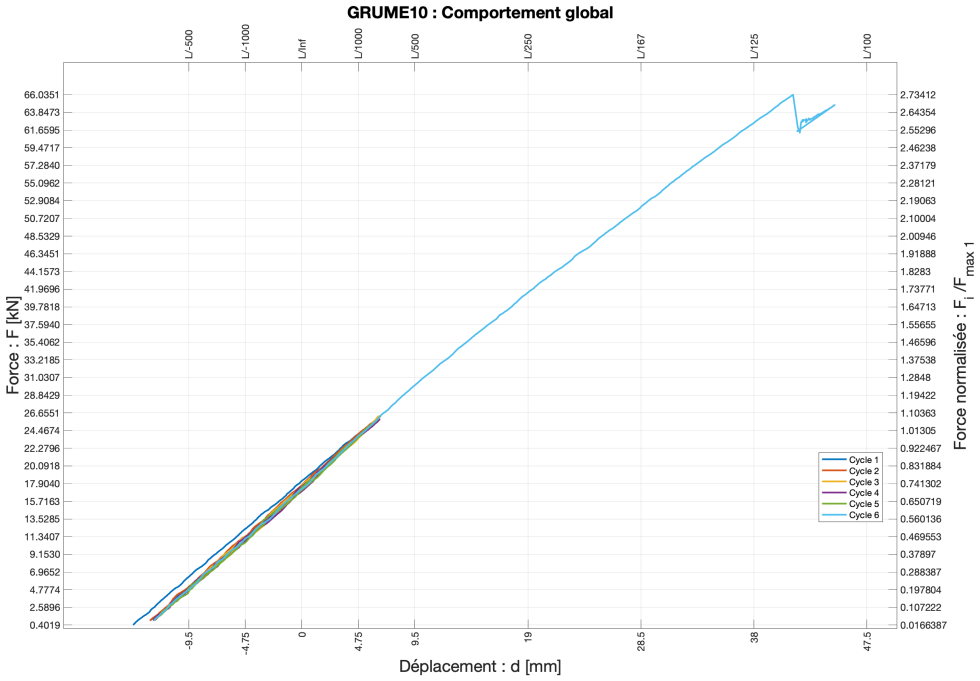


Figure N.74 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 10

Déplacement résiduel

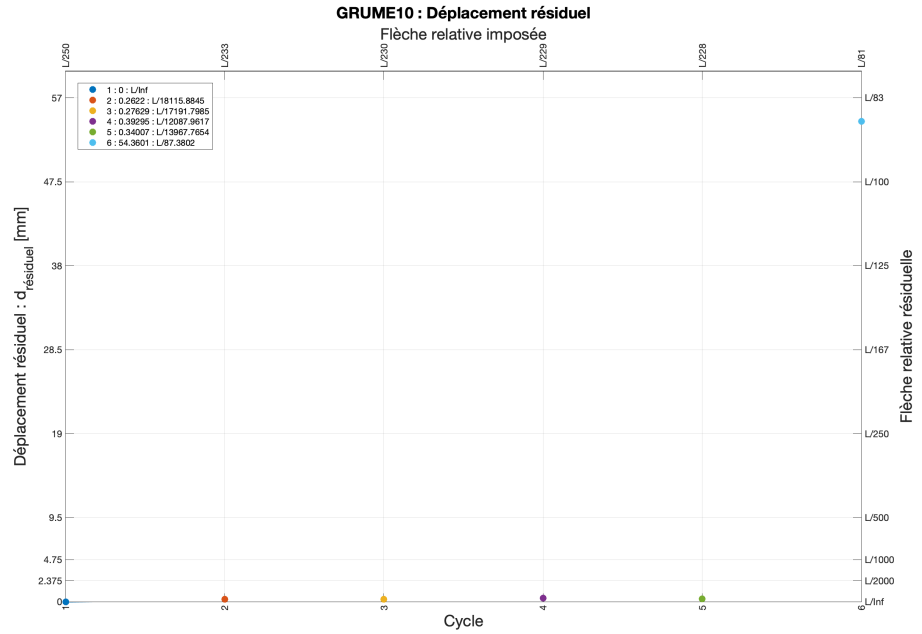


FIGURE N.75 – Déplacement résiduel de la grume 10

Force maximale

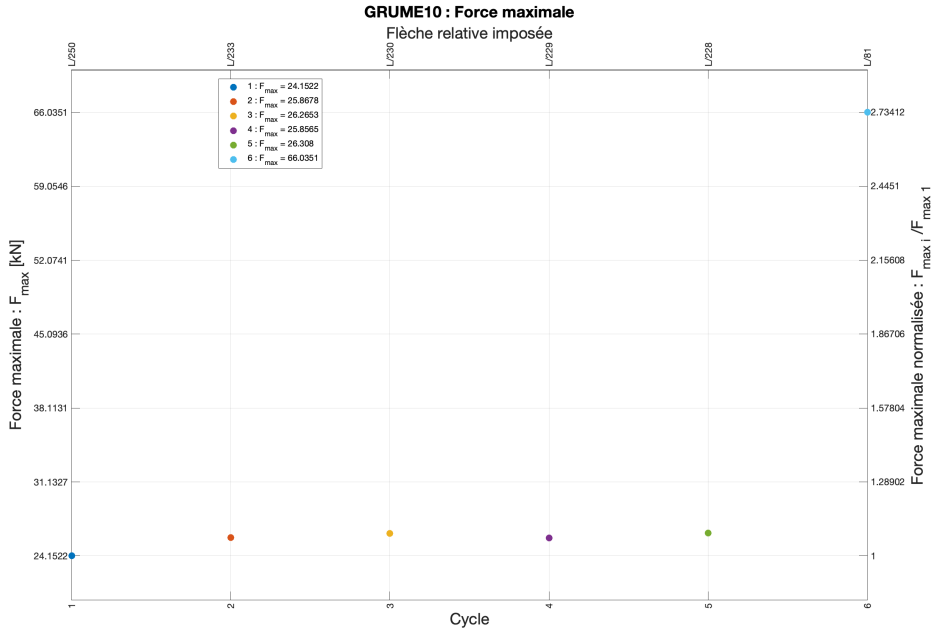


FIGURE N.76 – Force maximale de la grume 10

Rigidité flexionnelle

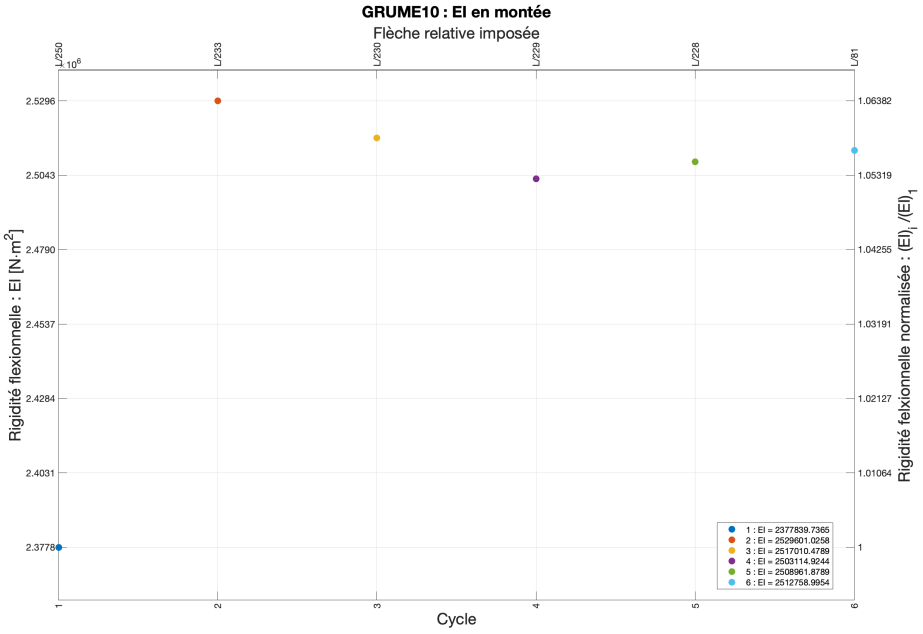


Figure N.77 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 10

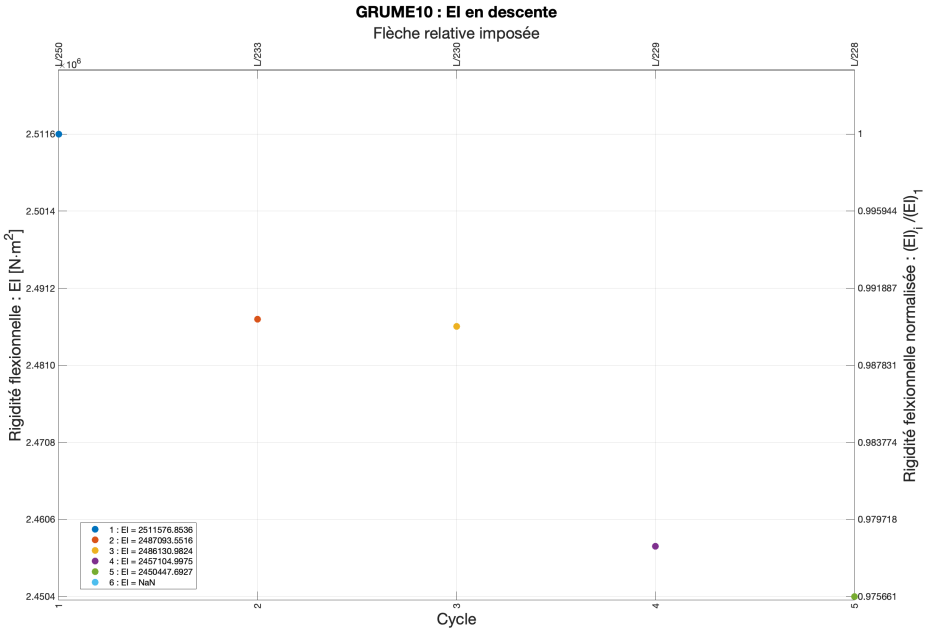


Figure N.78 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 10

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

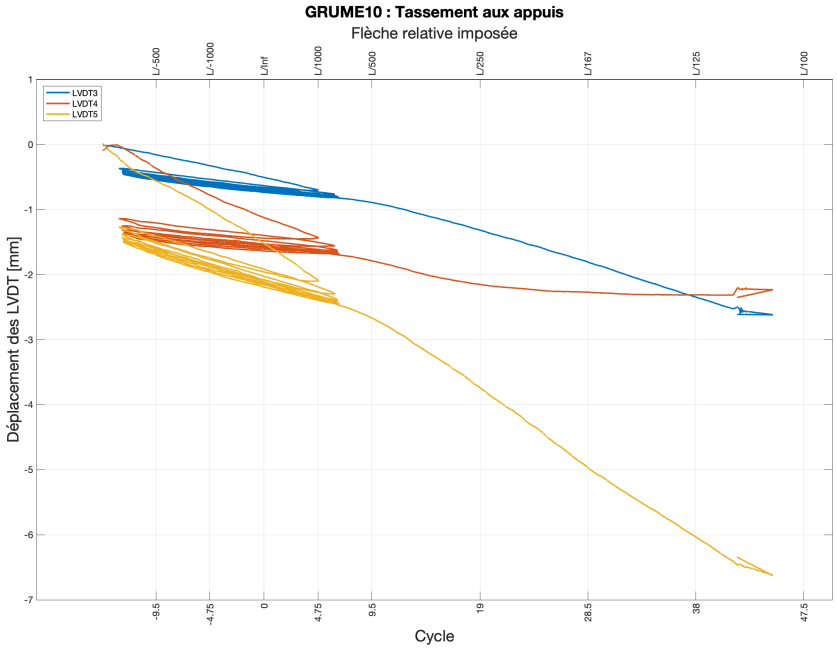


FIGURE N.79 – Tassements d'appui de la grume 10

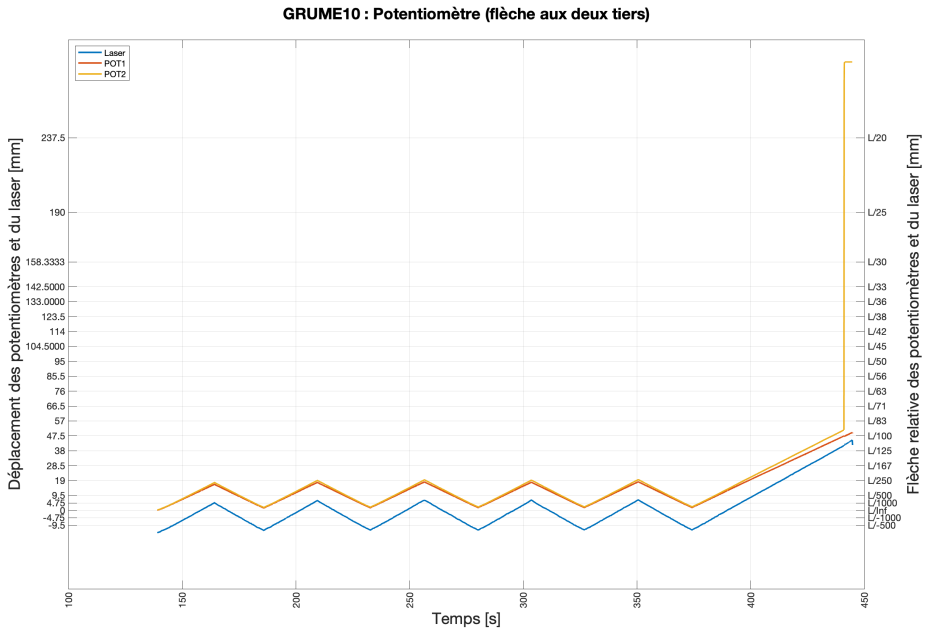


FIGURE N.80 – Flèches aux tiers de la grume 10

Grume 11

Protocole et comportement dans le temps

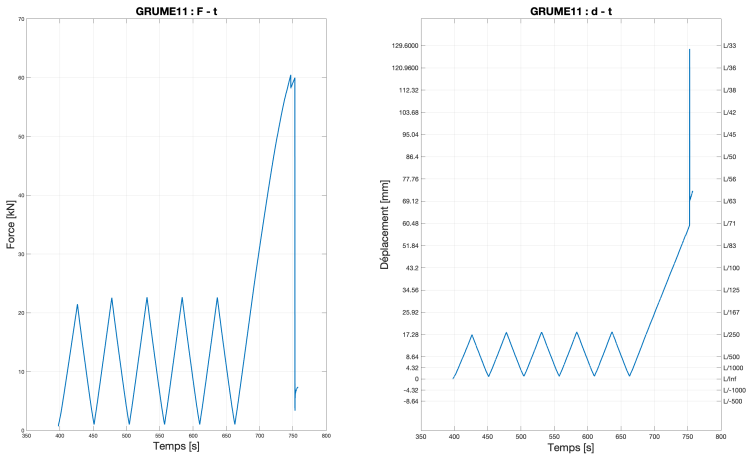


Figure N.81 – Comportement en fonction du temps de la grume 11

Global

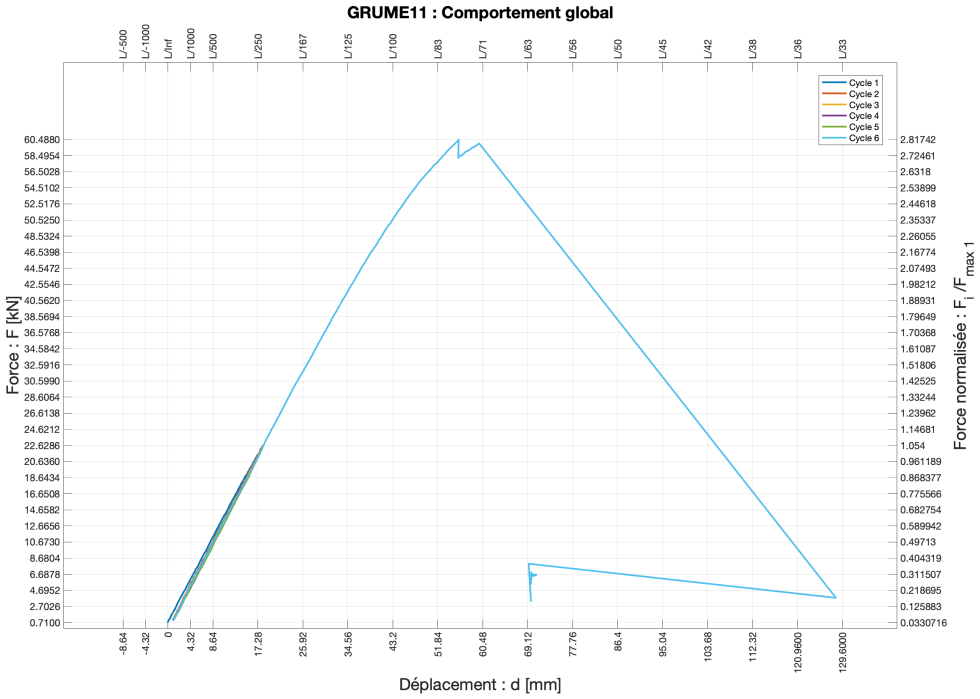


Figure N.82 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 11

Déplacement résiduel

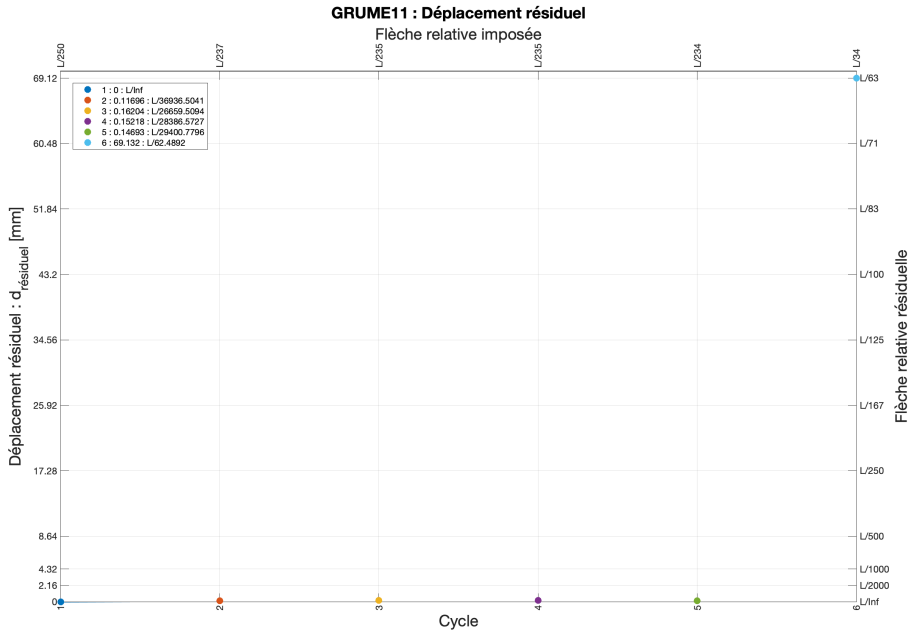


FIGURE N.83 – Déplacement résiduel de la grume 11

Force maximale

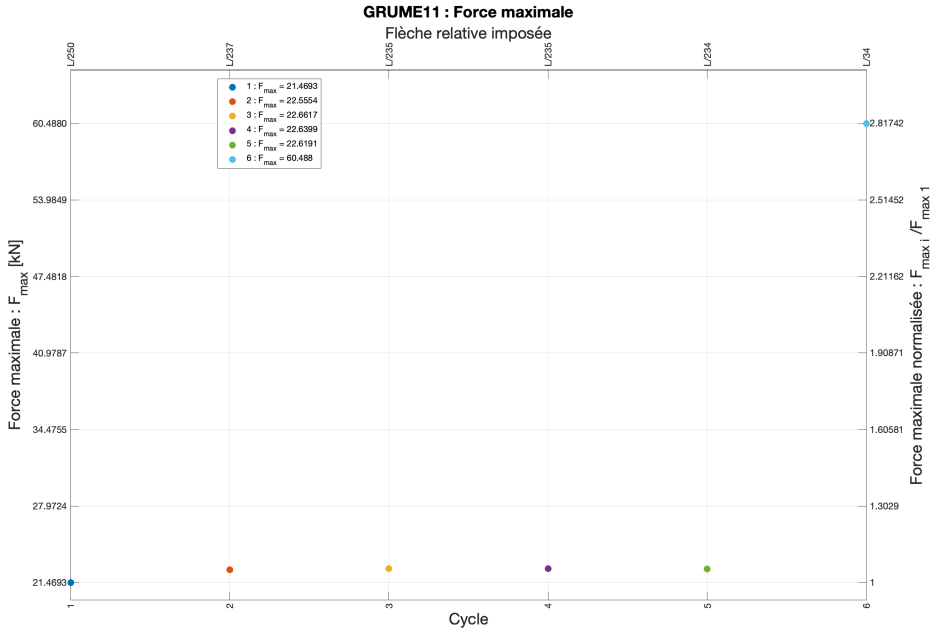


FIGURE N.84 – Force maximale de la grume 11

Rigidité flexionnelle

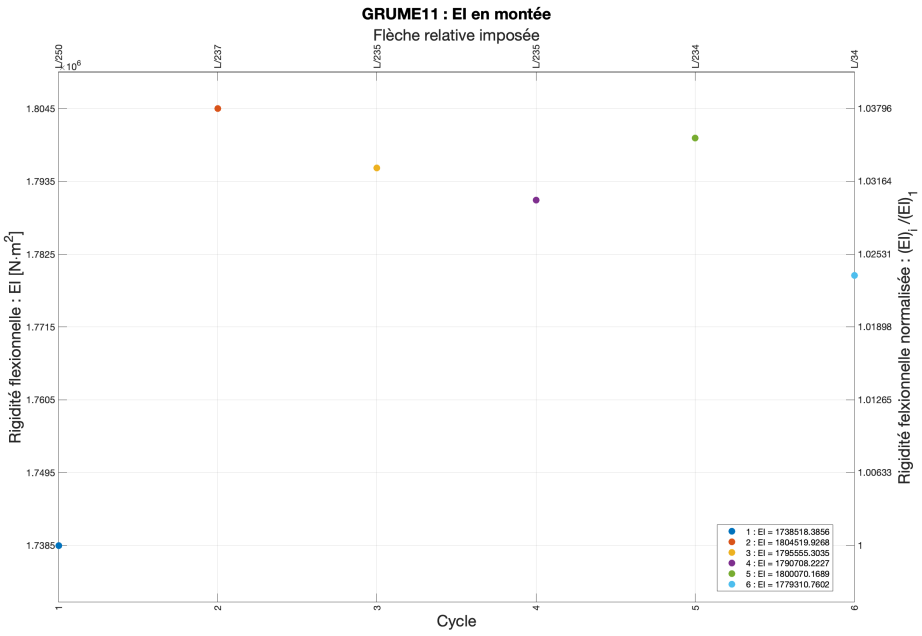


FIGURE N.85 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 11

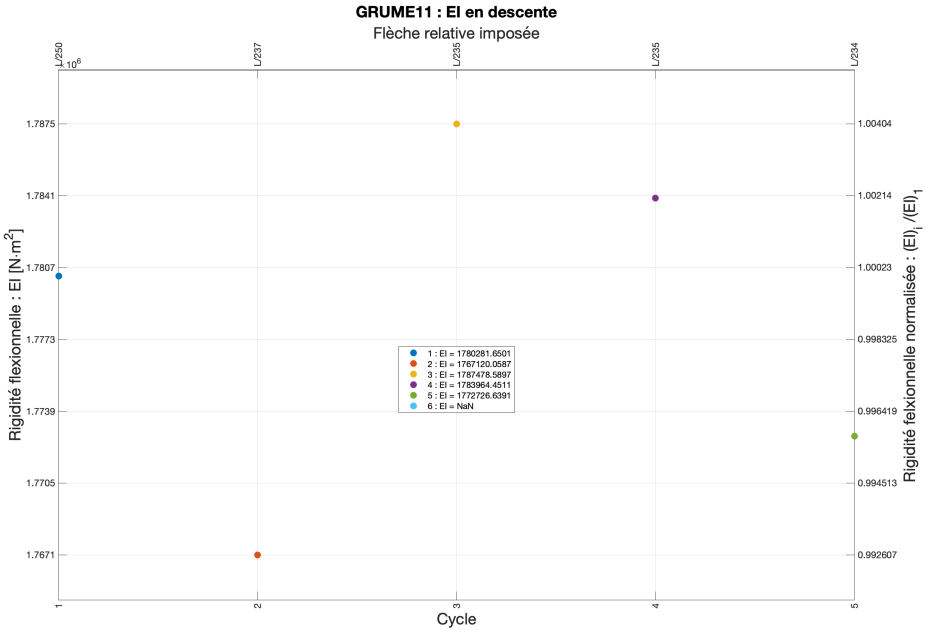


FIGURE N.86 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 11

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

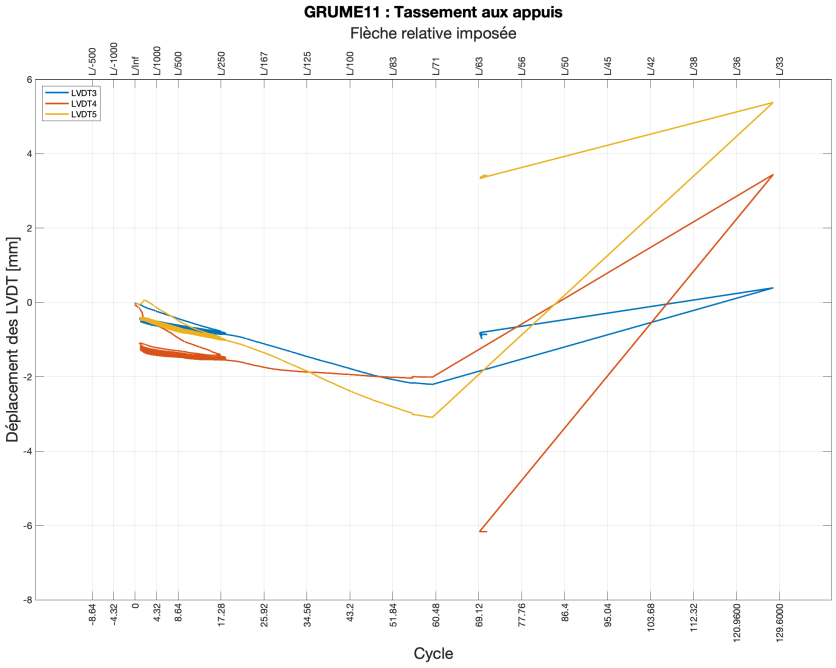


FIGURE N.87 – Tassements d'appui de la grume 11

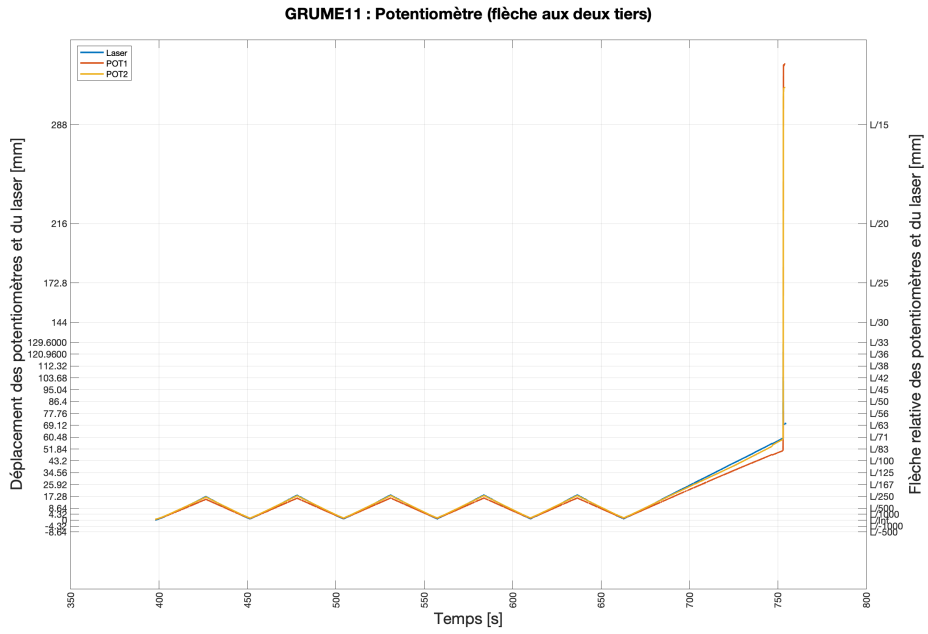


FIGURE N.88 – Flèches aux tiers de la grume 11

Grume 12

Protocole et comportement dans le temps

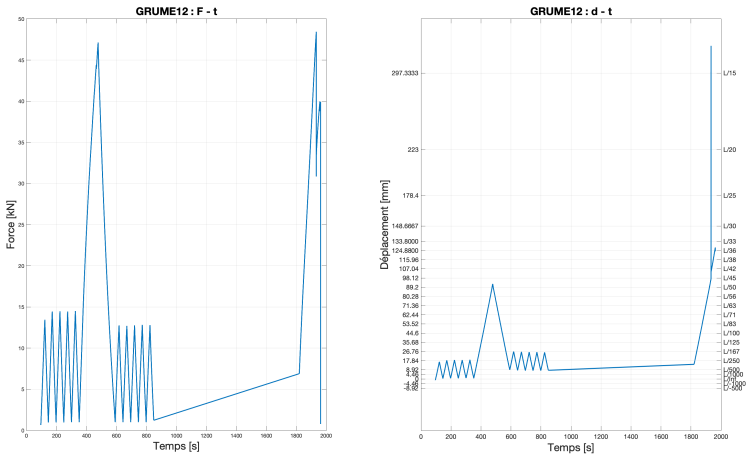


Figure N.89 – Comportement en fonction du temps de la grume 12

Global

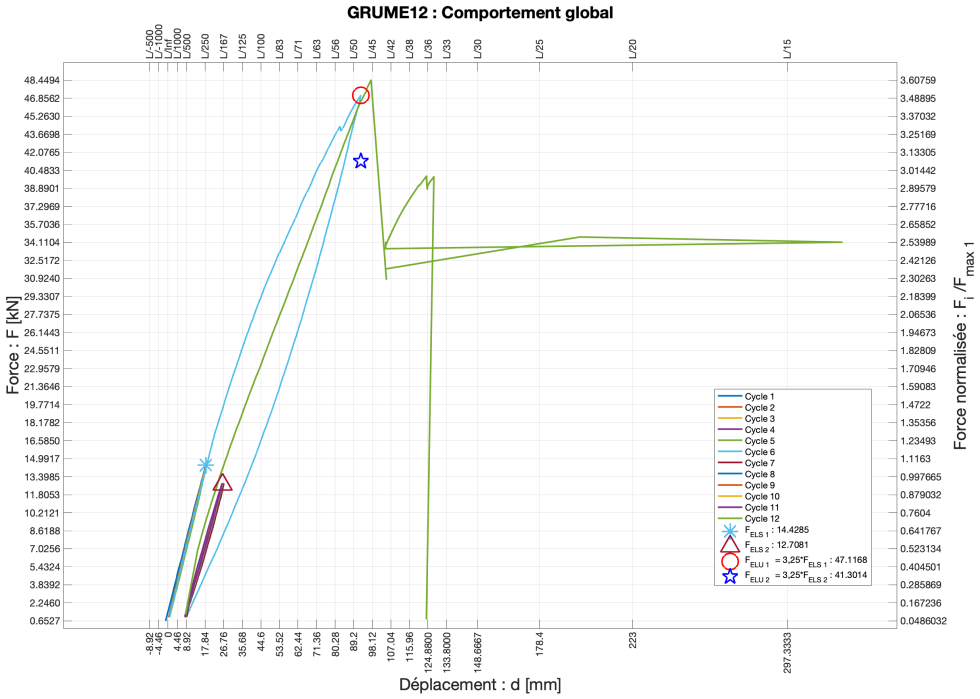


Figure N.90 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 12

Déplacement résiduel

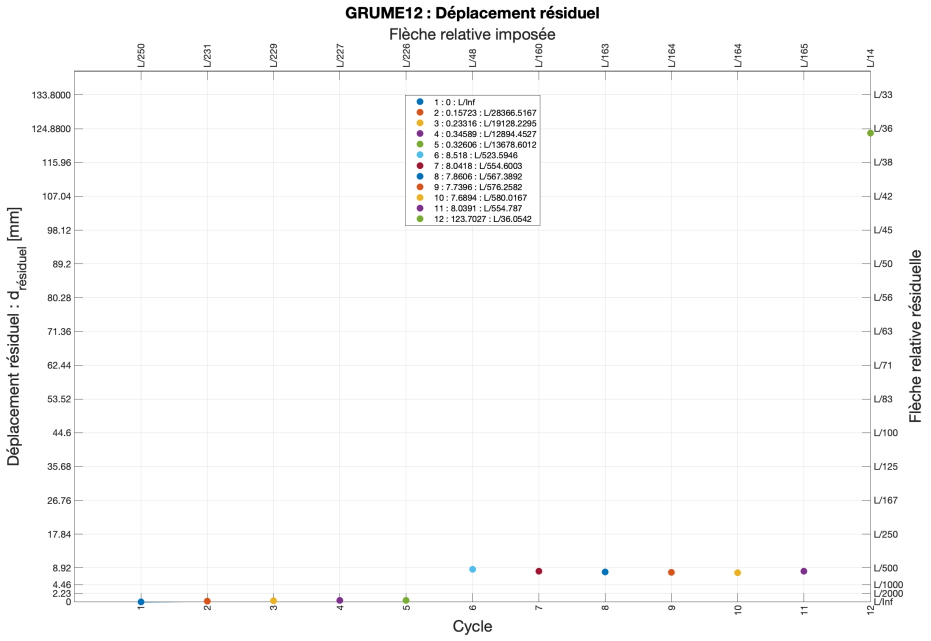


FIGURE N.91 – Déplacement résiduel de la grume 12

Force maximale

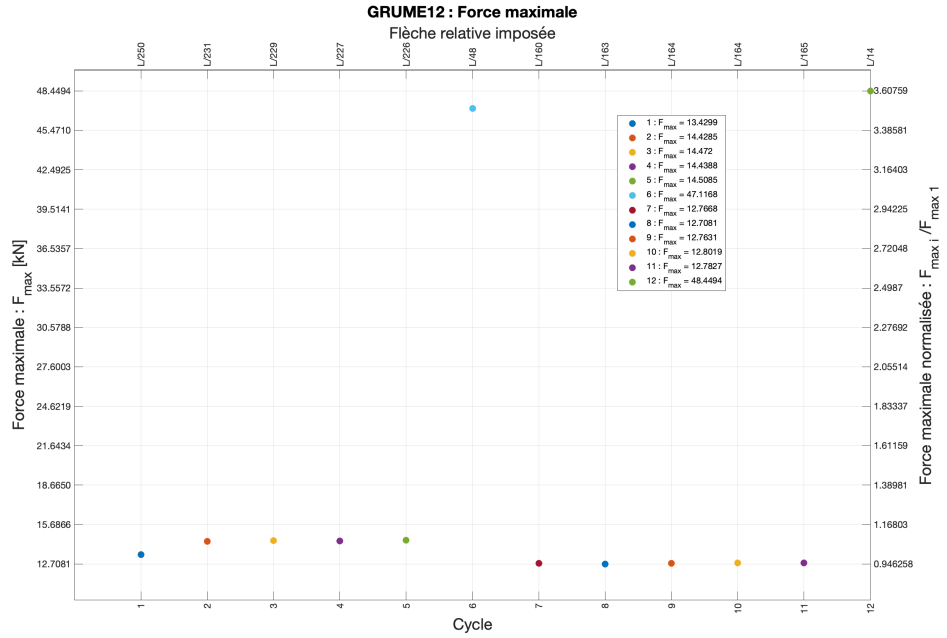


FIGURE N.92 – Force maximale de la grume 12

Rigidité flexionnelle

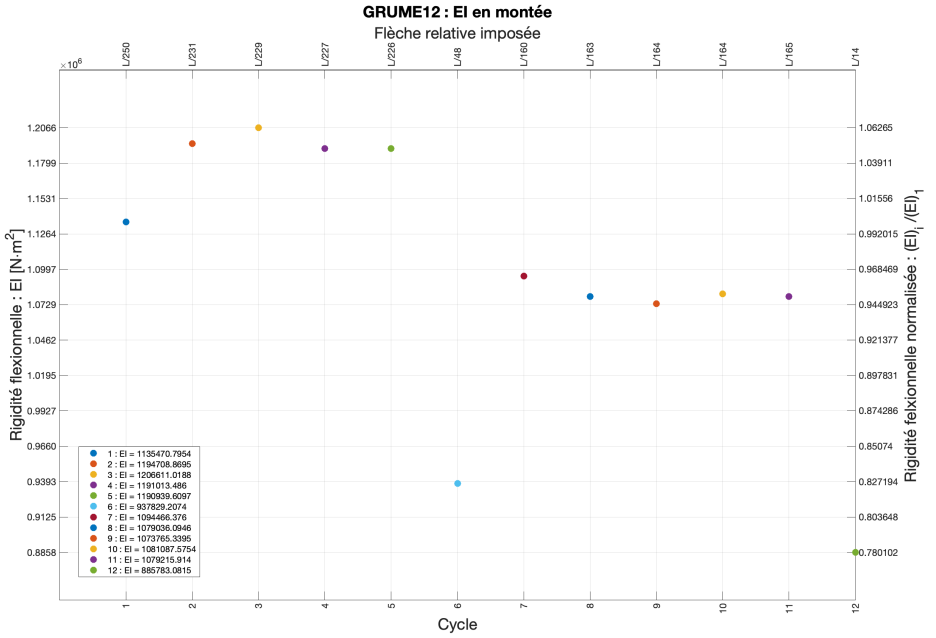


FIGURE N.93 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 12

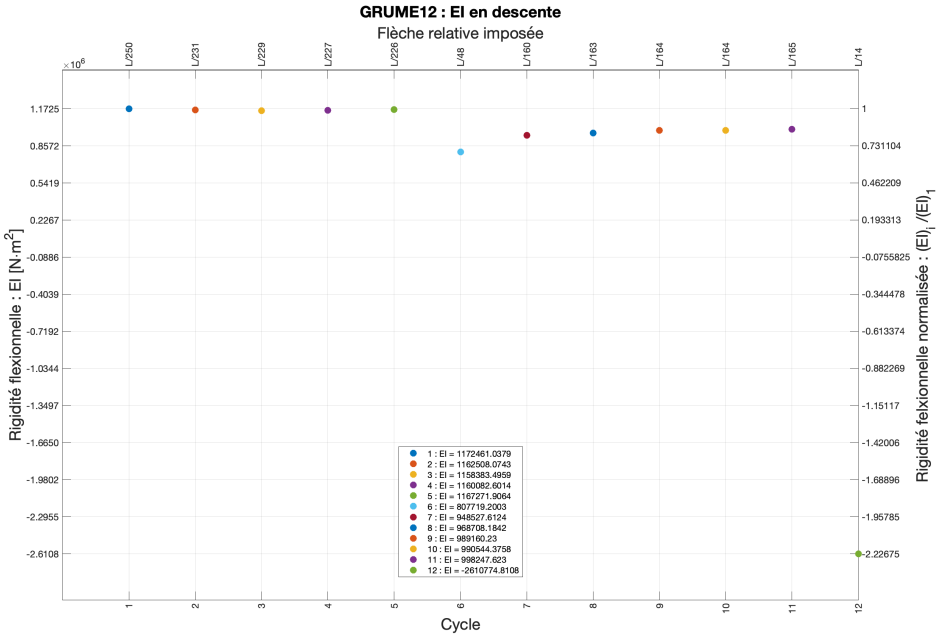


FIGURE N.94 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 12

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

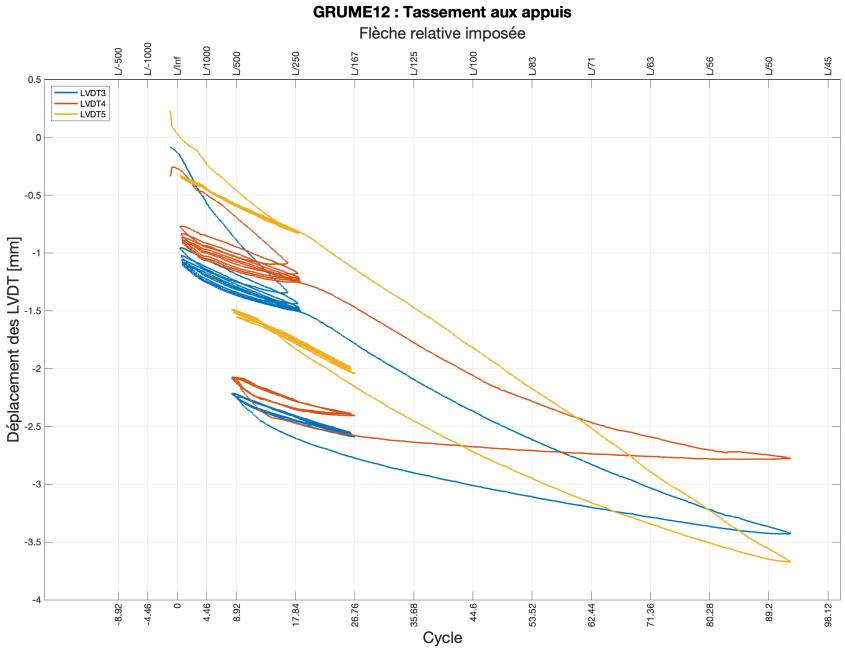


FIGURE N.95 – Tassements d'appui de la grume 12

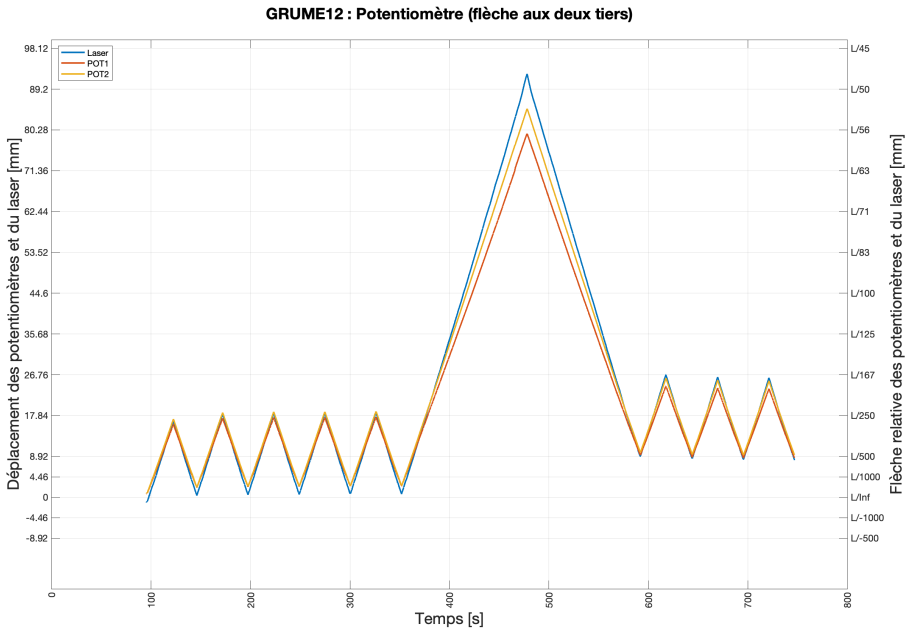


FIGURE N.96 – Flèches aux tiers de la grume 12

Grume 13

Protocole et comportement dans le temps

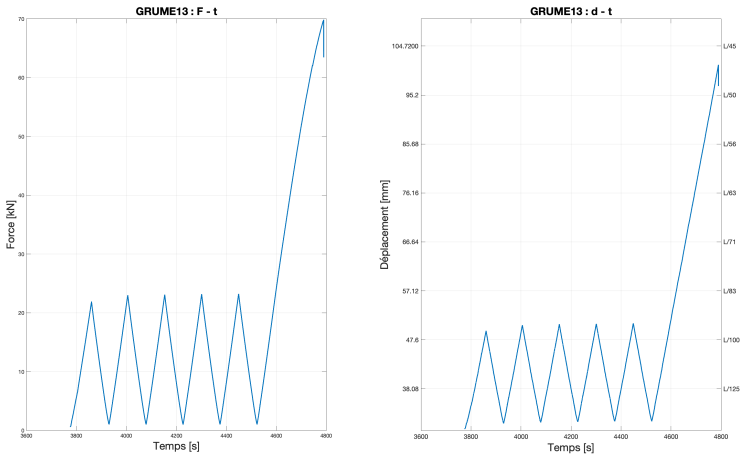


Figure N.97 – Comportement en fonction du temps de la grume 13

Global

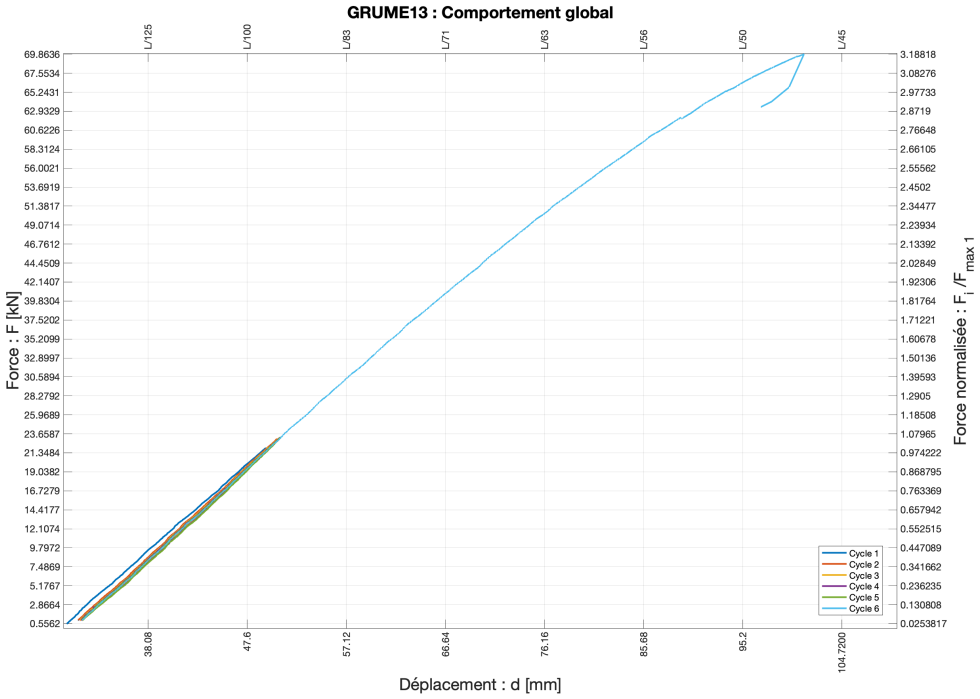


Figure N.98 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 13

Déplacement résiduel

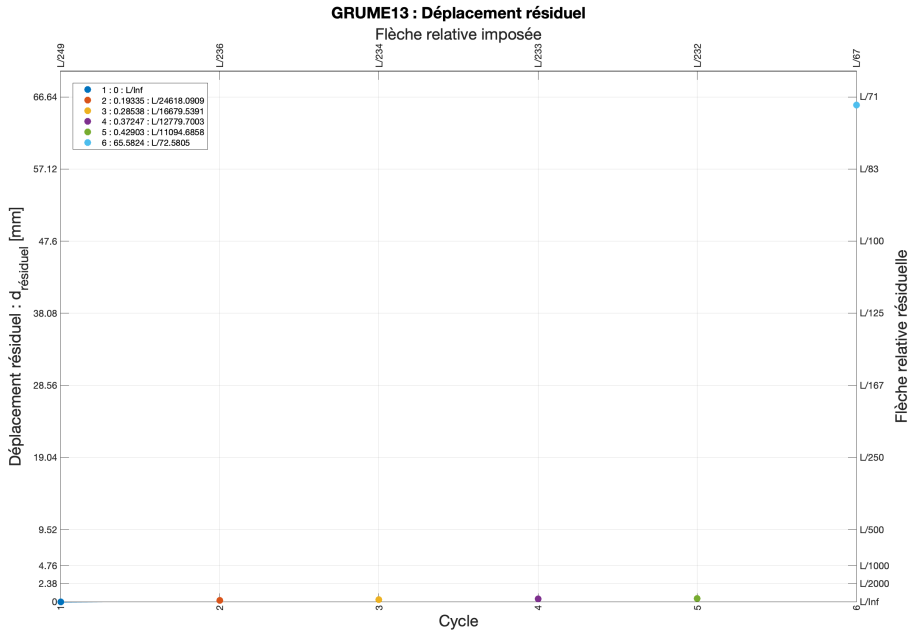


FIGURE N.99 – Déplacement résiduel de la grume 13

Force maximale

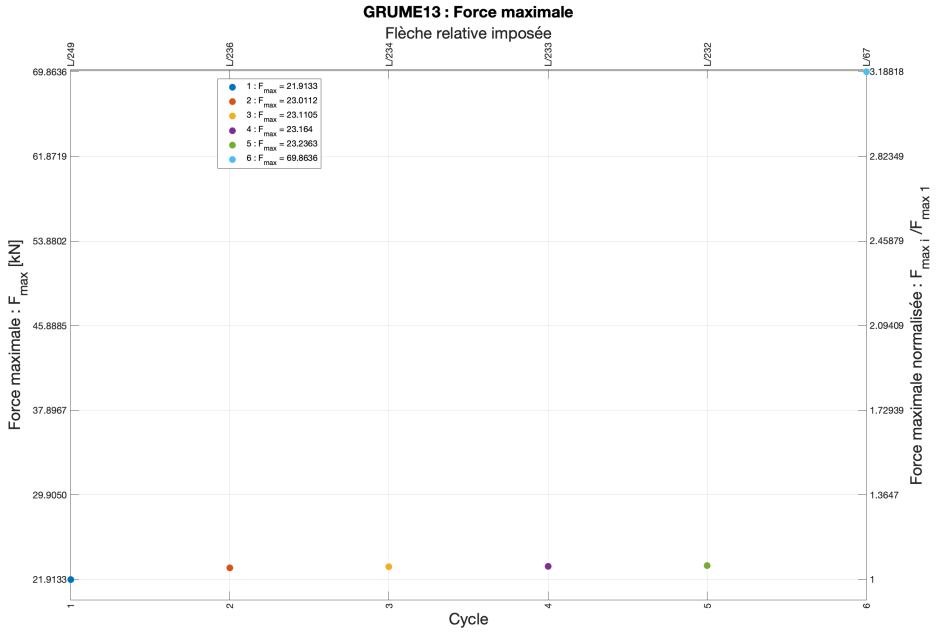


FIGURE N.100 – Force maximale de la grume 13

Rigidité flexionnelle

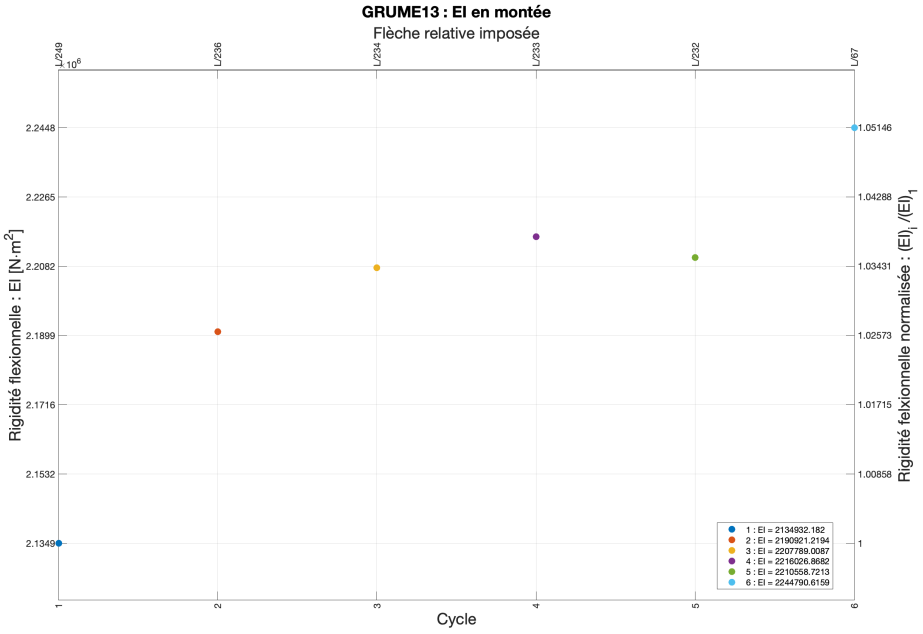


Figure N.101 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 13

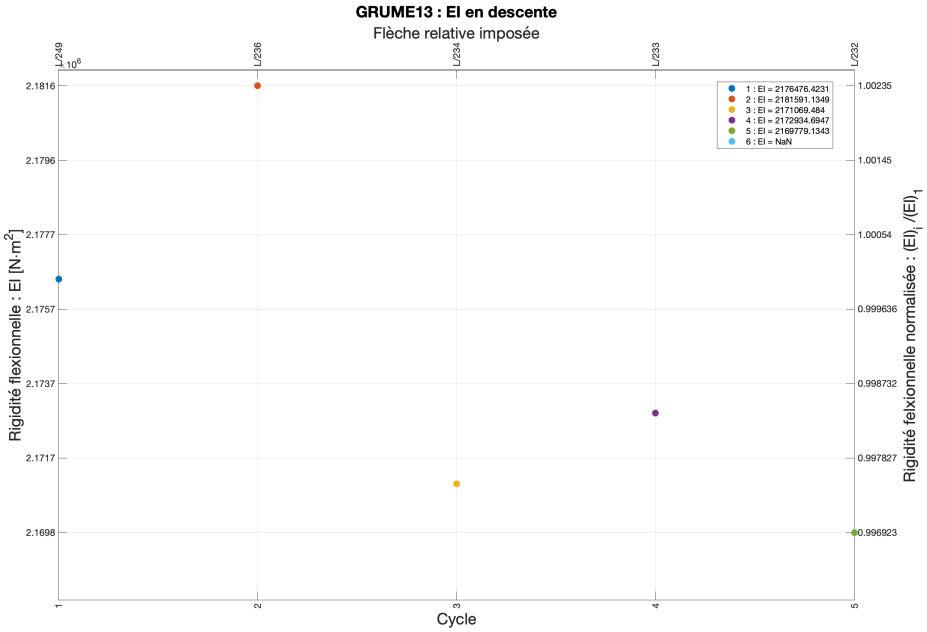


Figure N.102 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 13

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

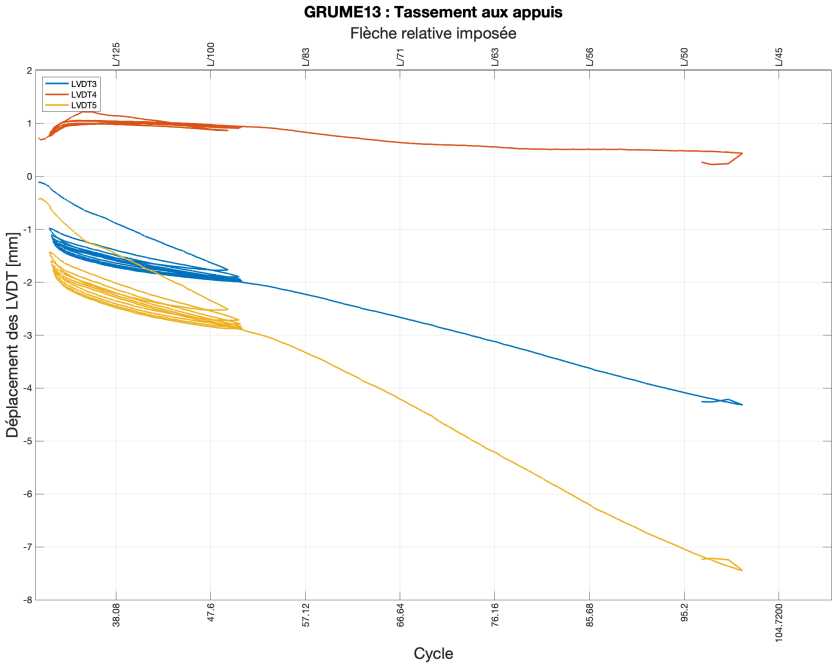


FIGURE N.103 – Tassements d'appui de la grume 13

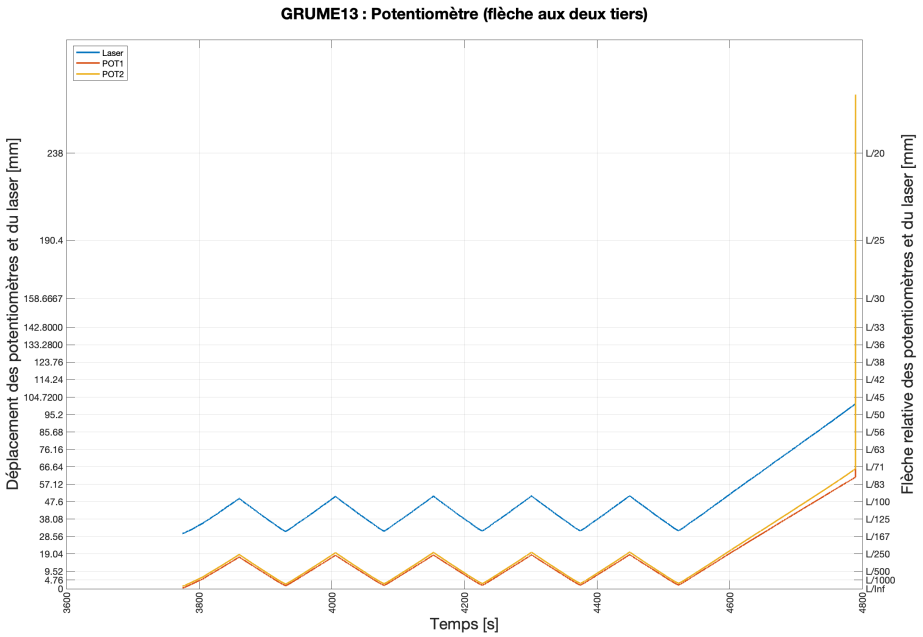


FIGURE N.104 – Flèches aux tiers de la grume 13

Grume 14

Protocole et comportement dans le temps

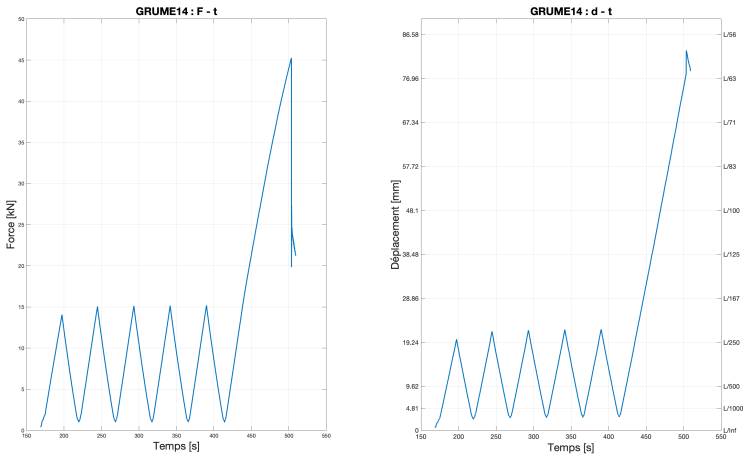


Figure N.105 – Comportement en fonction du temps de la grume 14

Global

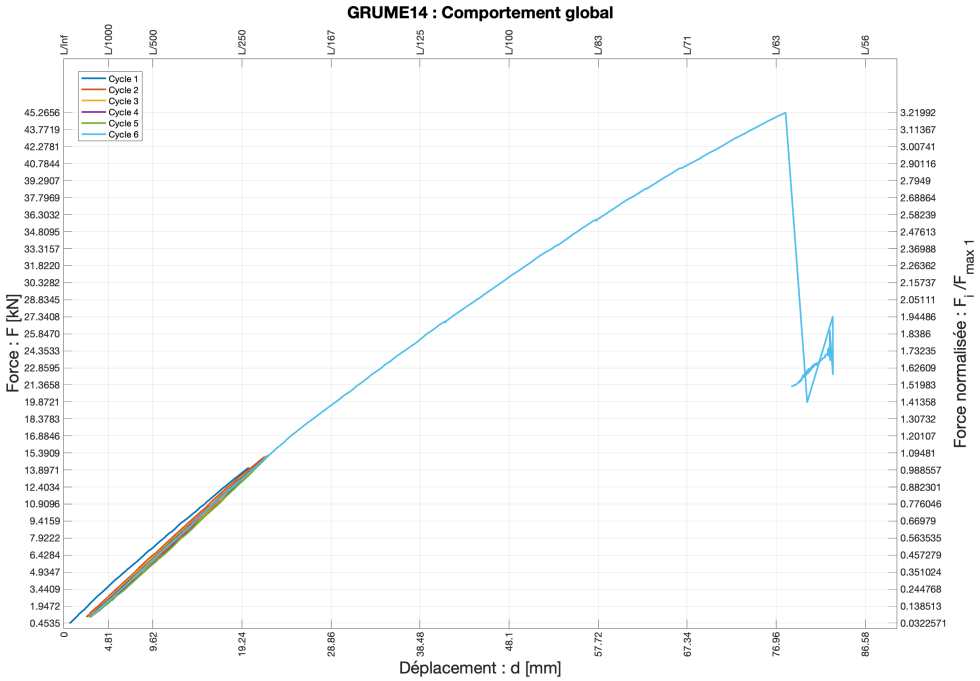


Figure N.106 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 14

Déplacement résiduel

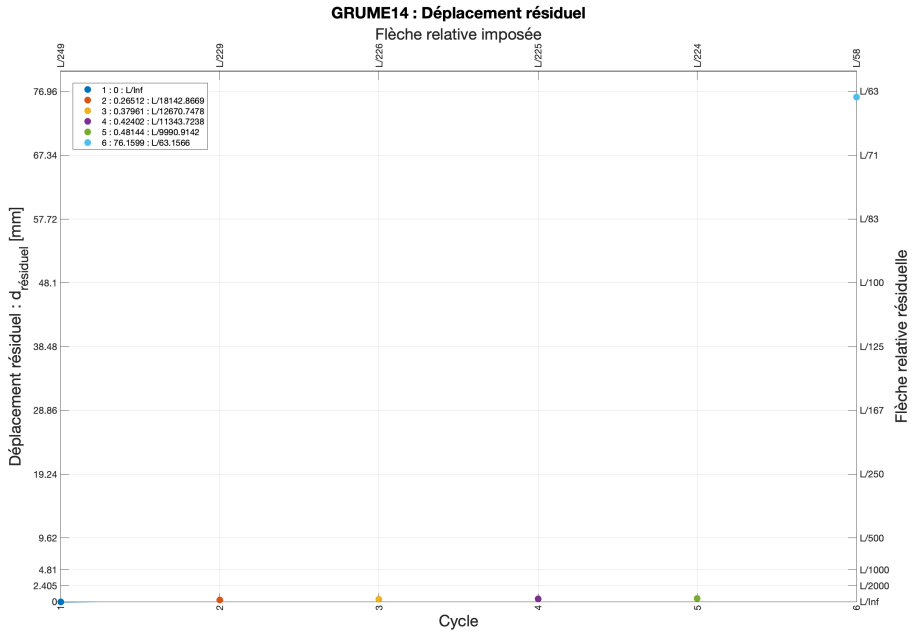


FIGURE N.107 – Déplacement résiduel de la grume 14

Force maximale

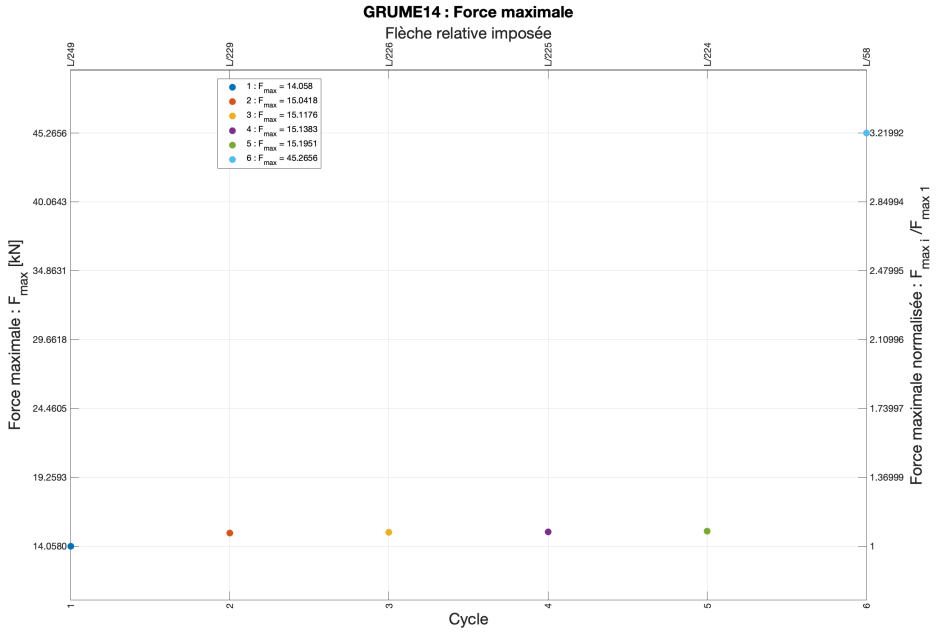


FIGURE N.108 – Force maximale de la grume 14

Rigidité flexionnelle

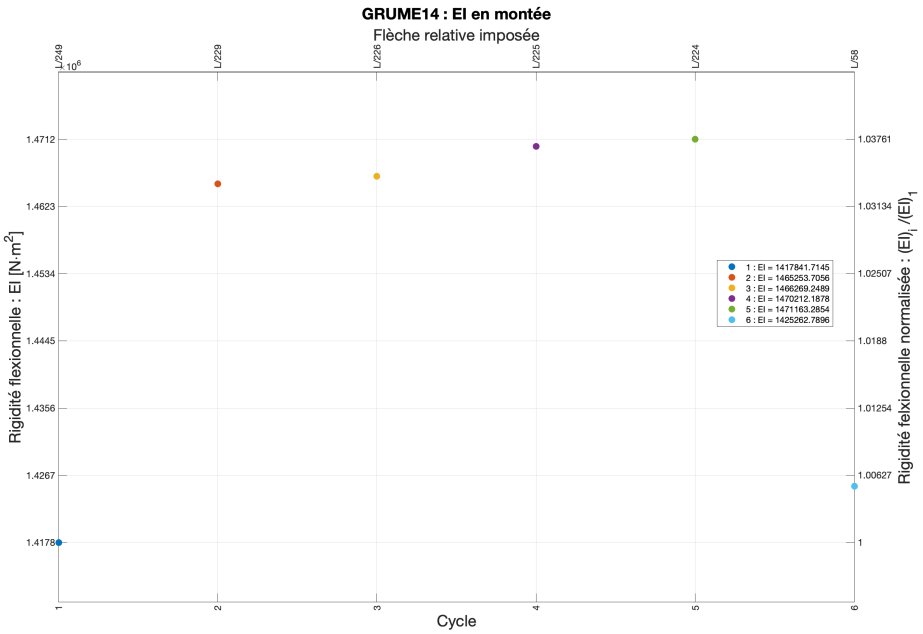


Figure N.109 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 14

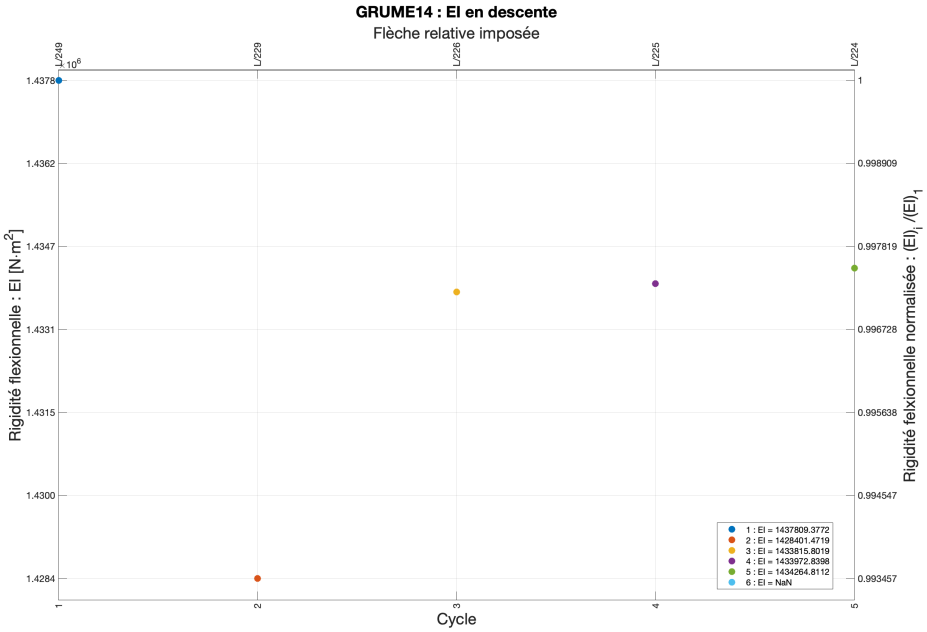


Figure N.110 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 14

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

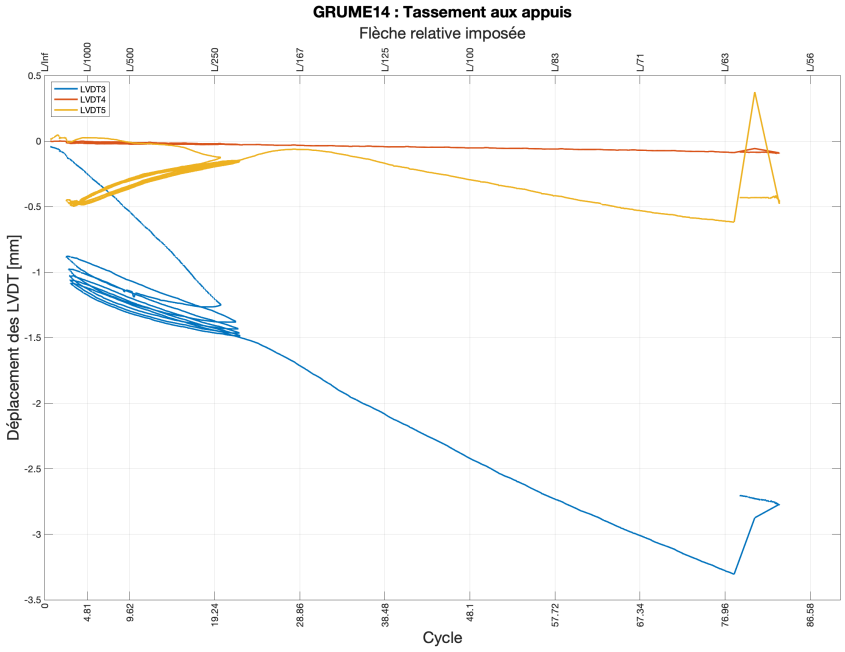


FIGURE N.111 – Tassements d'appui de la grume 14

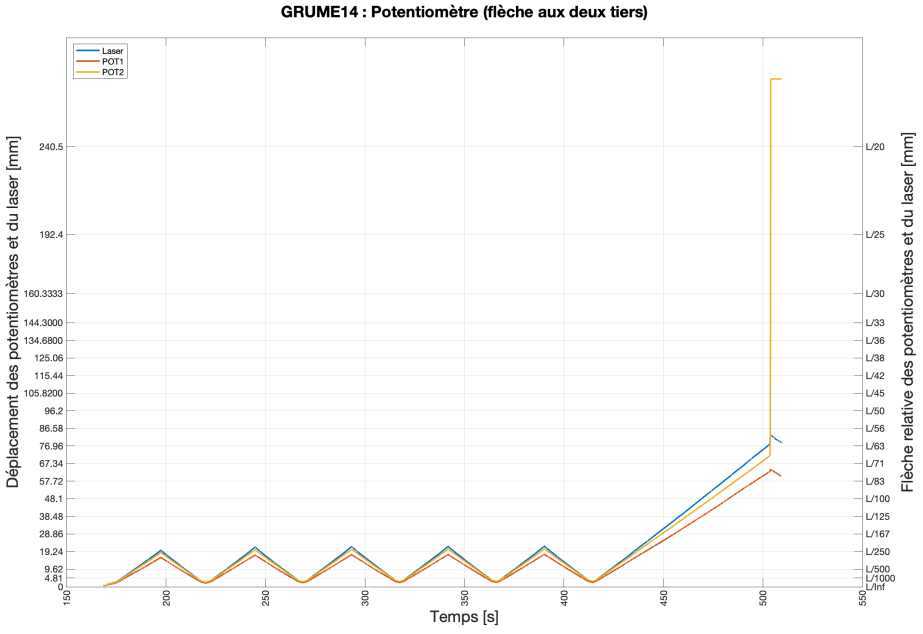


FIGURE N.112 – Flèches aux tiers de la grume 14

Grume 15

Protocole et comportement dans le temps

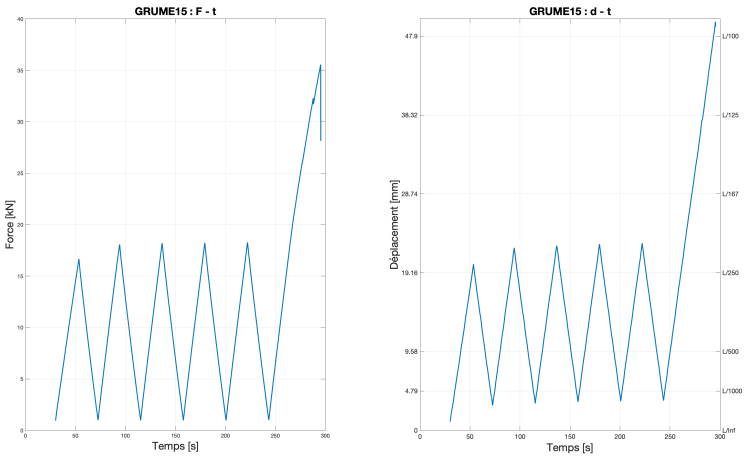


Figure N.113 – Comportement en fonction du temps de la grume 15

Global

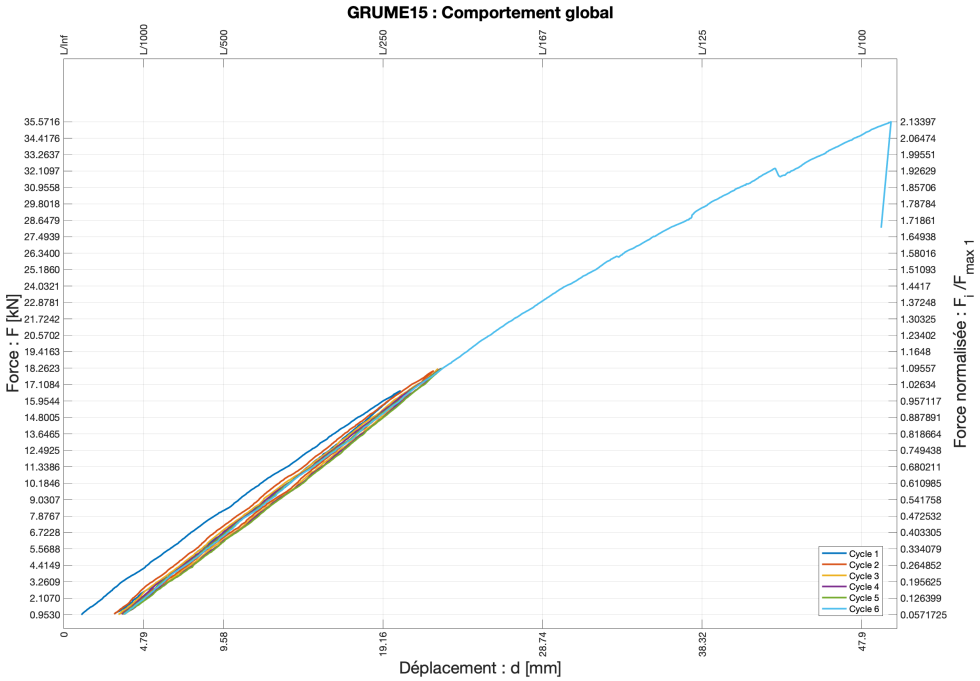


Figure N.114 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 15

Déplacement résiduel

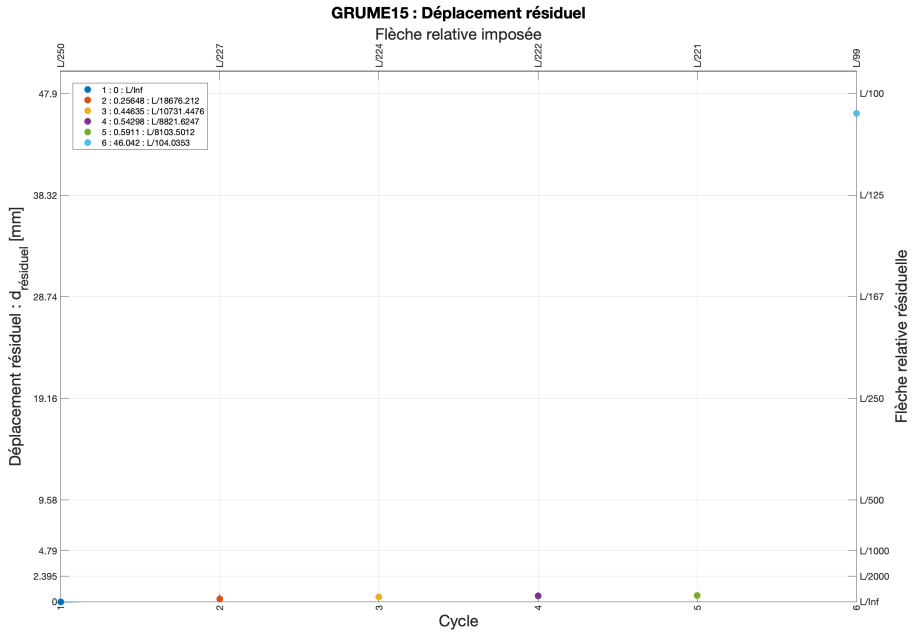


FIGURE N.115 – Déplacement résiduel de la grume 15

Force maximale

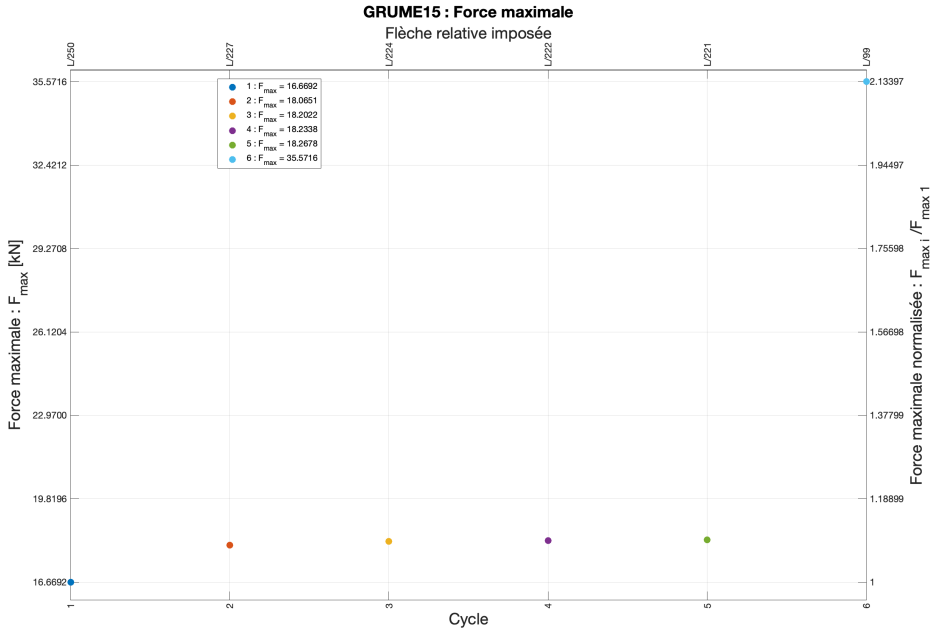


FIGURE N.116 – Force maximale de la grume 15

Rigidité flexionnelle

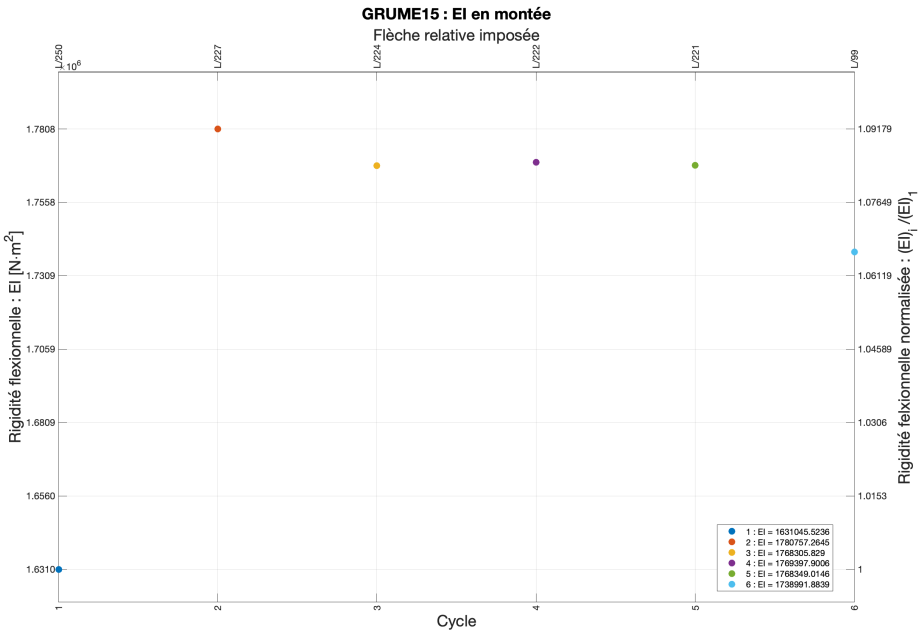


FIGURE N.117 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 15

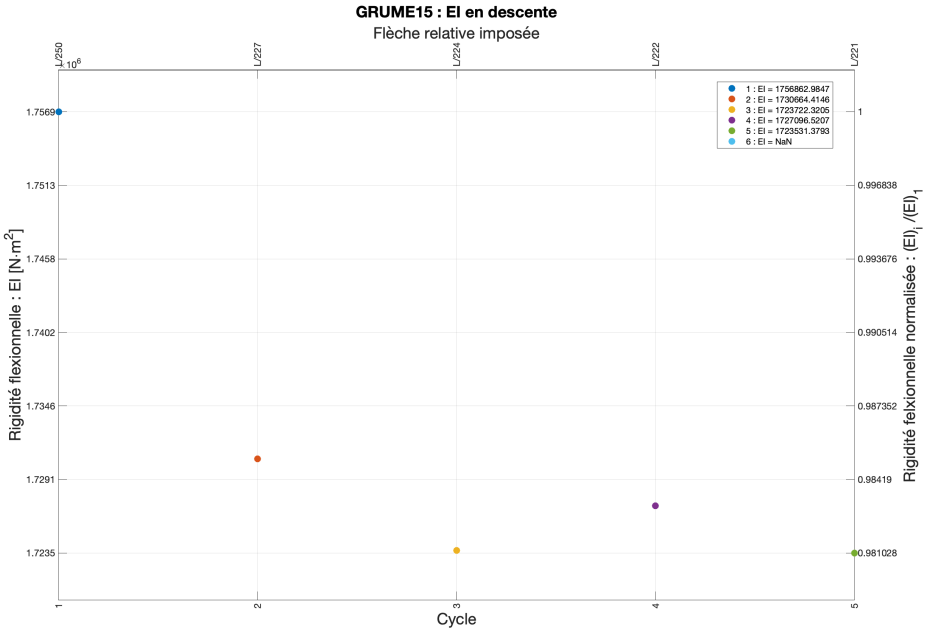


FIGURE N.118 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 15

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

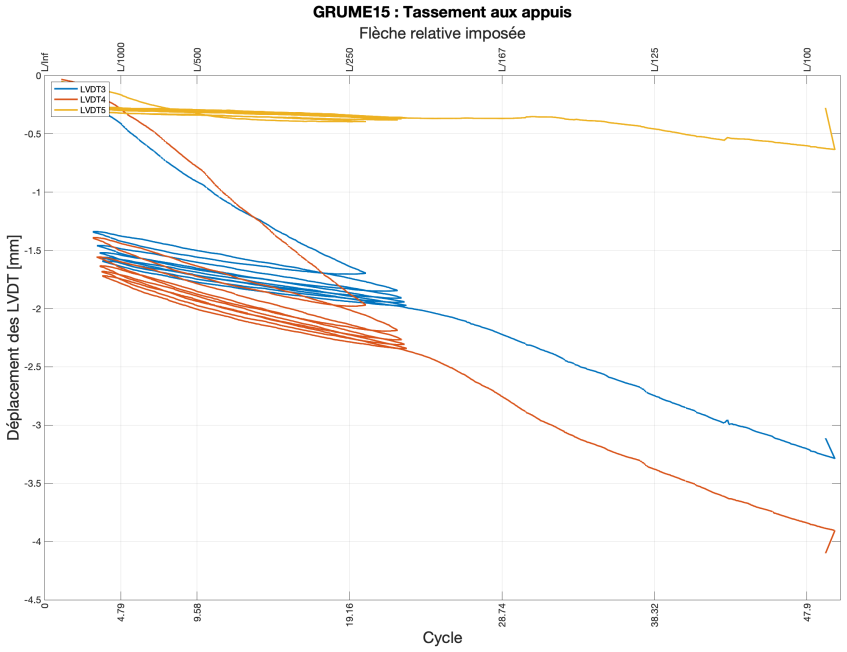


FIGURE N.119 – Tassements d'appui de la grume 15

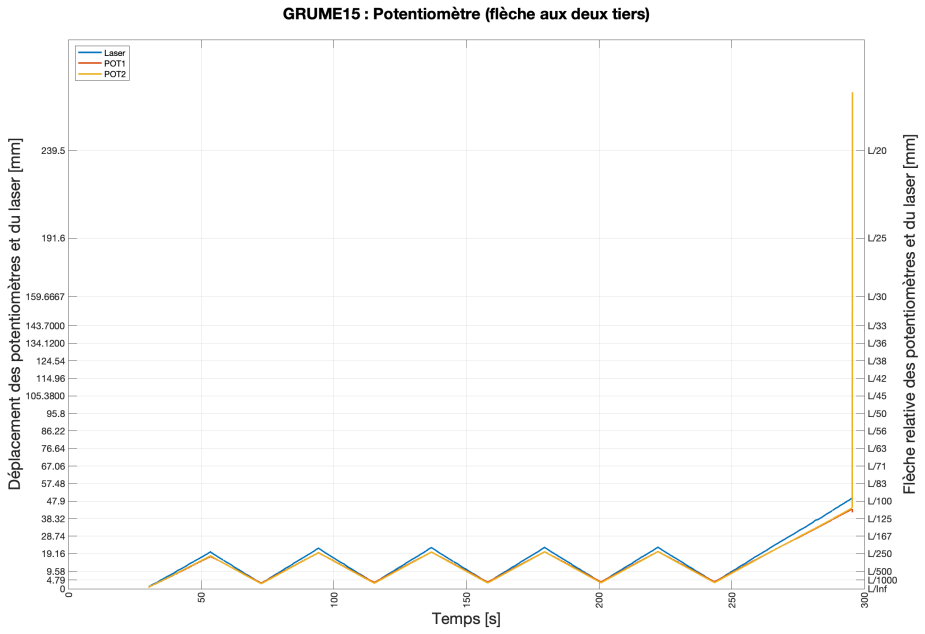


FIGURE N.120 – Flèches aux tiers de la grume 15

Grume 16

Protocole et comportement dans le temps

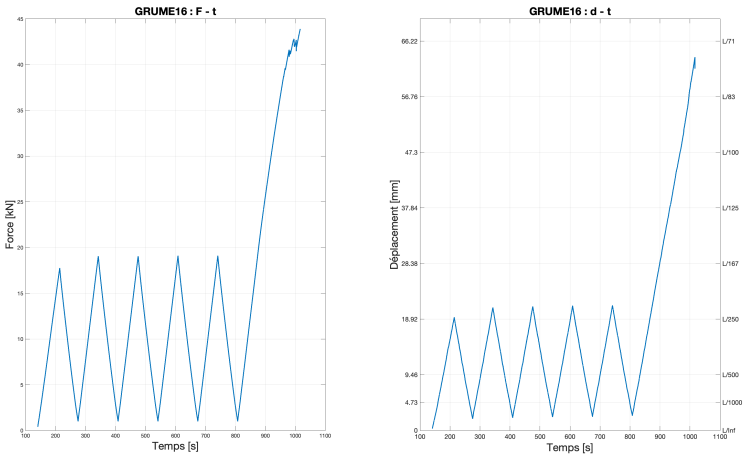


Figure N.121 – Comportement en fonction du temps de la grume 16

Global

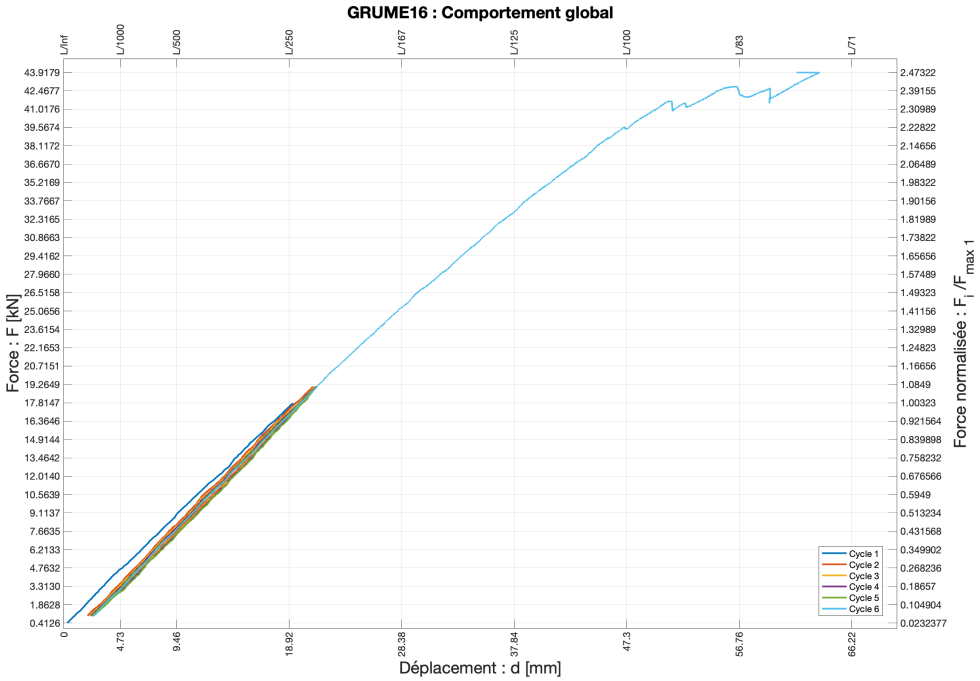


Figure N.122 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 16

Déplacement résiduel

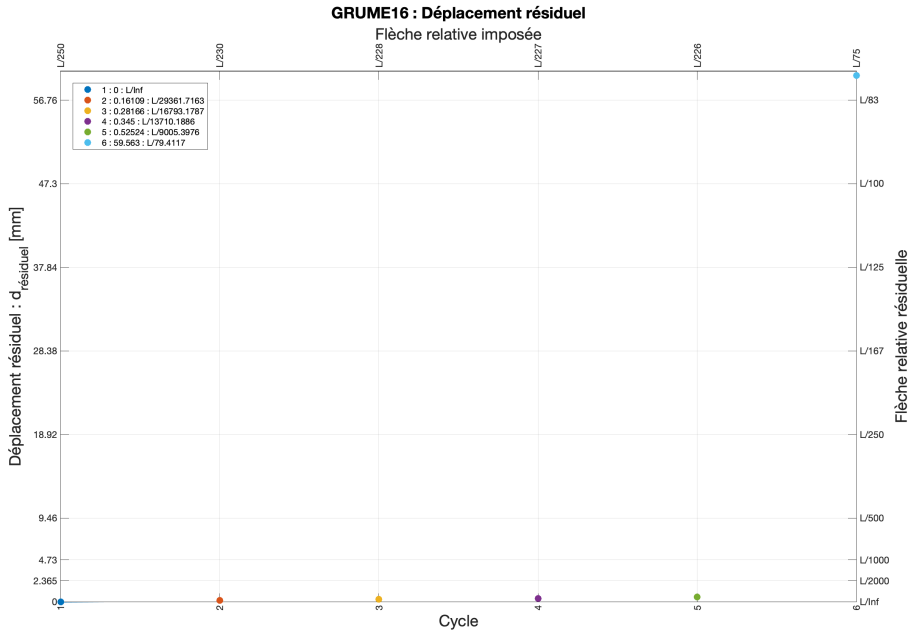


FIGURE N.123 – Déplacement résiduel de la grume 16

Force maximale

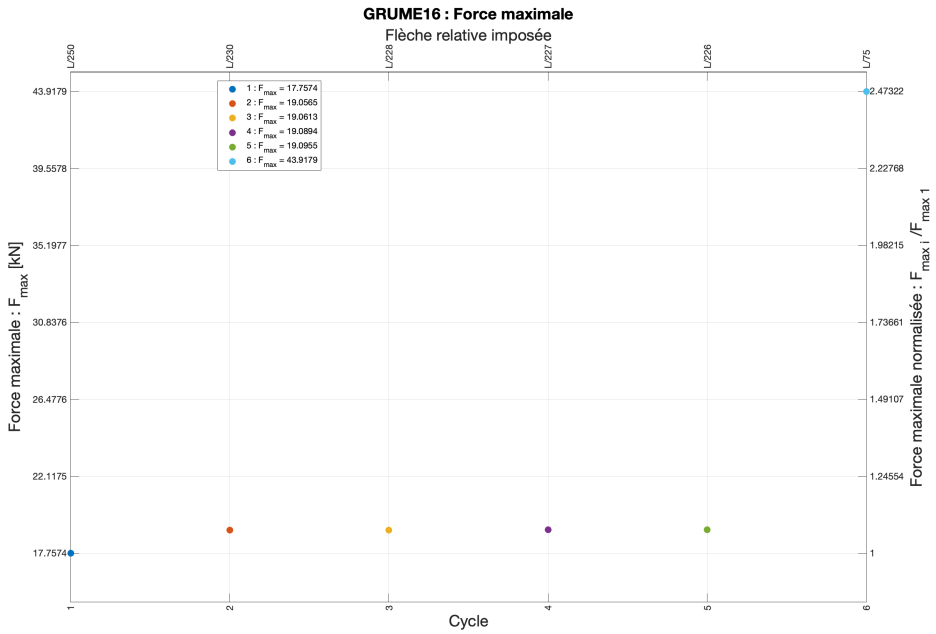


FIGURE N.124 – Force maximale de la grume 16

Rigidité flexionnelle

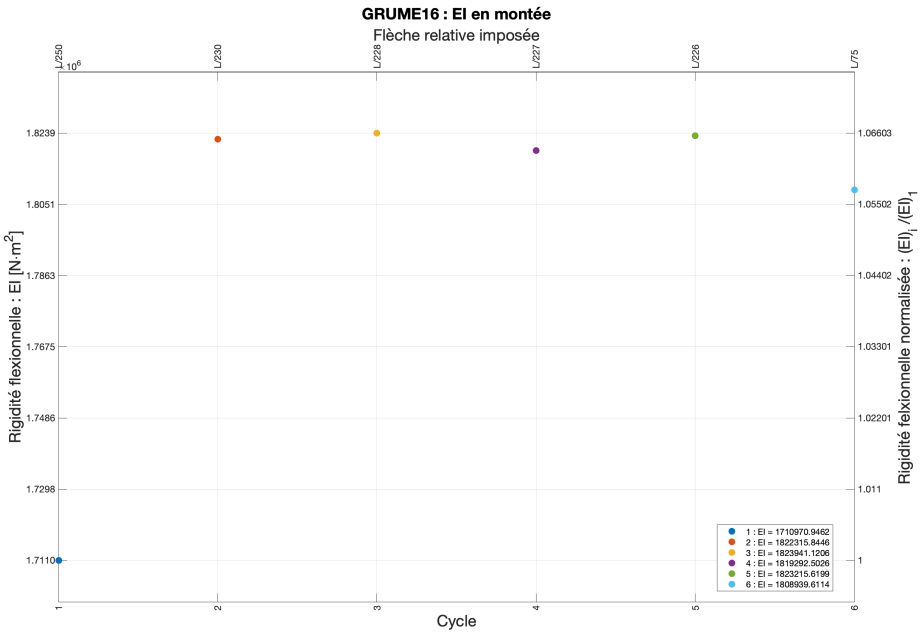


Figure N.125 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 16

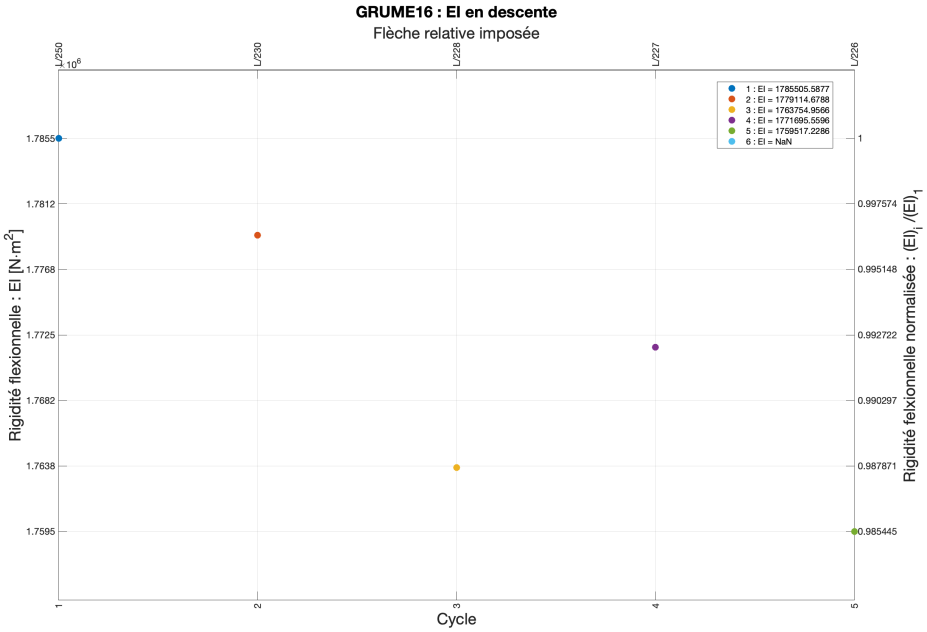


Figure N.126 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 16

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

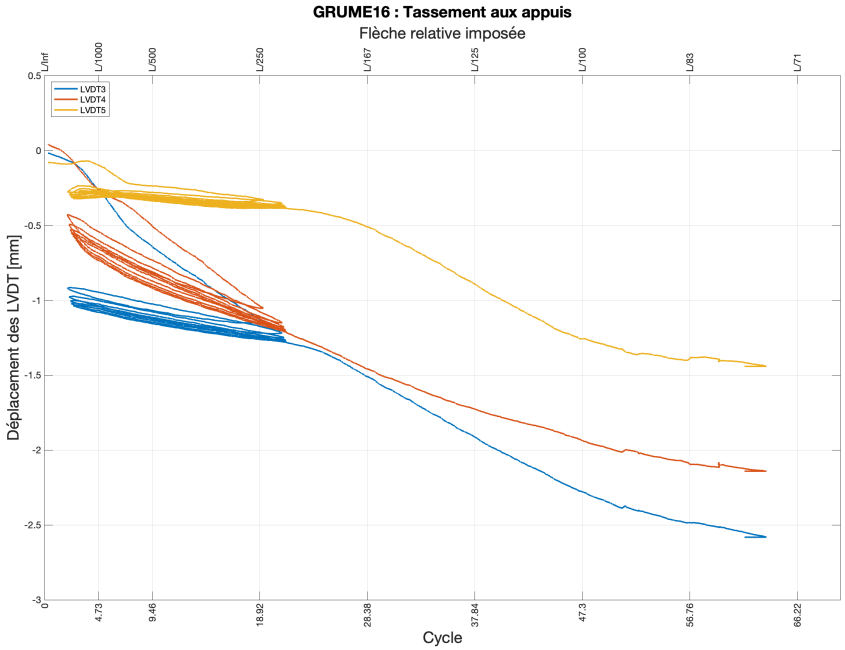


FIGURE N.127 – Tassements d'appui de la grume 16

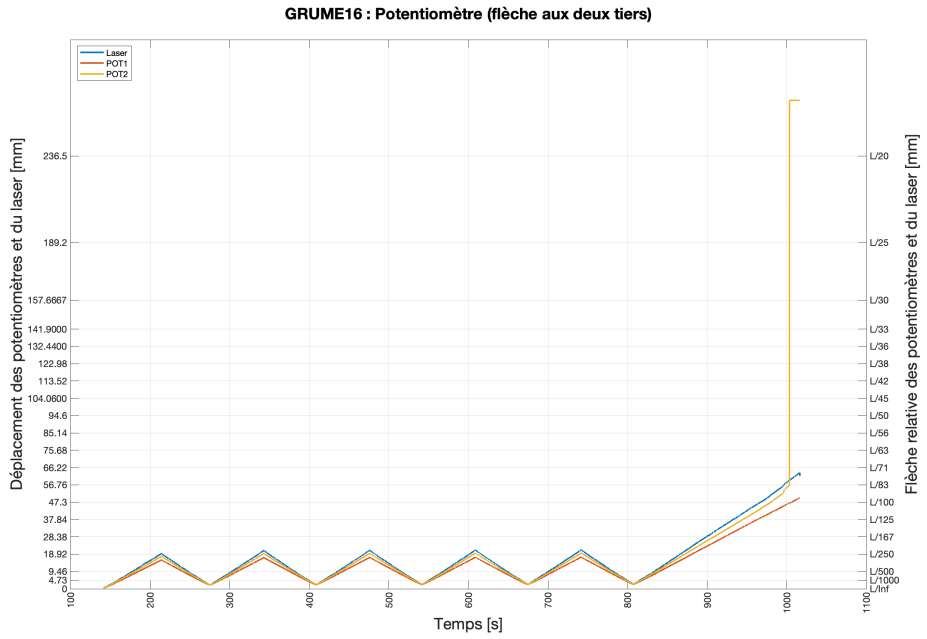


FIGURE N.128 – Flèches aux tiers de la grume 16

Grume 17

Protocole et comportement dans le temps

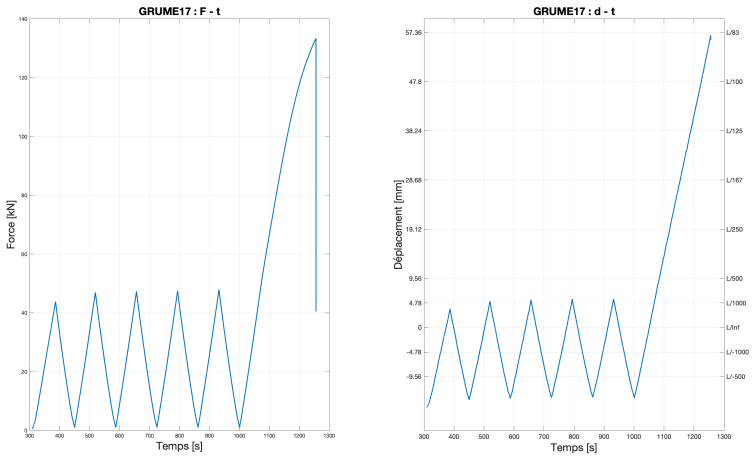


Figure N.129 – Comportement en fonction du temps de la grume 17

Global

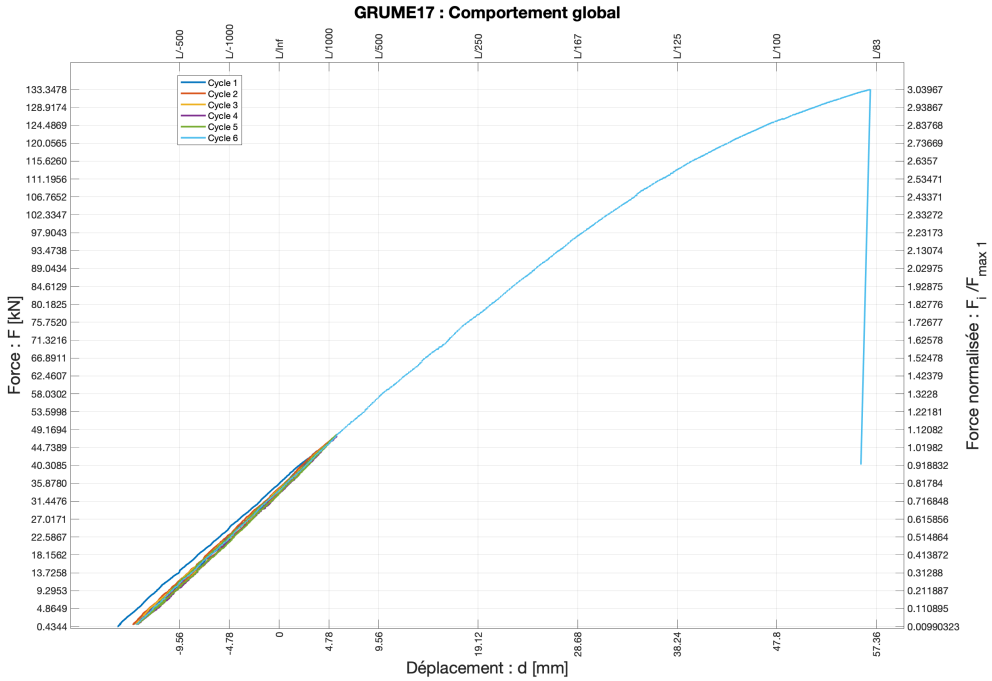


Figure N.130 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 17

Déplacement résiduel

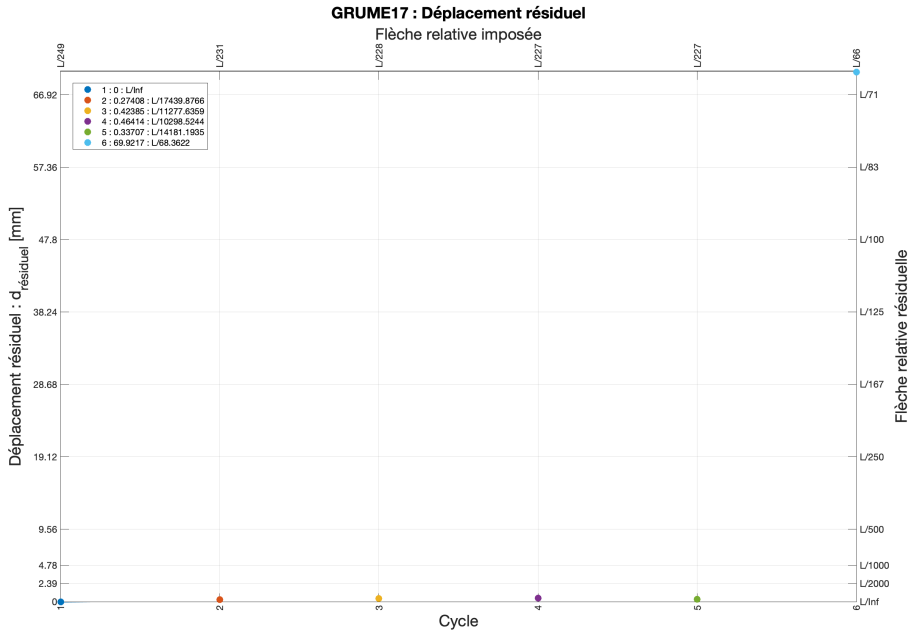


FIGURE N.131 – Déplacement résiduel de la grume 17

Force maximale

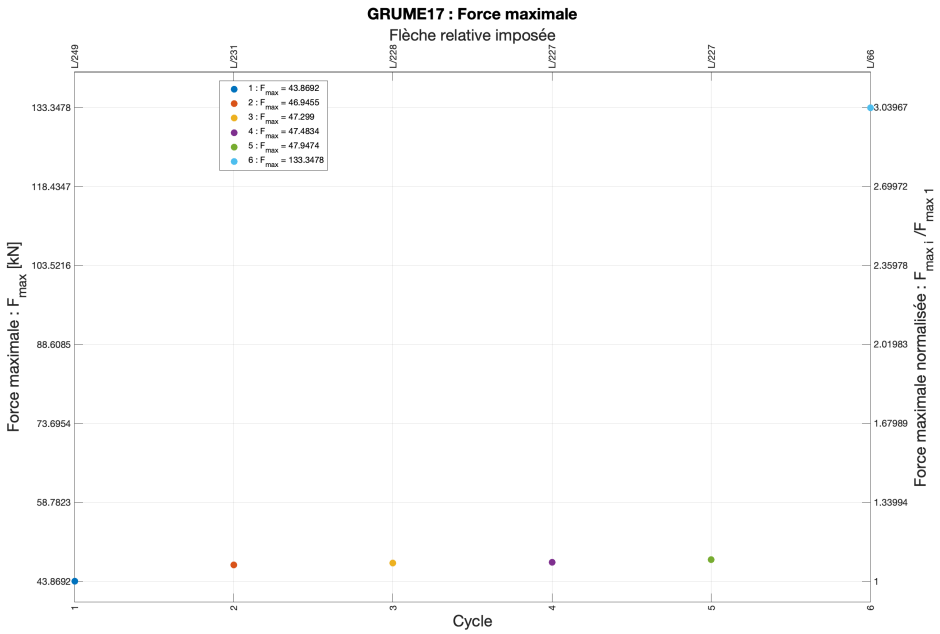


FIGURE N.132 – Force maximale de la grume 17

Rigidité flexionnelle

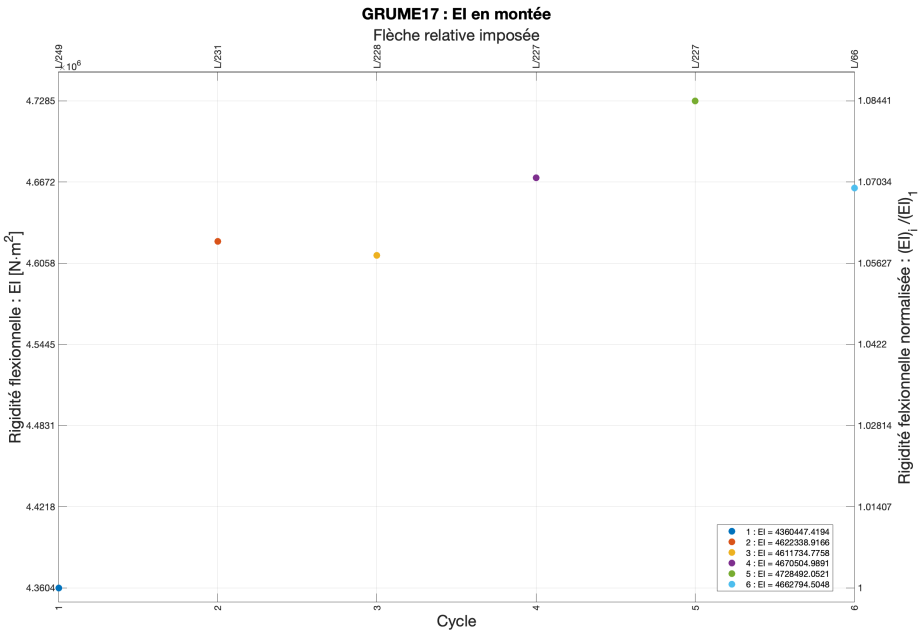


Figure N.133 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 17

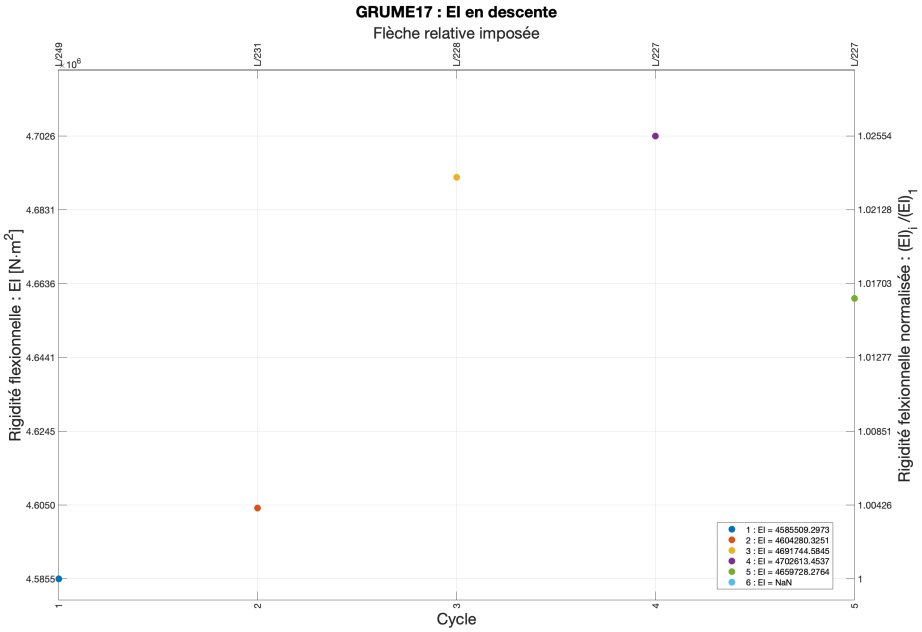


Figure N.134 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 17

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

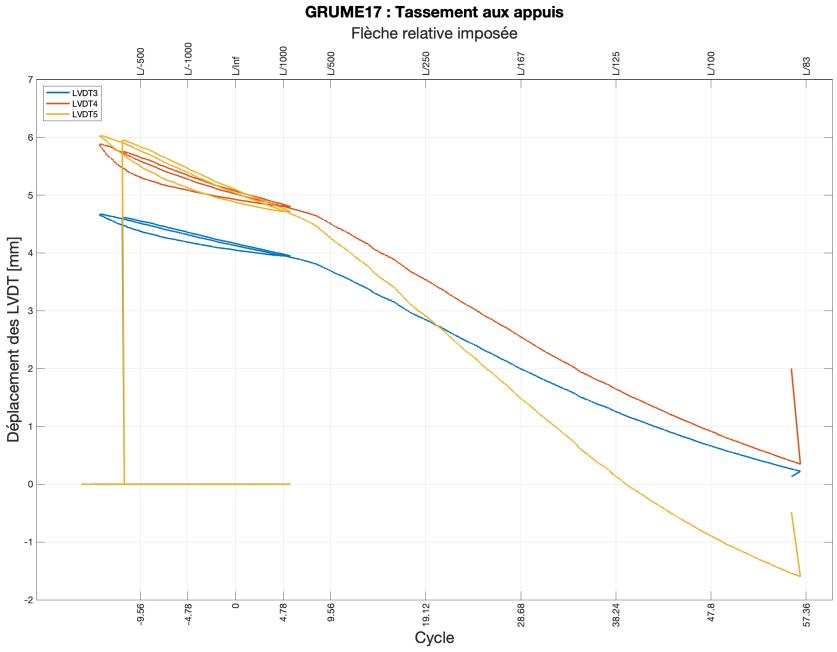


FIGURE N.135 – Tassements d'appui de la grume 17

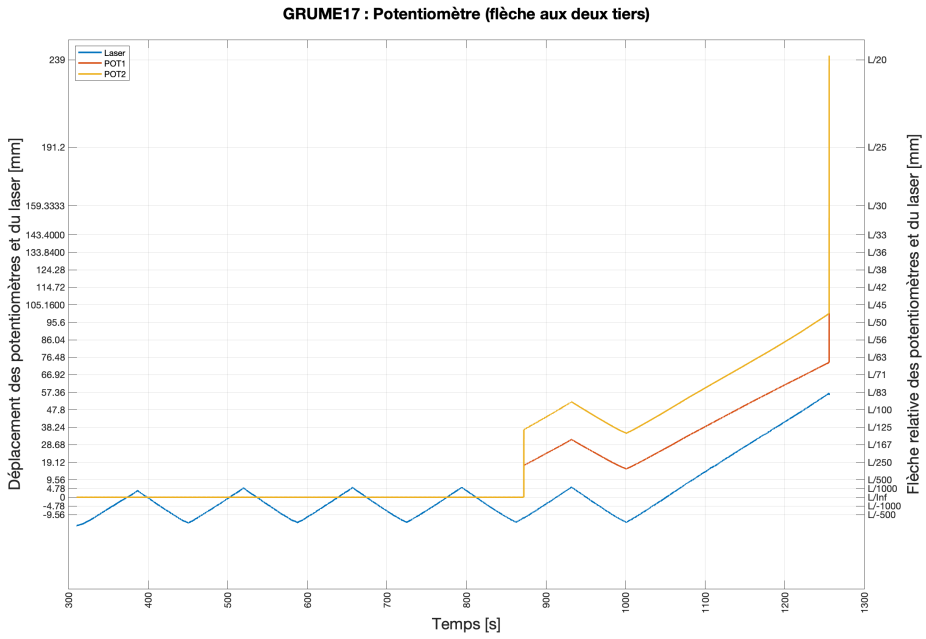


FIGURE N.136 – Flèches aux tiers de la grume 17

Grume 18

Protocole et comportement dans le temps

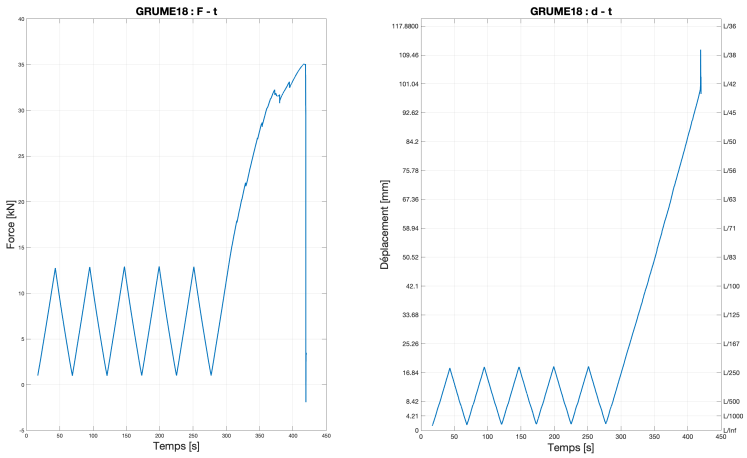


Figure N.137 – Comportement en fonction du temps de la grume 18

Global

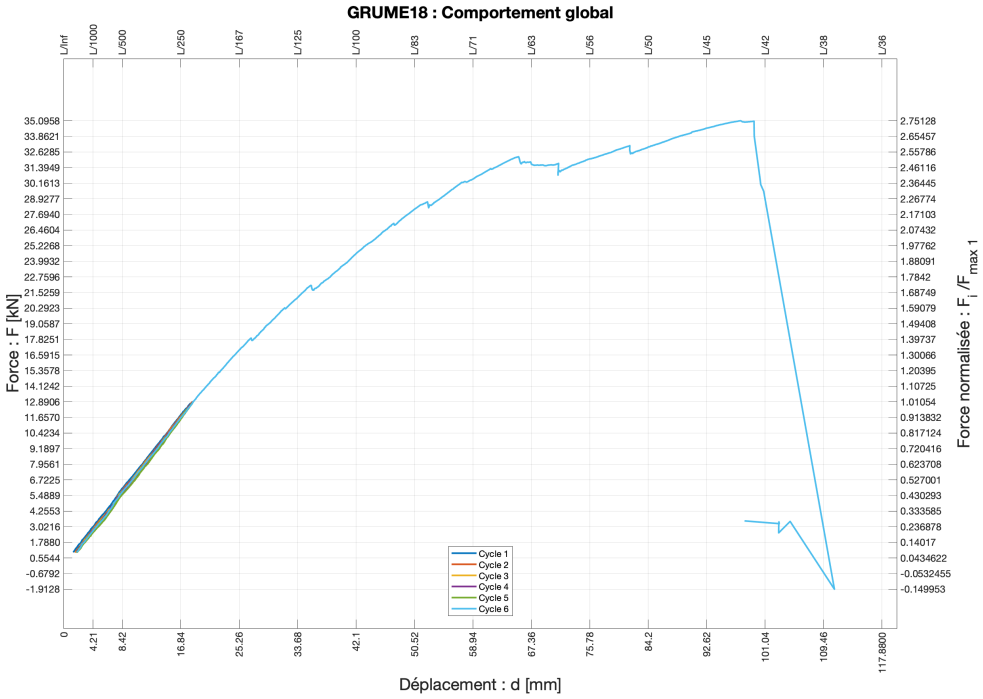


Figure N.138 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 18

Déplacement résiduel

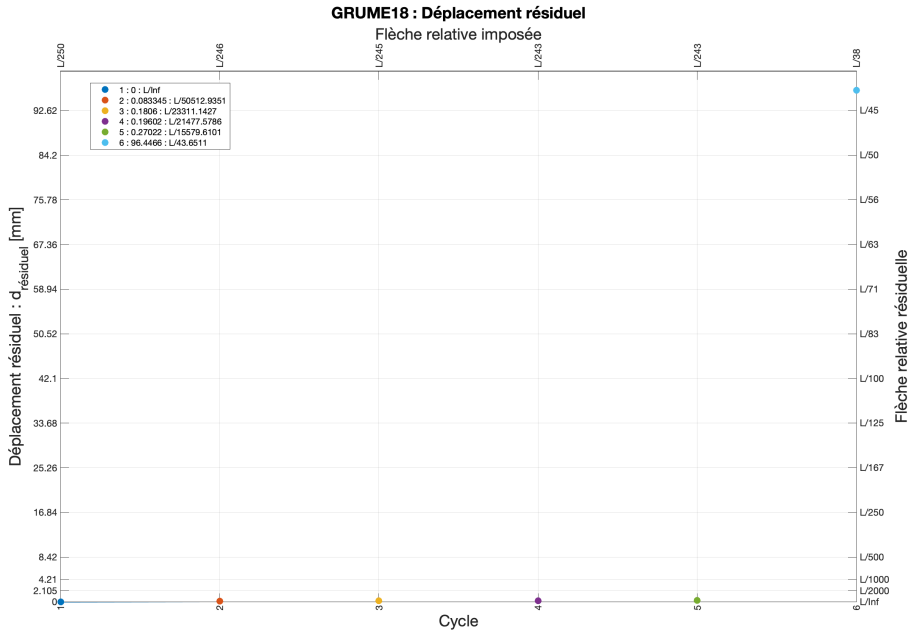


FIGURE N.139 – Déplacement résiduel de la grume 18

Force maximale

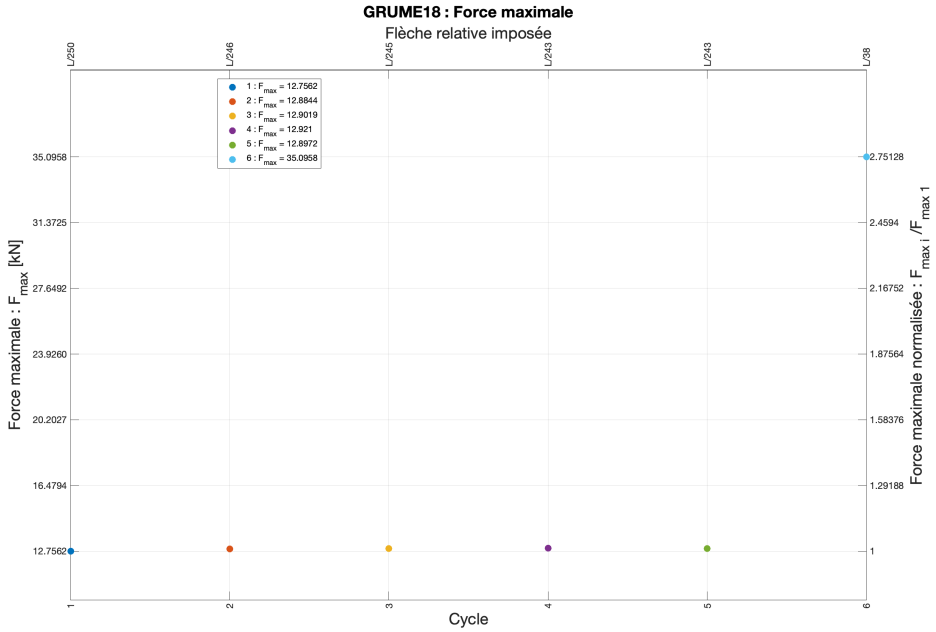


FIGURE N.140 – Force maximale de la grume 18

Rigidité flexionnelle

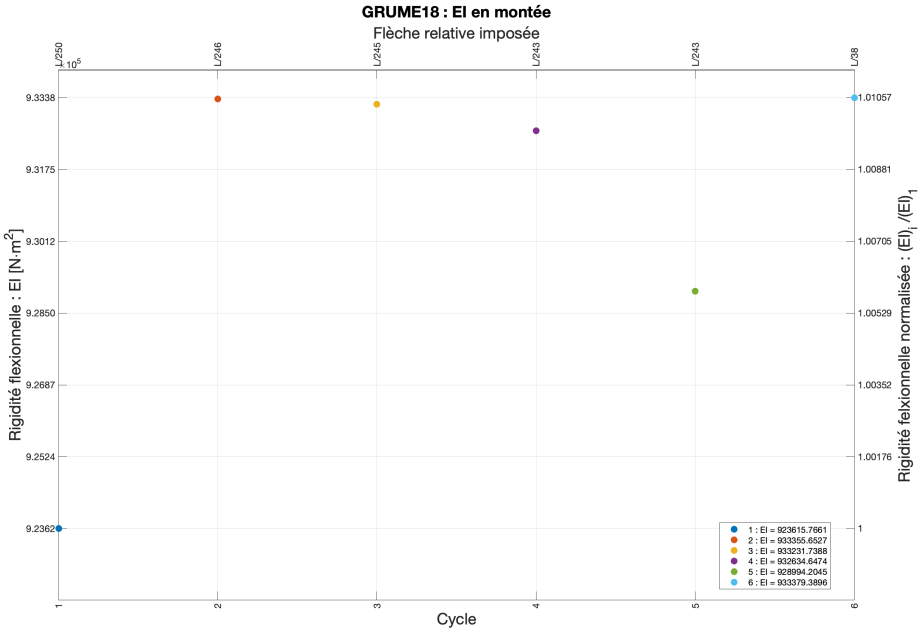


Figure N.141 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 18

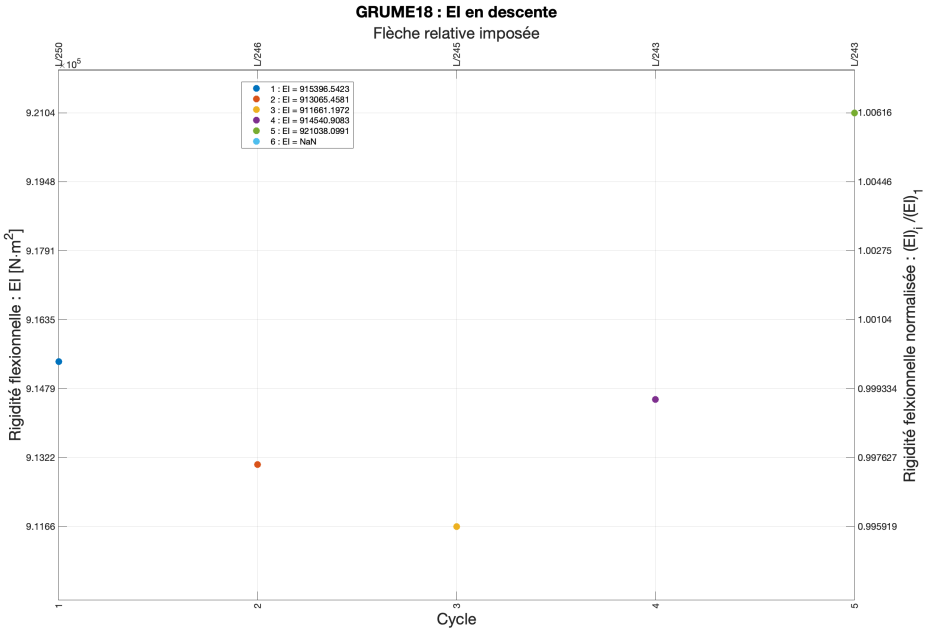


Figure N.142 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 18

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

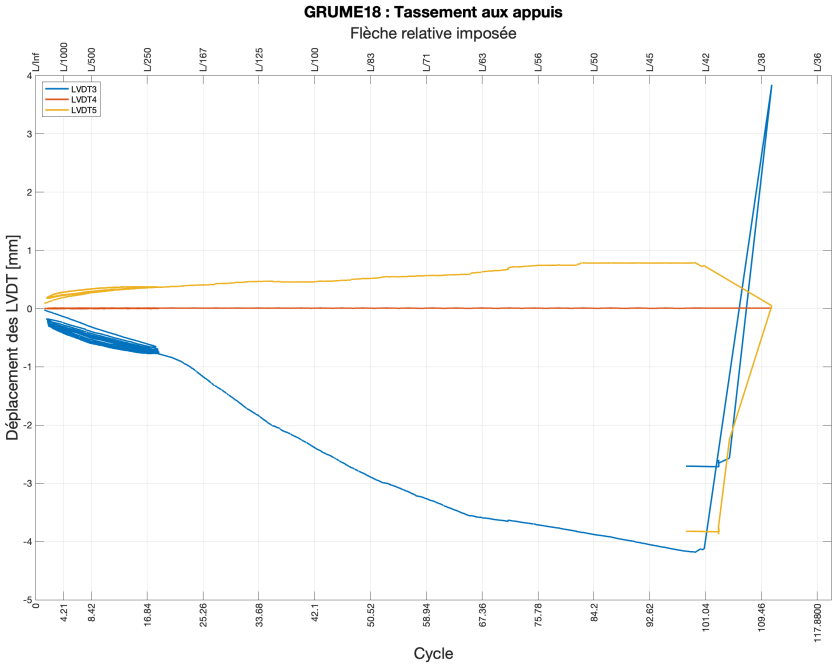


FIGURE N.143 – Tassements d'appui de la grume 18

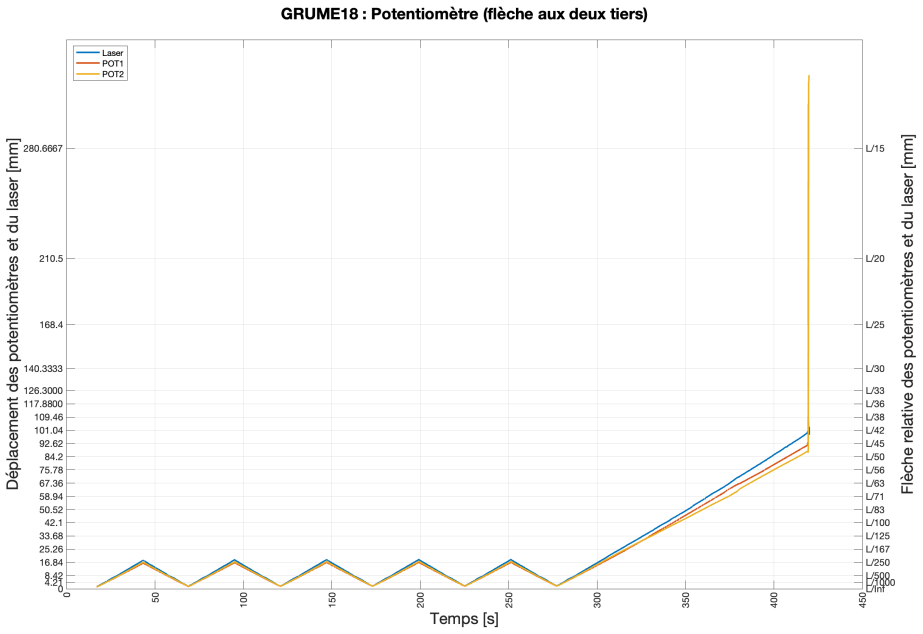


FIGURE N.144 – Flèches aux tiers de la grume 18

Grume 19

Protocole et comportement dans le temps

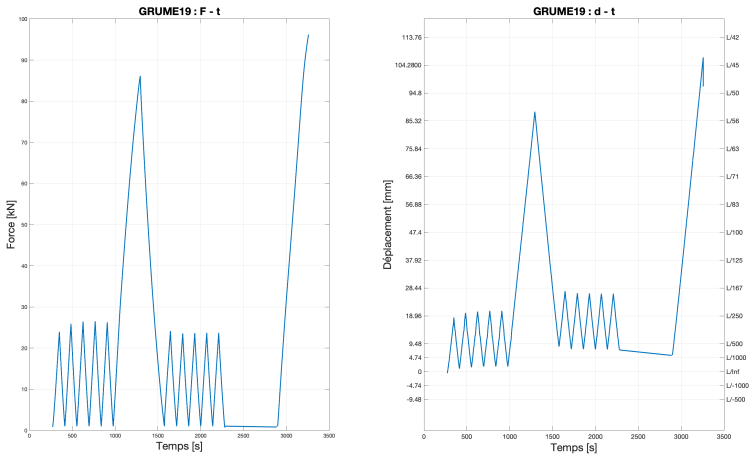


Figure N.145 – Comportement en fonction du temps de la grume 19

Global

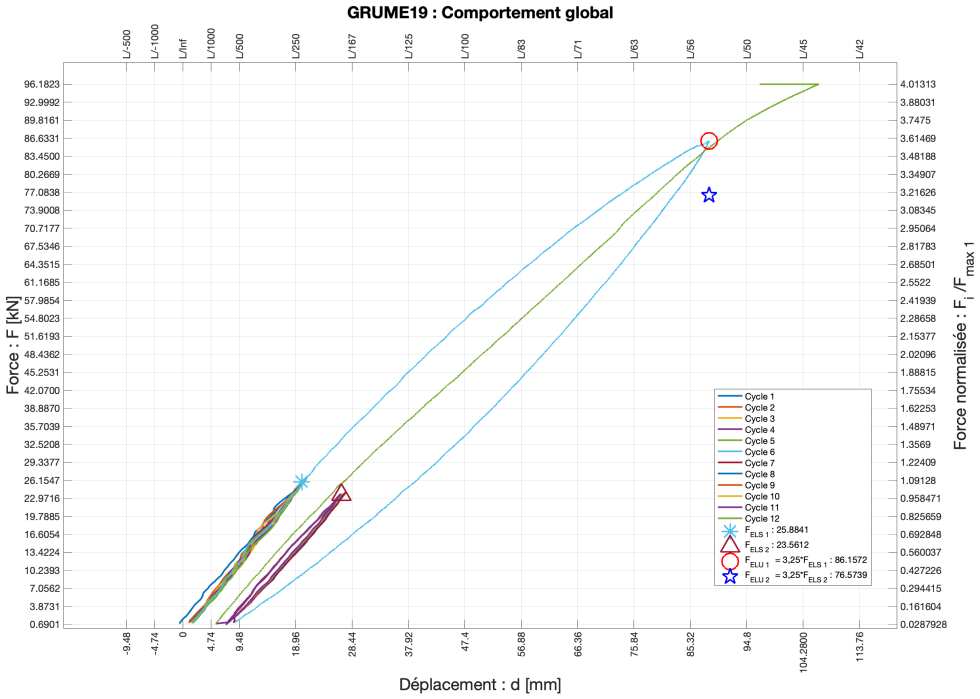


Figure N.146 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 19

Déplacement résiduel

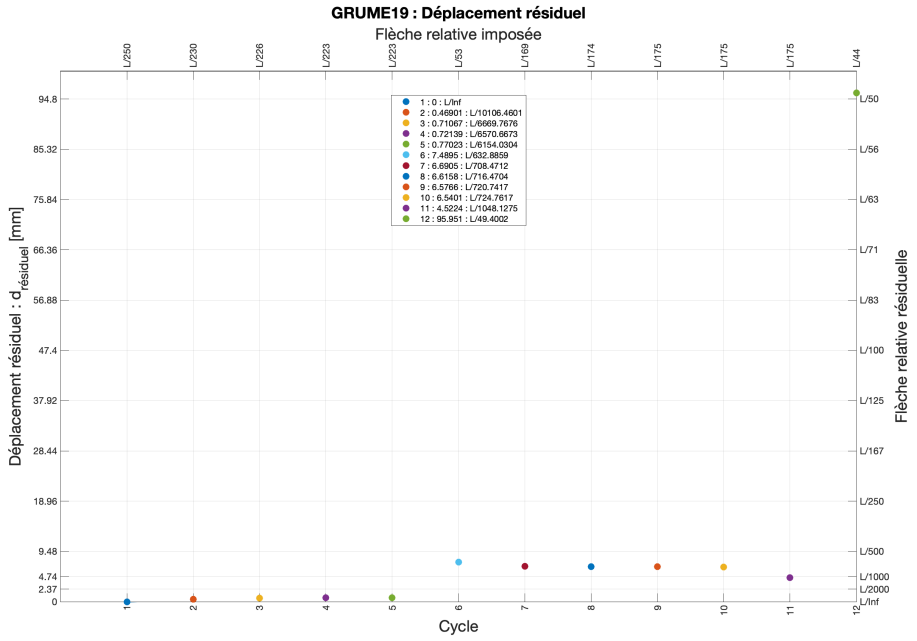


FIGURE N.147 – Déplacement résiduel de la grume 19

Force maximale

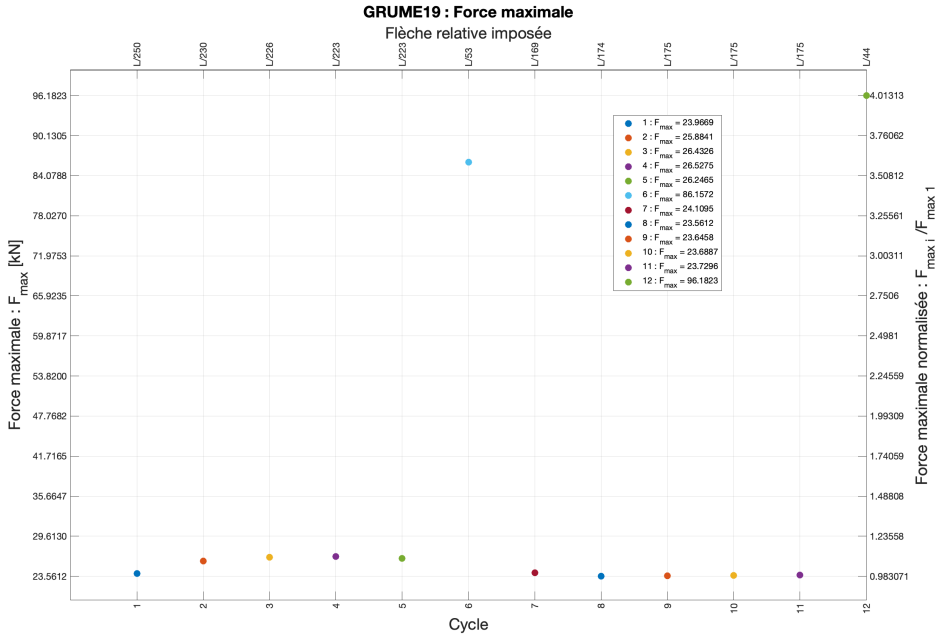


FIGURE N.148 – Force maximale de la grume 19

Rigidité flexionnelle

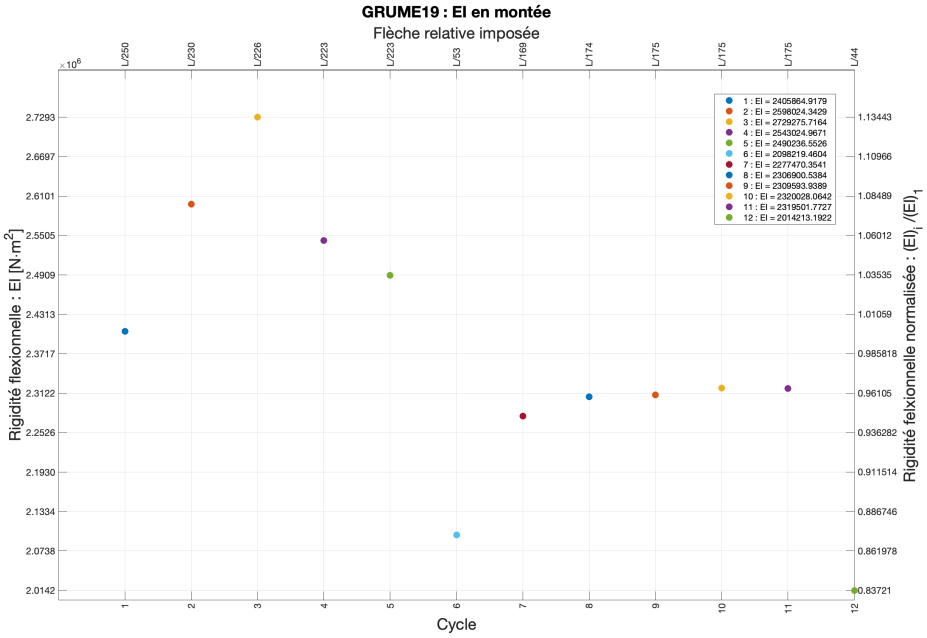


FIGURE N.149 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 19

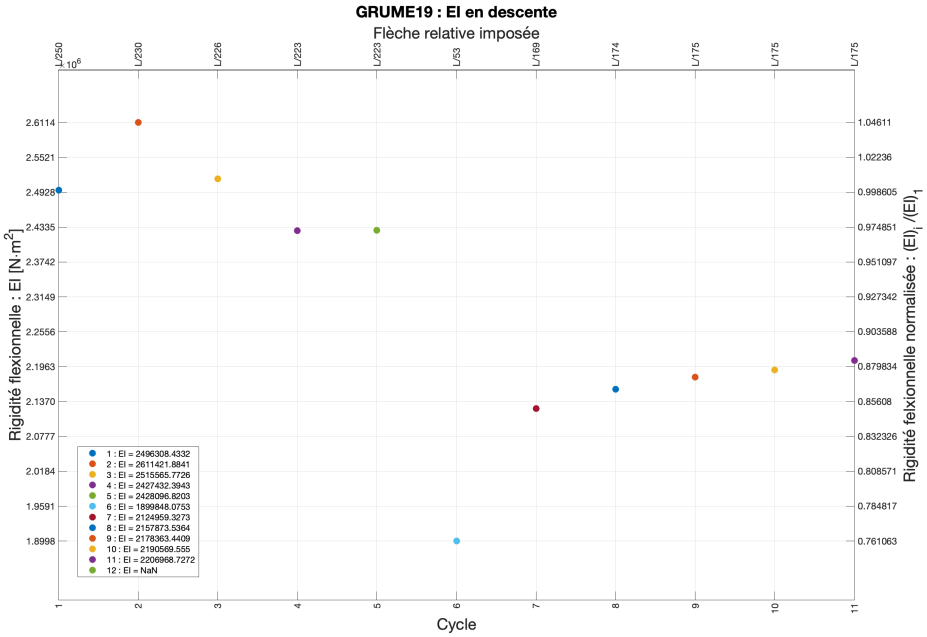


FIGURE N.150 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 19

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

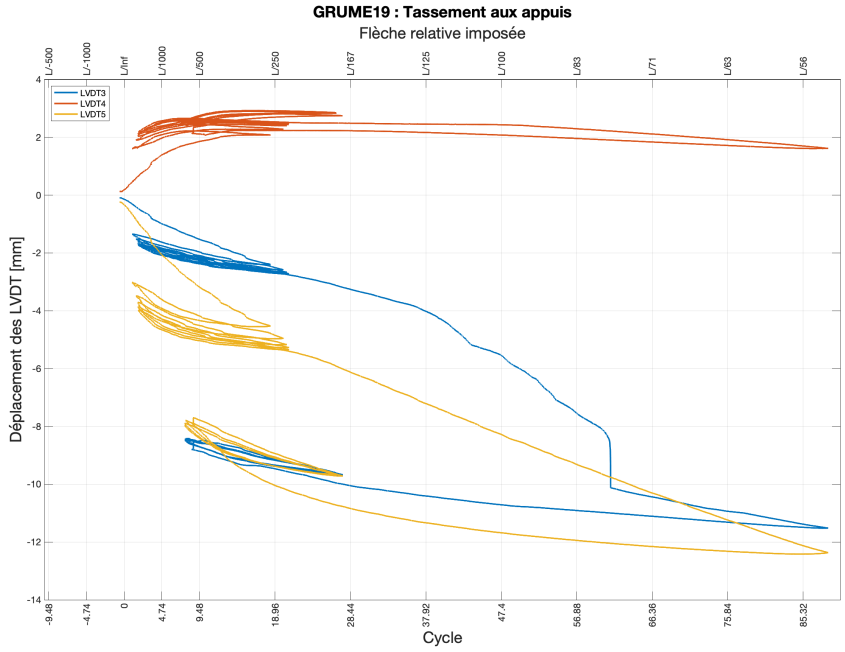


FIGURE N.151 – Tassements d'appui de la grume 19

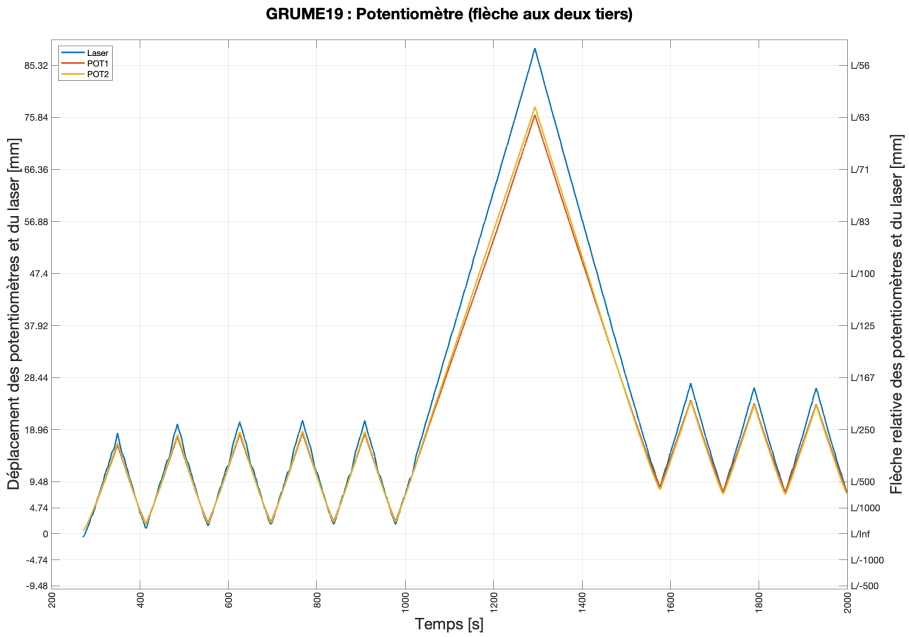


FIGURE N.152 – Flèches aux tiers de la grume 19

Grume 19

Protocole et comportement dans le temps

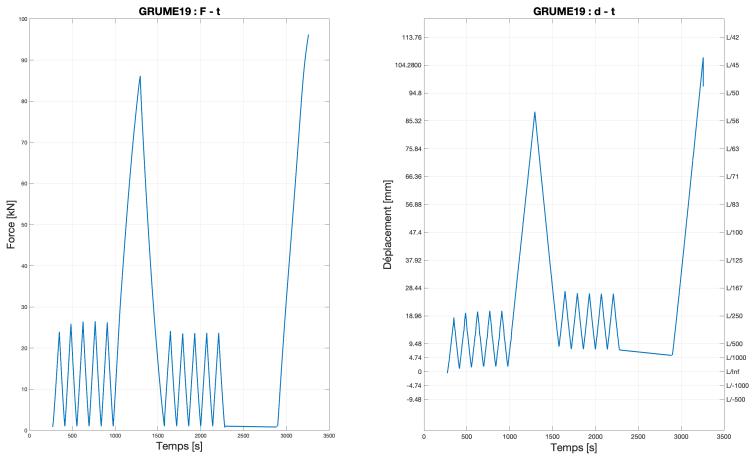


Figure N.153 – Comportement en fonction du temps de la grume 19

Global

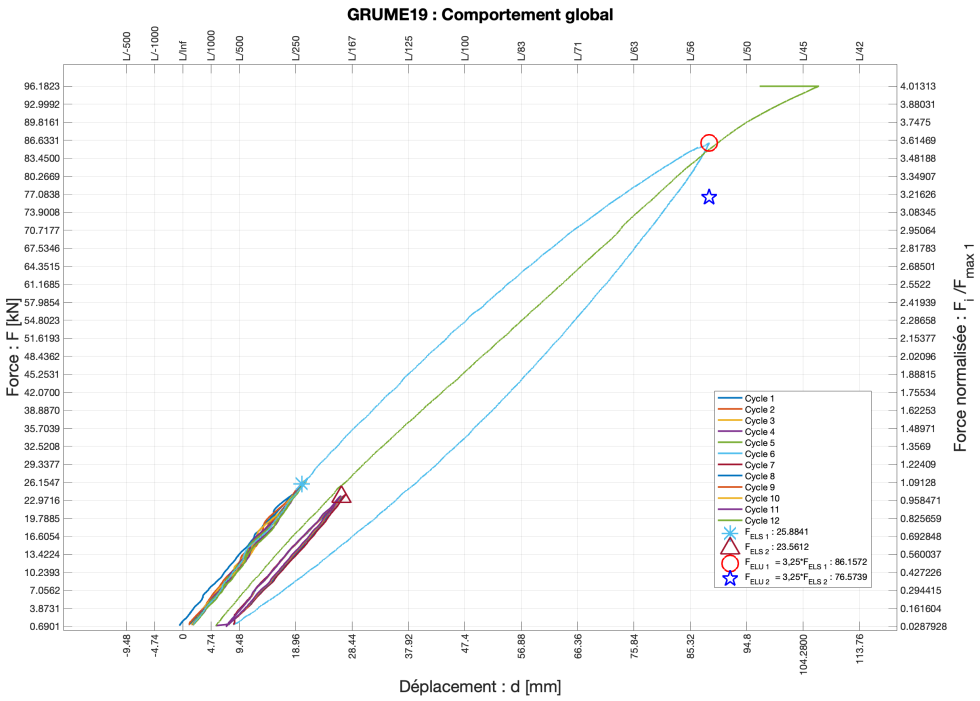


Figure N.154 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 19

Déplacement résiduel

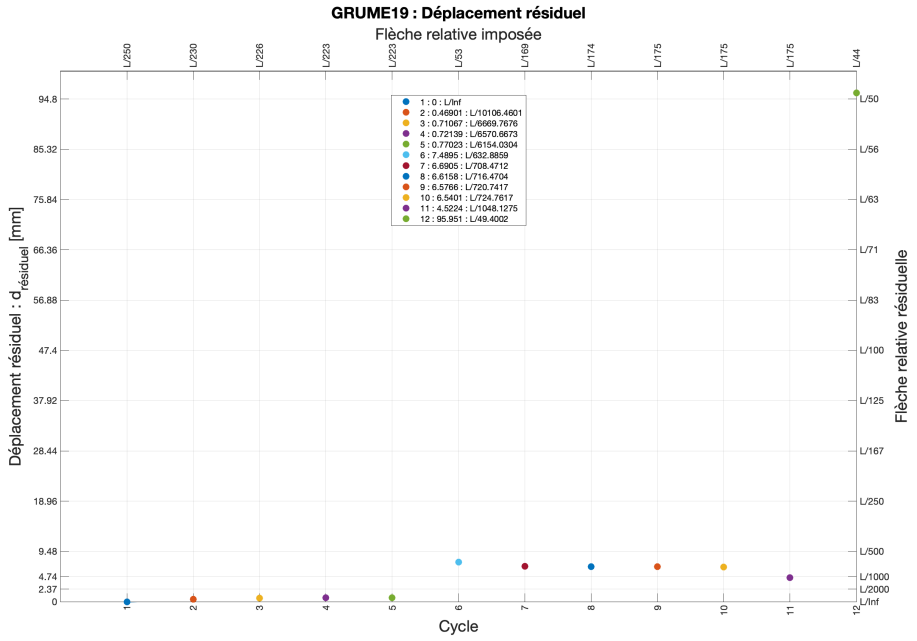


FIGURE N.155 – Déplacement résiduel de la grume 19

Force maximale

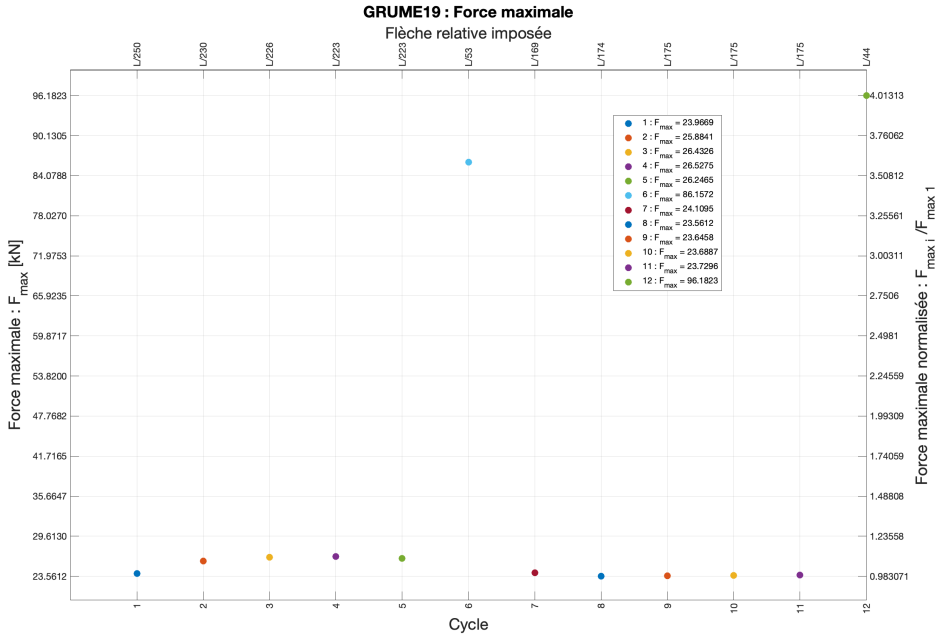


FIGURE N.156 – Force maximale de la grume 19

Rigidité flexionnelle

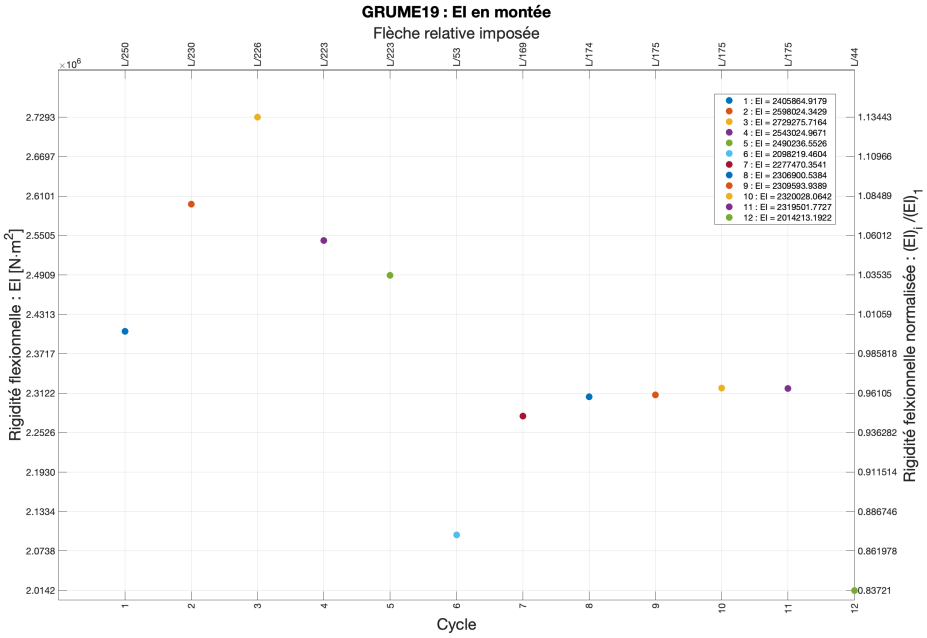


FIGURE N.157 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 19

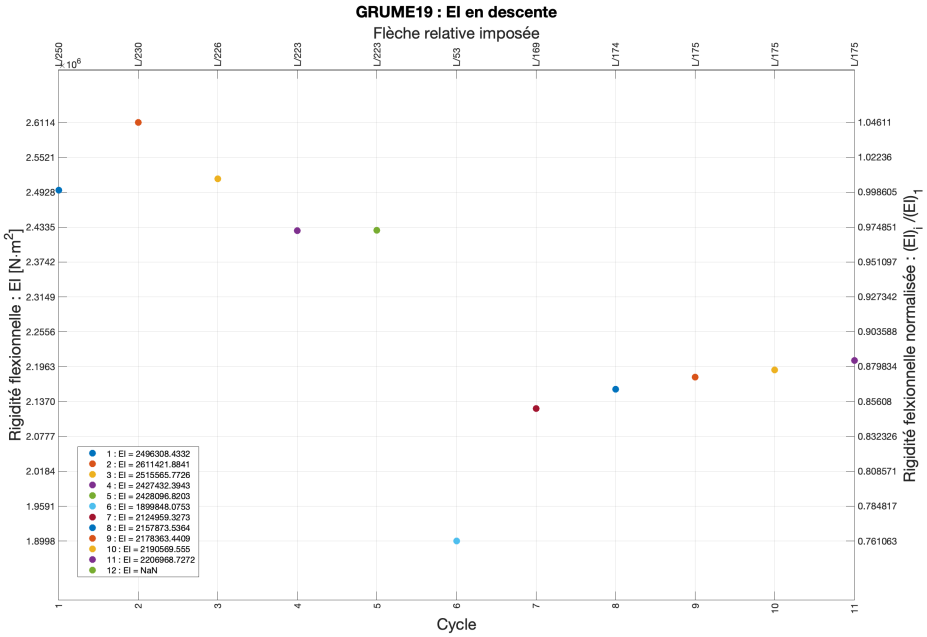


FIGURE N.158 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 19

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

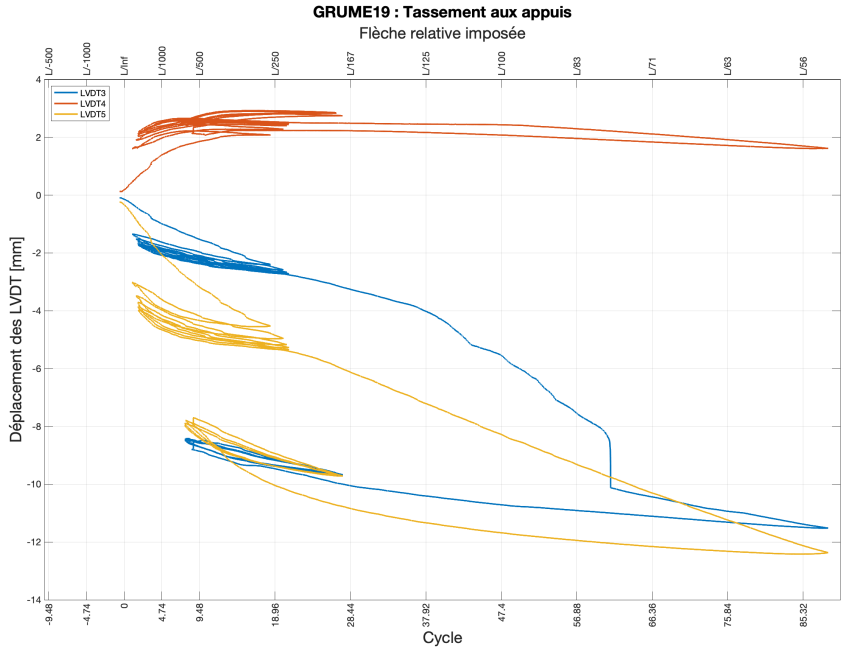


FIGURE N.159 – Tassements d'appui de la grume 19

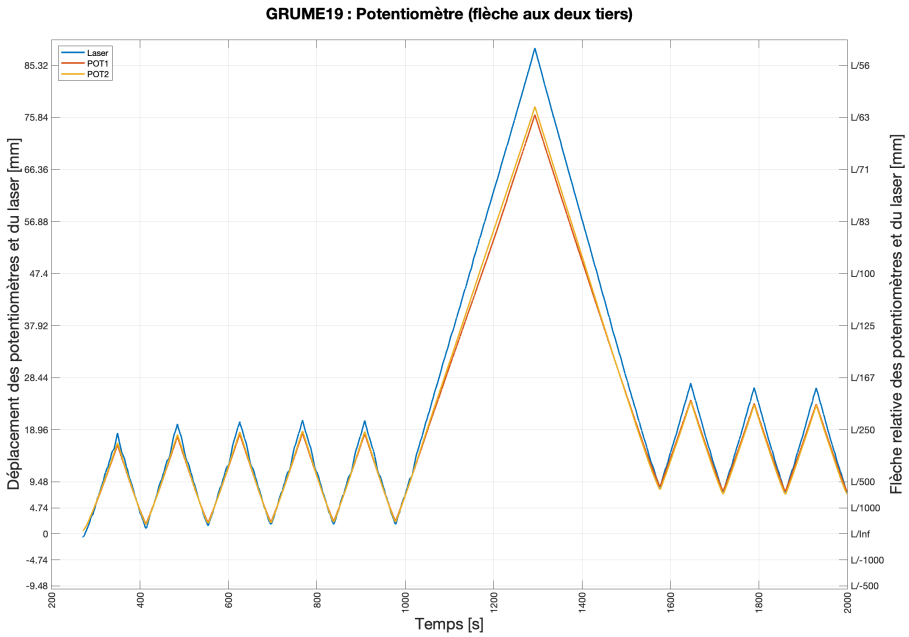


FIGURE N.160 – Flèches aux tiers de la grume 19

Grume 20

Protocole et comportement dans le temps

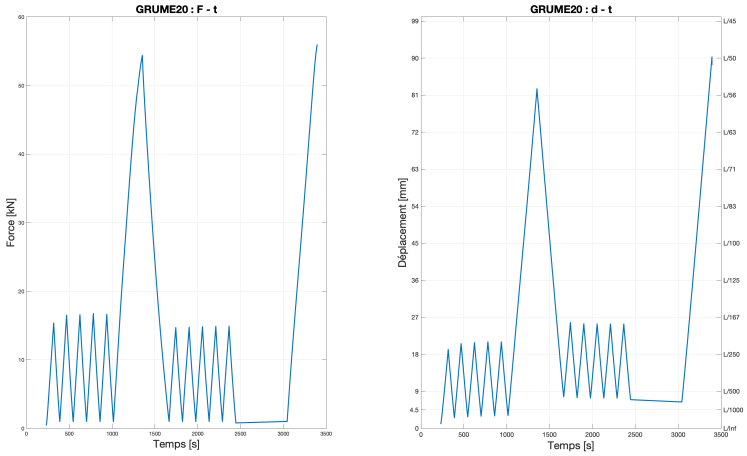


Figure N.161 – Comportement en fonction du temps de la grume 20

Global

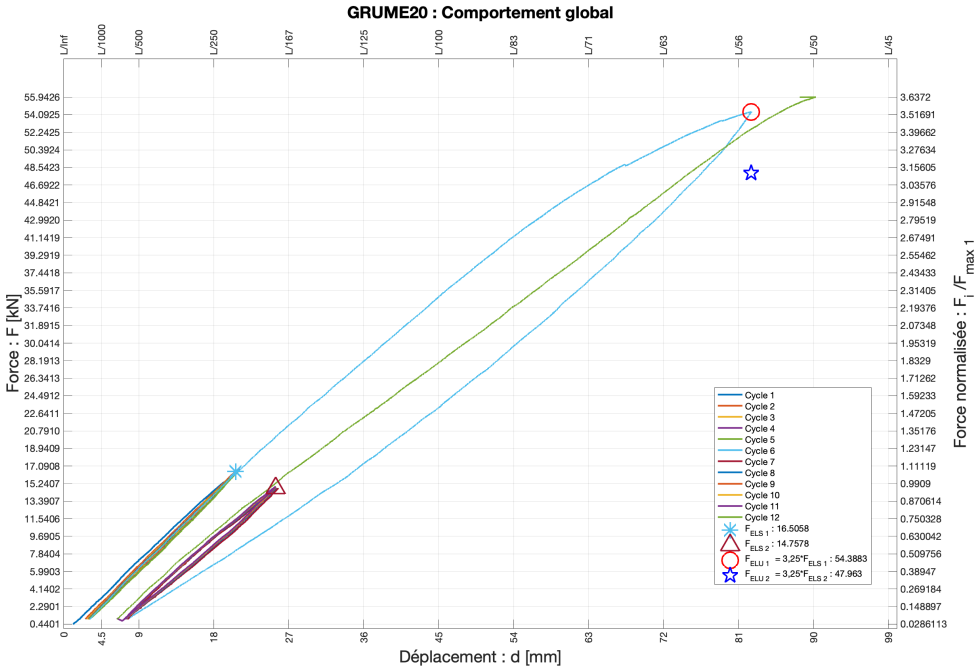


Figure N.162 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 20

Déplacement résiduel

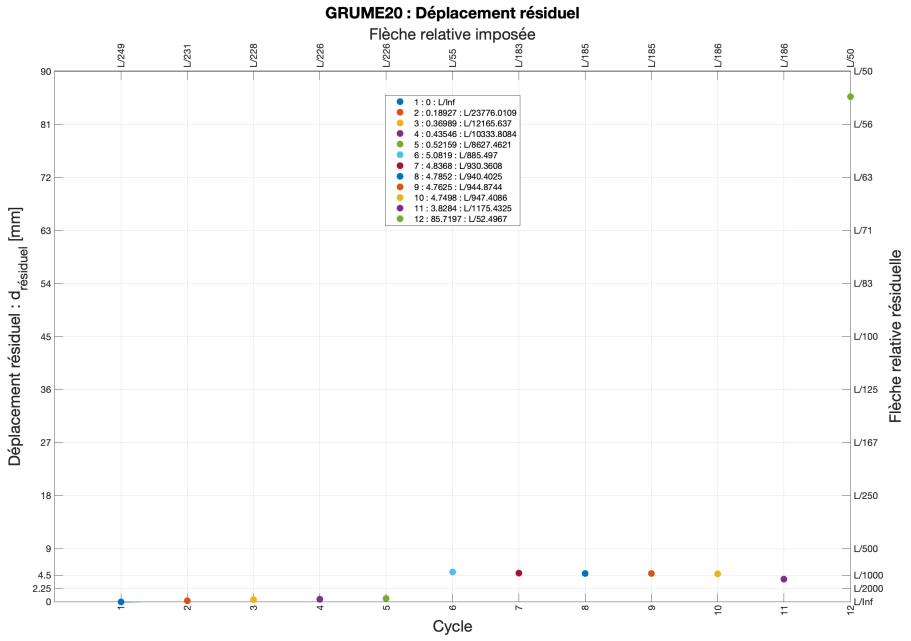


FIGURE N.163 – Déplacement résiduel de la grume 20

Force maximale

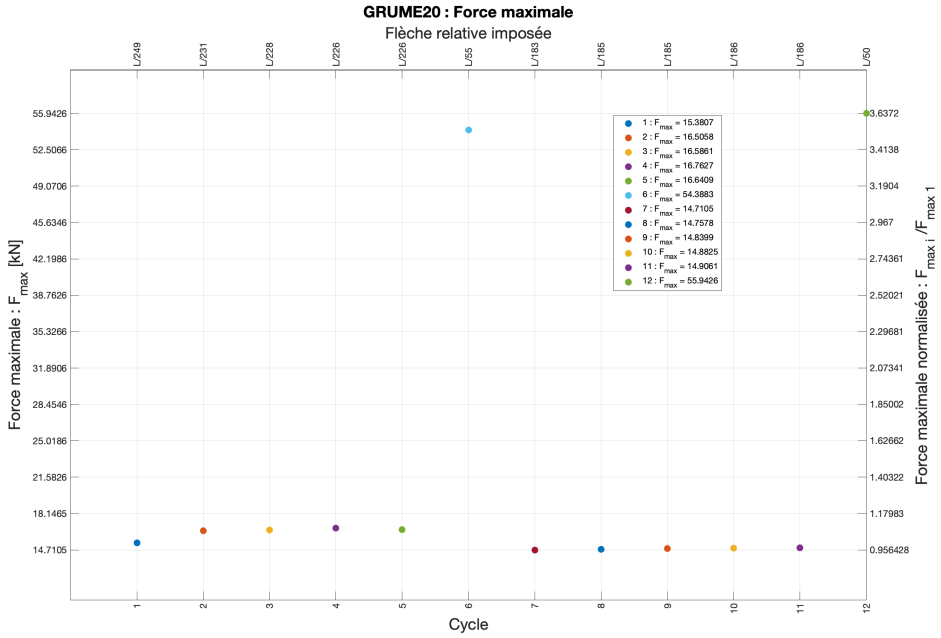


FIGURE N.164 – Force maximale de la grume 20

Rigidité flexionnelle

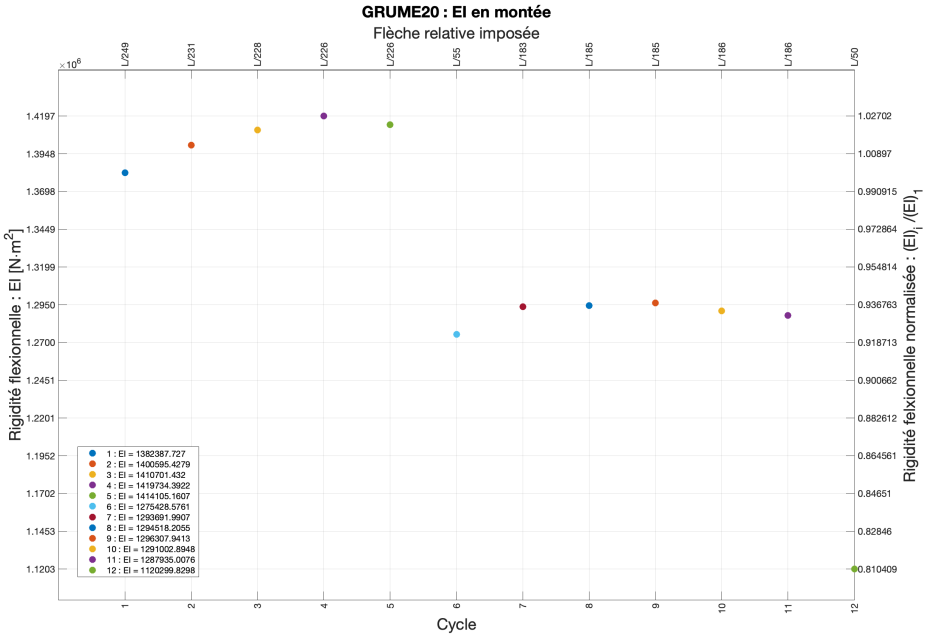


FIGURE N.165 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 20

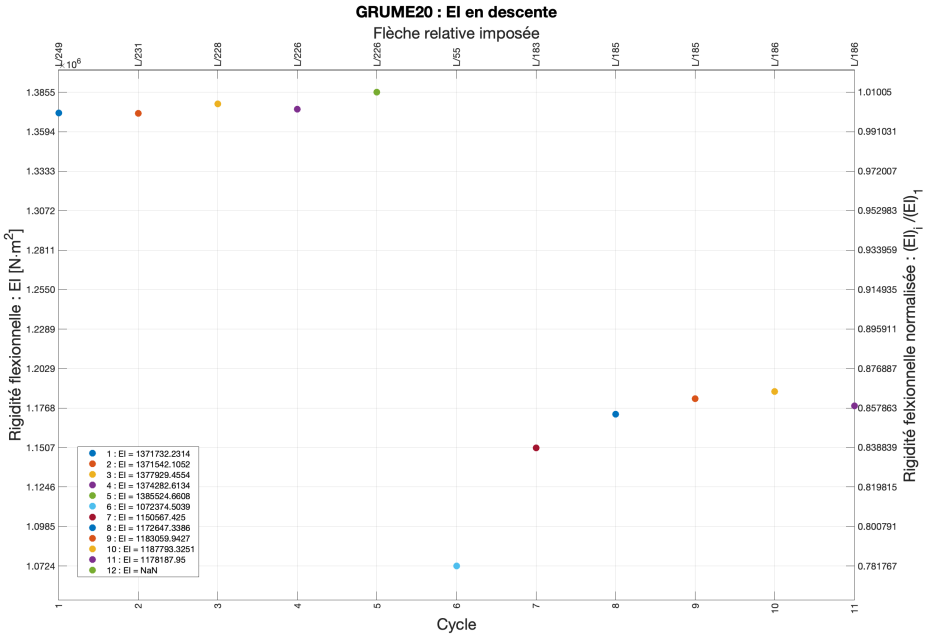


FIGURE N.166 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 20

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

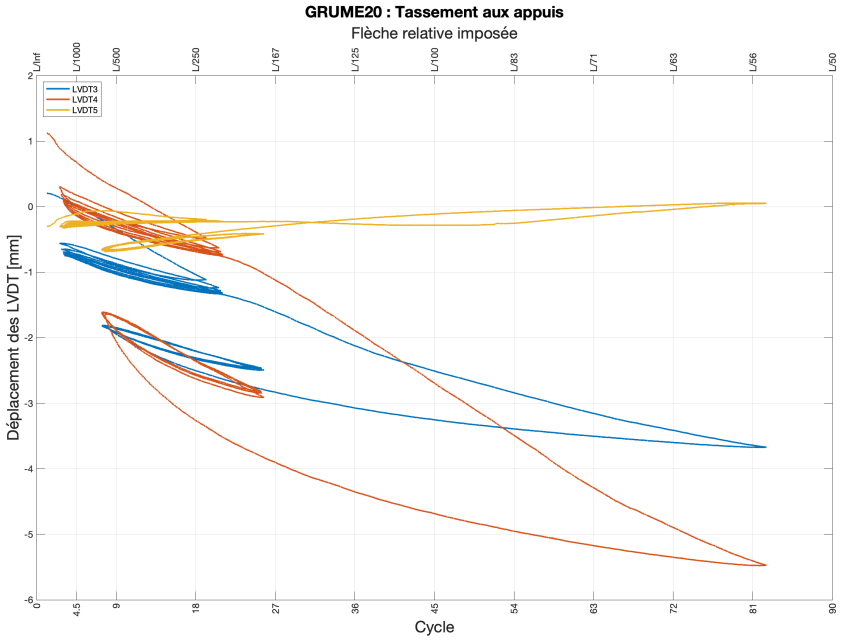


FIGURE N.167 – Tassements d'appui de la grume 20

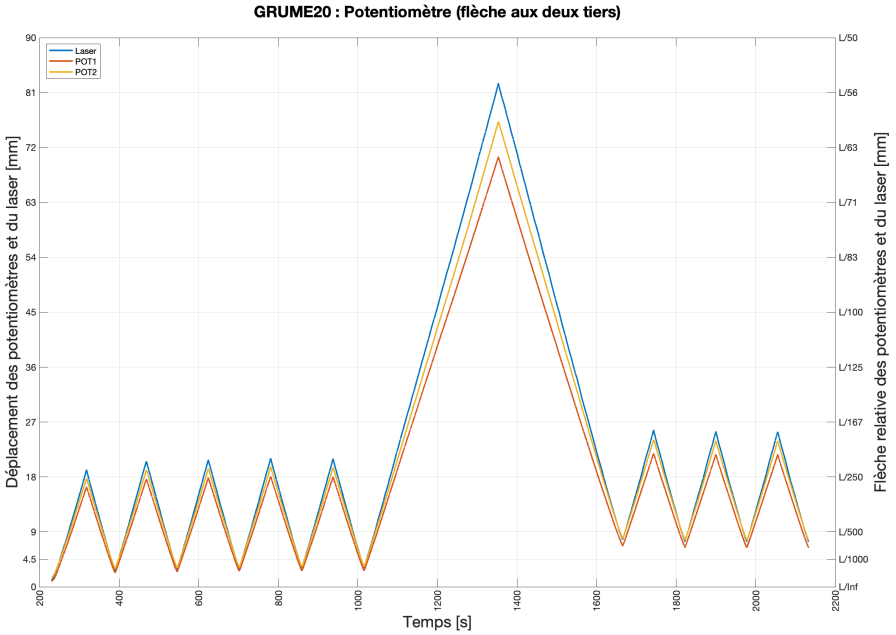


FIGURE N.168 – Flèches aux tiers de la grume 20

Grume 21

Protocole et comportement dans le temps

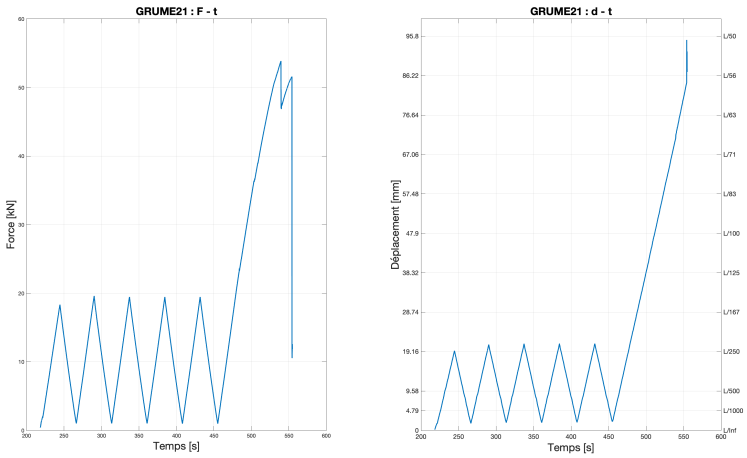


Figure N.169 – Comportement en fonction du temps de la grume 21

Global

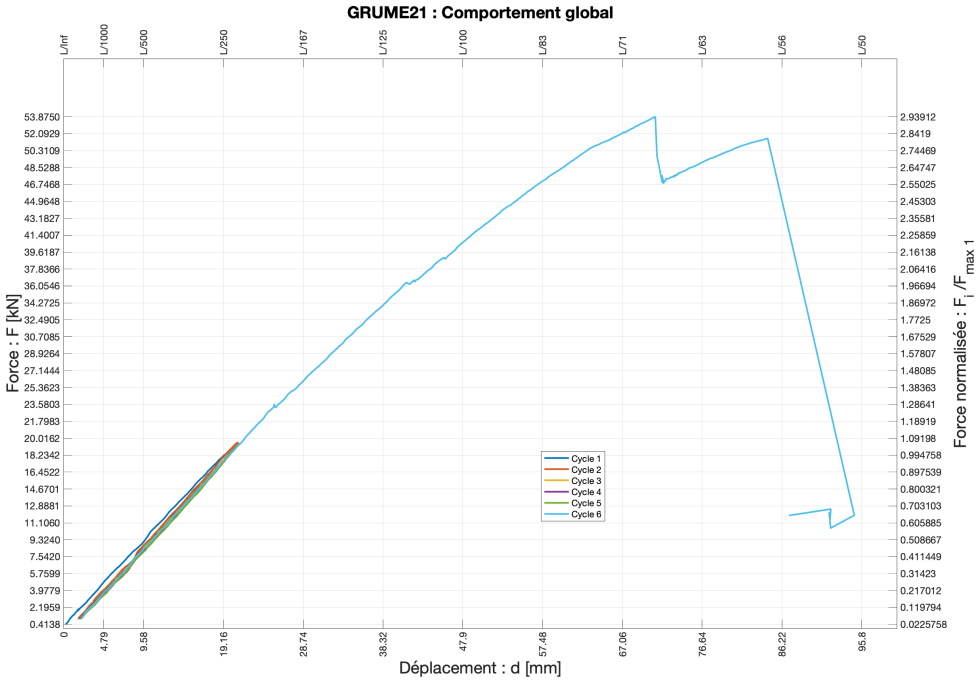


Figure N.170 – Comportement global avec, le cas échéant, les valeurs ELS et ELU de la grume 21

Déplacement résiduel

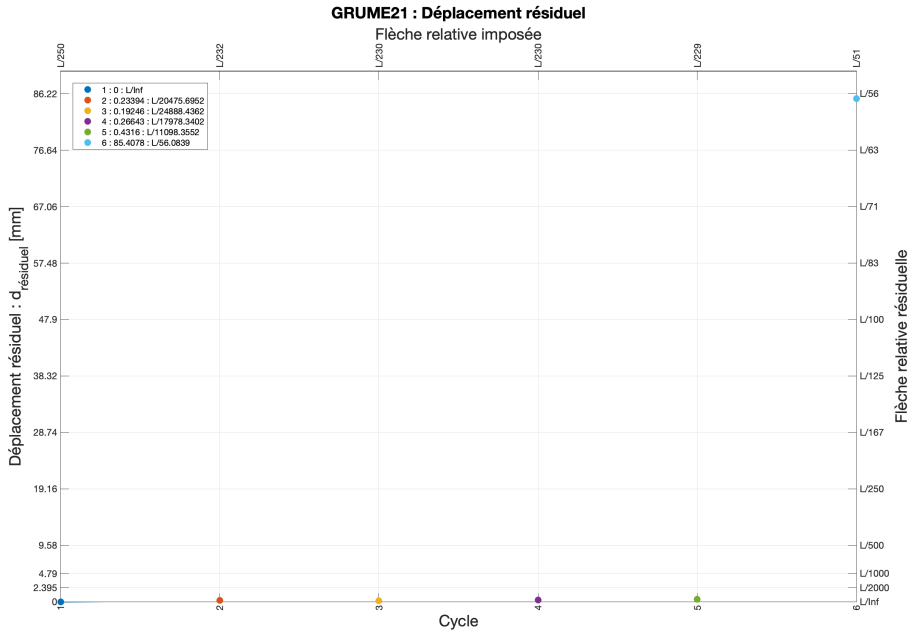


FIGURE N.171 – Déplacement résiduel de la grume 21

Force maximale

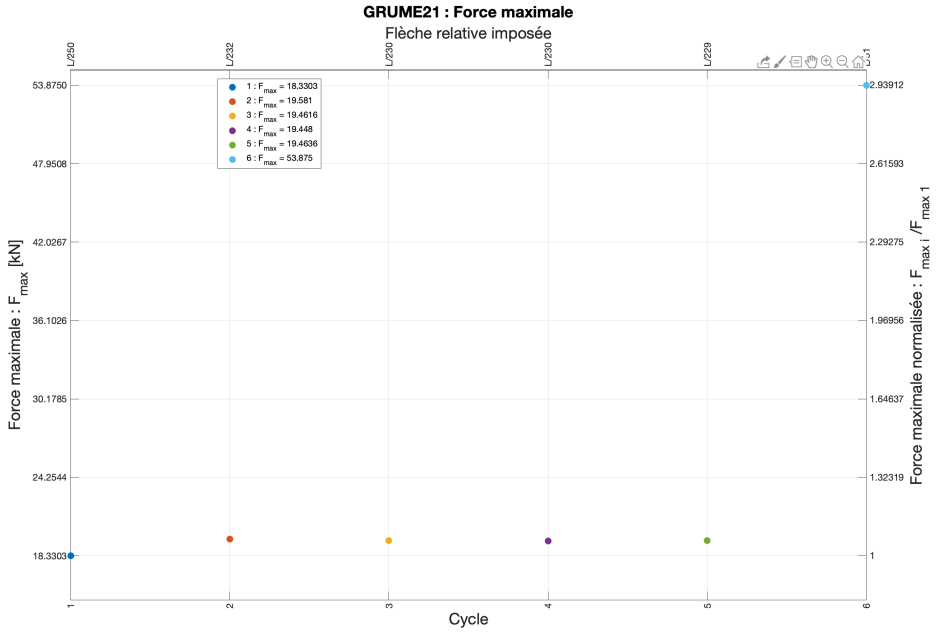


FIGURE N.172 – Force maximale de la grume 21

Rigidité flexionnelle

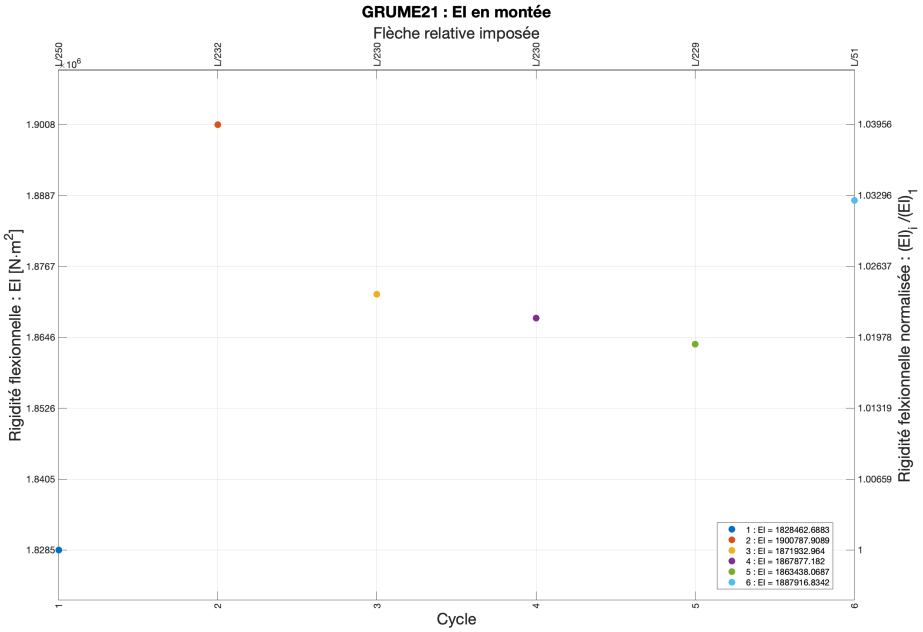


Figure N.173 – Rigidité flexionnelle en montée de la grume 21

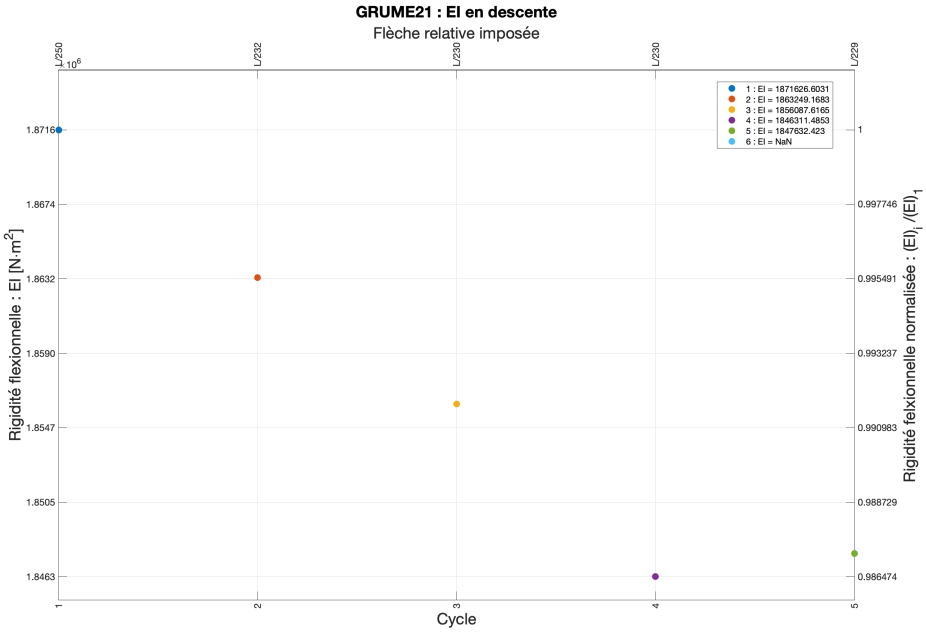


Figure N.174 – Rigidité flexionnelle en descente de la grume 21

Tassements d'appui et flèche à chaque tiers

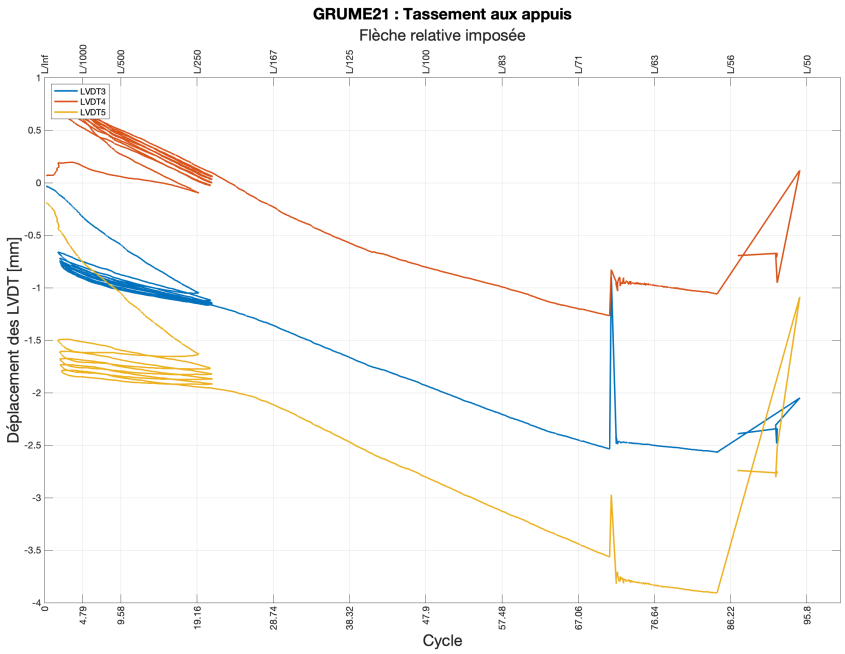


FIGURE N.175 – Tassements d'appui de la grume 21

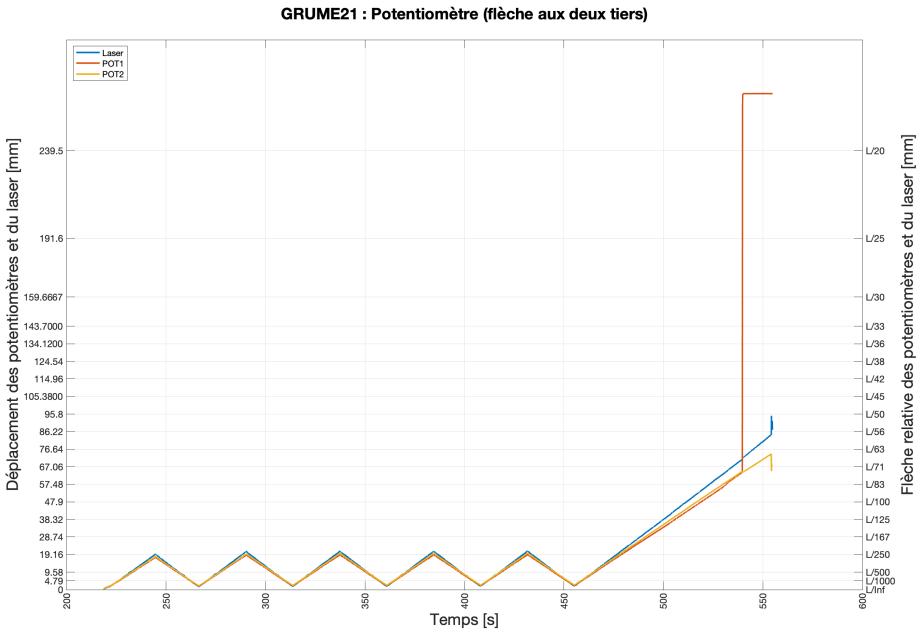


FIGURE N.176 – Flèches aux tiers de la grume 21

GLOSSAIRE

batterie ou « batterie d'essais » [1]. Ensemble d'essais effectués en vue d'un objectif précis. Dès lors, une même batterie peut contenir plusieurs séries d'essais faisant chacune varier la valeur du paramètre étudié, à l'instar des batteries 3, 4 et 7. 7, 11, 14, 36–39, 44–54, 56, 57, 59, 94

charge de rupture Synonyme de force de rupture. Charge maximale supportable par l'élément. Dès lors, il s'agit de la charge provoquant sa rupture. 6, 8

chargement Augmentation de la force appliquée sur l'échantillon. 12–14, 21, 32, 36, 40, 41, 48–50, 53–56, 58, 59, 62, 74, 86, 87, 90, 91, 94, 95

chargement cyclique Mises en charge et décharge multiples sur un même échantillon. 36, 44, 48, 49, 53, 54

chargement statique Mise en charge unique sur un échantillon. 44, 48, 50, 53, 56

comportement Réaction d'un échantillon face à une sollicitation. 10, 17, 20–25, 31, 33, 36, 37, 39, 44–48, 51, 53–55, 58, 87, 94, 96, 97

critère Condition sur une mesure. 8, 11–13, 66

descente « en descente » : Durant la décharge de l'échantillon. 38, 40, 41

déchargement Diminution de la force appliquée sur l'échantillon. 14, 21, 40, 41, 49, 50, 54, 94

déplacement imposé Position que doit atteindre le vérin avant de procéder au déchargement. 38, 46, 48, 49, 53, 54, 56, 94

déplacement résiduel (du cycle i). Synonyme de flèche résiduelle. Dans un essai, la différence de position mesurée entre les fins du cycle étudié (= cycle i) et de son premier cycle (= cycle 1). Autrement dit, il s'agit de la « déformation définitive » [2] subie par un élément de bois à la suite d'un cycle de chargement–déchargement. 39–41, 53–55, 97

ELS « État Limite de Service ». Les états limites touchant au bon fonctionnement de la structure ou des éléments présents (machines, etc.), au confort des usagers ou à l'apparence de l'ouvrage. 8, 11, 56, 58, 59, 86, 90, 91, 95

ELU « État Limite Ultime ». Les états limites touchant la protection des usagers et/ou de la structure. 8–12, 56, 58, 59, 86, 90, 95

1. Par ailleurs, l'Académie française la définit de la sorte : « Batterie de tests, série d'épreuves destinées à déterminer les traits de caractère du sujet examiné ou à déceler ses aptitudes. » [« Batterie », II., 4., Dictionnaire de l'Académie française, 9e éd., `https://www.dictionnaire-academie.fr` (29 avril 2021))].

2. Entre guillemets car *stricto sensu* il ne s'agit pas de la déformation, et elle n'est a priori pas forcément définitive. En effet, une déformation est définie en ingénierie par le quotient de la variation de longueur subie par l'élément par la longueur initiale de celui-ci. Dès lors, elle n'a pas d'unité, ce qui n'est pas notre cas. Il faut entendre déformation comme dans le sens commun, c'est-à-dire « Action de déformer, de se déformer ; altération de la forme première. » [(« Déformation », 1., Dictionnaire de l'Académie française, 9e éd., `https://www.dictionnaire-academie.fr` (29 avril 2021))]. Elle n'est pas forcément définitive puisque, comme nous le voyons dans la batterie 7, il est possible que le déplacement résiduel diminue au cours des cycles. Une déformation définitive ne pourrait se réduire.

endommagement Perte irréversible de performance mécanique, plus spécifiquement, une perte de rigidité. 13, 80

Eurocode Norme européenne d'uniformisation des méthodes de conception des constructions. 7–9, 11, 14

flèche résiduelle (du cycle i). Synonyme de déplacement résiduel. Dans un essai, la différence de position mesurée entre les fins du cycle étudié (= cycle i) et de son premier cycle (= cycle 1). Autrement dit, il s'agit de la « déformation définitive »[2] subie par un élément de bois à la suite d'un cycle de chargement–déchargement. 54

force de rupture Synonyme de charge de rupture. Force maximale supportable par l'élément. Dès lors, il s'agit de la force provoquant sa rupture. 8, 36, 37

force maximale Force la plus importante développée sur un cycle de chargement – déchargement. Généralement, elle correspond à la force liée au déplacement imposé sur le cycle. 10, 39, 41, 54–56, 86, 90, 95

FSP « Fiber Saturation Point » : Est la teneur en eau liée maximale contenue dans le bois. 25–27, 29, 31

grume Tronc d'un arbre abattu, ébranché et écorcé[3]. 4–7, 9–14, 16, 18, 27, 29–34, 36, 44, 45, 50, 56, 62–69, 71–78, 80–83, 86–92, 94–98

inertie par métonymie de « moment d'inertie » [Studer M.-A. et Frey F., Introduction à l'analyse des structures, P.P.U.R., éd. 1, Lausanne, 2017, p. 171]. 3, 9, 10, 44, 73, 74, 94, 96

mesure Prise d'une information lors de l'expérience d'un phénomène physique. 12, 13, 24, 73, 80–83

montée «en montée » : Durant la mise en charge de l'échantillon. 40, 41, 91

palier (de déplacement imposé/flèche relative imposée). Position ultime atteinte par le vérin contrôlé en déplacement lors de plusieurs cycles de chargement–déchargement consécutifs.[4] Par exemple, dans la troisième batterie, nous imposons au vérin d'effectuer 5 cycles jusqu'au palier de flèche relative $l/125$. 48, 54–56, 86, 94

3. En lisant la définition de l'Académie française (`https://www.dictionnaire-academie.fr`) et en se renseignant sur l'étymologie du mot grume, nous remarquons qu'il ne fait absolument aucun sens de dire qu'il s'agisse d'un tronc écorcé. En effet, grume désigne normalement l'écorce d'un bois et par métonymie elle signifie le tronc dont l'écorce est encore présente. La définition donnée perd alors l'essence même du mot. Cependant, les essais ne se réalisent que sur des grumes qui auront été écorcées. Finalement, inclure la disparition de l'écorce dans la définition même économise un nombre conséquent de répétitions.

4. Ce terme a été choisi pour exprimer qu'il est procédé à une montée par étape du chargement pour au final atteindre la rupture. En lisant la définition de l'Académie française, cela coule de sens : « Se dit de manière plus générale de chacune des étapes qu'on marque dans un mouvement ascendant ou descendant. La remontée d'un plongeur sous-marin s'effectue par paliers. Vol en palier. » [« Palier », 2., 2e point, Dictionnaire de l'Académie française, 9e éd., `https://www.dictionnaire-academie.fr` (29 avril 2021))].

plasticité Domaine de déplacement sous charge d'un matériau provoquant une déformation irréversible, même quand la charge est enlevée. xi, 10, 21, 53, 54, 58, 88–90, 94

schéma rhéologique Modèle simple étudiant le comportement et la déformation des corps sous l'effet de contraintes, en particulier la viscosité et la plasticité [5]. 22

élasticité Domaine de déplacement sous charge d'un matériau ne provoquant pas de déformation irréversible une fois la charge enlevée. 10

état limite Situation extrême selon laquelle une structure peut être sollicitée d'une certaine manière. 8

5. [« Rhéologie », Dictionnaire de l'Académie française, 9e éd., `https://www.dictionnaire-academie.fr` (8 juin 2021))].

BIBLIOGRAPHIE

[1] DIN 4074-2 :1958. *Building Timber for Wood Building Components - Quality Conditions for Building Logs (Sofwood)*. Deutschen Normenausschusses, Berlin, 1958.

[2] NBN EN 1310 :1997. *Bois ronds et bois sciés - Méthode de mesure des singularités*. Bureau de Normalisation, Bruxelles, 1997.

[3] NBN EN 1311 :1997. *Bois ronds et bois sciés - Méthode de mesure des altérations biologiques*. Bureau de Normalisation, Bruxelles, 1997.

[4] NZS 3605 :2001. *Timber Piles and Poles for Use in Building*. New Zealand, 2001.

[5] NBN EN 13183 - 1 :2002. *Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 1 : Détermination par la méthode de dessiccation*. Bureau de Normalisation, Bruxelles, 2002.

[6] NBN EN 1990 :2002. *Basis of structural design*. Bureau de Normalisation, Bruxelles, 2002.

[7] NBN EN 14251 :2004. *Bois de structure rond - Méthodes d'essai*. Bureau de Normalisation, Bruxelles, 2004.

[8] NBN EN 1927-1 :2008. *Classement qualitatif des bois ronds résineux - Partie 1 : Epicéas et sapins*. Bureau de Normalisation, Bruxelles, 2008.

[9] DIN 1052 :2012. *Étude, calcul et dimensionnement des ouvrages en bois*. Deutschen Normenausschusses, Berlin, 2012.

[10] NBN EN 408+A1 :2012. *Structure en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques*. Bureau de Normalisation, Bruxelles, 2012.

[11] NBN EN 14358 :2016. *Structure en bois - Détermination et vérification des valeurs caractéristiques*. Bureau de Normalisation, Bruxelles, 2016.

[12] NBN EN 384 :2016 + A1 :2018. *Structure en bois - Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique*. Bureau de Normalisation, Bruxelles, 2016.

[13] NBN EN 844 :2019. *Bois ronds et bois sciés - Terminologie*. Bureau de Normalisation, Bruxelles, 2019.

[14] L Benabou. *Mécanique des solides déformables*. 2013. URL : `http://mecaweb.free.fr/?Le_Materiau_Bois:Proprietes_du_Bois`.

[15] Guillaume Cousseau. *Impact des éclaircies tardives sur le risque de roulures dans les taillis de chataignier*. URL : `https://docplayer.fr/81659996-Impact-des-eclaircies-tardives-sur-le-risque-de-roulures-dans-les-taillis-de-chataignier.html`.

[16] G. Dadoun, A. Kiffer et J. Moreau. *Principales méthodes de stockage des grumes*. 2009, p. 1-57. URL : `http://www.fibaquitaine.fr/documents/1234517256.pdf`.

[17] *Ecorcage des bois*. URL : `http://foretvirtuelle.com/Travaux-Pratiques/Ecorcage-des-bois.php`.

[18] Younes Faidy. *Classement pour la résistance mécanique du chêne par méthodes vibratoires et par mesure des orientations des fibres*. 2018, p. 1-153.

[19] A. Fanck. « Viscoelasticity and dynamic mechanical testing ». In : *TA Instruments Germany*.

[20] Lionnel Ferry. *Galerie de photos de Lionel Ferry (SHNA-rdennes) : champignons des Ardennes*. URL : https://lionel-ferry-mycologie.piwigo.com/picture?/291/search/1462.

[21] Jean-Luc Flot et Pierre Vautherin. « Des stocks de bois à conserver en forêt ou hors forêt ». In : *Revue Forestière Française* 54 (2002), p. 136-144. URL : http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/4998/136_144.pdf?sequence=1.

[22] S Gardet, M Chertien et C Martinez. « Expérimentation et valorisation de l'utilisation de bois locaux comme solution de fondation et de renforcement des sols ». In : *Congrès Français de Mécanique 21* (2013), p. 1-6.

[23] C C Gerhards. « Effect of Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood : An Analysis of Immediate Effects ». In : *Wood and Fiber* 14.1 (1982).

[24] Samuel L Glass Samuel V ; Zelinka. « Wood Handbook, Chapter 04 : Moisture Relations and Physical Properties of Wood ». In : *Wood handbook : wood as an engineering material*. GTR-190. 2010, p. 1-19. URL : http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/37428.

[25] David W. Green, Jerrold E. Winandy et David E. Kretschman. « Mechanical Properties of Wood ». In : *Wood handbook : wood as an engineering material*. 1999, p. 4–1–4-45. DOI : 10.1557/proc-546-213.

[26] Guy Helsing et R D Graham. *Saw Kerfs Reduce Checking and Prevent Internal Decay in Pressure-treated Douglas-fir Poles*)*. Rapp. tech.

[27] W. E. Hillis et A. N. Rozsa. « The Softening Temperatures of Wood ». In : *Holzforschung* (1978). ISSN : 1437434X. DOI : 10.1515/hfsg.1978.32.2.68.

[28] Bertrand Himmer et Emmanuel Rouard. *Application structurale du hêtre modifié thermiquement : étude de faisabilité*. 2018.

[29] David N.-S Hon et Nian-Hua -H Ou. « Thermoplasticization of wood. I. Benzylation of wood ». In : *Journal of Polymer Science Part A : Polymer Chemistry* (1989). ISSN : 10990518. DOI : 10.1002/pola.1989.080270725.

[30] Hout Info Bois. *Bois - guide pour le bon usage*. 2012.

[31] Ecole des Mines d'Albi Camaux IMT. *Au coeur des matériaux cristallins*. URL : https://nte.mines-albi.fr/SciMat/co/SM6uc1-2.html.

[32] Jiali Jiang et al. « Influence of frequency on wood viscoelasticity under two types of heating conditions ». In : *Drying Technology* (2010). ISSN : 07373937. DOI : 10.1080/07373937.2010.485084.

[33] Y Joliff. *Propriétés mécaniques des matériaux*. URL : https://slideplayer.fr/slide/13569537/.

[34] Stephen S. Kelley, Timothy G. Rials et Wolfgang G. Glasser. « Relaxation behaviour of the amorphous components of wood ». In : *Journal of Materials Science* (1987). ISSN : 00222461. DOI : 10.1007/BF01160778.

[35] Ogün Korkmaz et Ümit Büyüksari. « Effects of moisture content on mechanical properties of micro-size oak wood ». In : *BioResources* 14.4 (2019), p. 7655-7663. ISSN : 19302126. DOI : 10.15376/biores.14.4.7655-7663.

[36] Maria Fernanda Laguarda Mallo, Omar Espinoza et Robert Erickson. « Green Kerfing Treatment for Improving Softwood Lumber Drying : A Review ». In : *Drying Technology* 32.5 (2014), p. 606-613. ISSN : 15322300. DOI : 10.1080/07373937.2013.852107.

[37] Debra Larson, Richard Mirth et Ronald Wolfe. « Evaluation of small-diameter ponderosa pine logs in bending ». In : 54.9689 (2004), p. 52-58.

[38] Debra Larson, Richard Mirth et Ronald Wolfe. *Evaluation of small-diameter ponderosa pine logs in bending*. Rapp. tech.

[39] Pierre Latteur. « Partie 1 : Le matériau bois ». In : *Structures en bois*. 2020, p. 1-102.

[40] *Le guide de la maison*. URL : https://www.leguidedelamaison.com/savoir/460/269-de-l-arbre-a-la-menuiserie-histoire-de-debits.htm.

[41] Christopher A. Lenth et Frederick A. Kamke. « Moisture dependent softening behavior of wood ». In : *Wood and Fiber Science* (2001). ISSN : 07356161.

[42] Pei Ying Liu et Zhi Hong Jiang. « The dynamic viscoelastic behavior of wood-plastic composites ». In : *Advanced Materials Research*. 2013. ISBN : 9783037858707. DOI : 10.4028/www.scientific.net/AMR.815.639.

[43] LMI Technologies. *Chroma+scan*. URL : https://lmi3d.com/brand/chroma-scan/.

[44] Jean Bosco Mbagou. *Variabilité intro-arbre des propriétés physico-mécaniques et chimiques du tessmania africana en provenance du gabon*. 2017.

[45] David Nicholls et Allen Brackley. « House log drying rates in southeast Alaska for covered and uncovered softwood logs ». In : *USDA Forest Service - General Technical Report PNW-GTR* (2009). ISSN : 08874840. DOI : 10.2737/PNW-GTR-782.

[46] Michela Nocetti, Michele Brunetti et Martin Bacher. « Effect of moisture content on the flexural properties and dynamic modulus of elasticity of dimension chestnut timber ». In : *European Journal of Wood and Wood Products* 73.1 (2014), p. 51-60. ISSN : 1436736X. DOI : 10.1007/s00107-014-0861-1.

[47] Laura Oltean, Alfred Teischinger et Christian Hansmann. *Temperature and cracking of wood*. Rapp. tech. 4. 2007, p. 789-811.

[48] M. Öner et Ý. Deveci Kocakoç. « JMASM 49 : A Compilation of Some Popular Goodness of Fit Tests for Normal Distribution : Their Algorithms and MATLAB Codes (MATLAB), 16(2), 30 ». In : *Journal of Modern Applied Statistical Methods* (2017).

[49] Patrick Perrée, François Thiercelin et Osmar Aguiar-Embrapa. « Prototype high temperature/high pressure kiln for the evaluation of wood drying schedules ». In : *Drying Technology*. T. 18. 8. Marcel Dekker Inc, 2000, p. 1849-1863. doi : 10.1080/07373930008917814.

[50] Vincent Placet, Joëlle Passard et Patrick Perré. « Viscoelastic properties of green wood across the grain measured by harmonic tests in the range 0-95°C : Hardwood vs. softwood and normal wood vs. reaction wood ». In : *Holzforschung* (2007). issn : 00183830. doi : 10.1515/HF.2007.093.

[51] *PréfaBOIS wood building team*. url : https://www.prefabois.be/accord-prefabois-perpetum.html.

[52] Michael H. Ramage et al. « The wood from the trees : The use of timber in construction ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 (fév. 2017), p. 333-359. issn : 13640321. doi : 10.1016/j.rser.2016.09.107. url : https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116306050.

[53] Alpo Ranta-Maunus. « Round small-diameter timber for construction : Final report of project FAIR CT 95-0091 ». In : *VTT Publications* 383 (1999). issn : 12350621.

[54] Alpo Ranta-Maunus. « Round small-diameter timber for construction : Final report of project FAIR CT 95-0091 ». In : *VTT Publications* (1999). issn : 12350621.

[55] Hadrien Rattez. *Mécanique des matériaux structuraux et géomatériaux : Comportemets différés dans le temps*. 2021.

[56] Renouvelle. *Pairi Daiza construit le plus grand parking photovoltaïque au monde*. url : https://www.renouvelle.be/fr/pairi-daiza-construit-le-plus-grand-parking-photovoltaique-au-monde/.

[57] Ritter et Michael A. « Chapter 3 : Properties of Wood and Structural Wood Products ». In : *Timber Bridges : Design, Construction, Inspection, and Maintenance* (1990). url : http://www.dot.state.mn.us/bridge/pdf/insp/USFS-TimberBridgeManual/em7700%7B%5C_%7D8%7B%5C_%7Dchapter03.pdf.

[58] Lennart Salmén. « Viscoelastic properties of in situ lignin under water-saturated conditions ». In : *Journal of Materials Science* (1984). issn : 00222461. doi : 10.1007/BF01026988.

[59] TTT. Products. *TTTested - Proof-testing*. url : https://www.unilog.co.nz/product-11-tttested--proof-testing.

[60] Université de Lille. *Les âges de la vie*. url : https://varilangues.univ-lille3.fr/node/326.

[61] Joffrey Viguier. « Classement mécanique des bois de structure. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique ». In : (2015).

[62] Xinzhou Wang et al. « Contributions of basic chemical components to the mechanical behavior of wood fiber cell walls as evaluated by nanoindentation ». In : *BioResources* (2016). issn : 19302126. doi : 10.15376/biores.11.3.6026-6039.

[63] *WholesTrees Structures*. url : https://wholetrees.com/portfolio/.

[64] Ronald Wolfe et Cassandra Moseley. « Small-diameter log evaluation for value-added structural applications ». In : *Forest Products Journal* (2000). issn : 00157473.

[65] X. « Viscoelastic Behaviour of Polymers ». In : *Physicochemical Behavior and Supramolecular Organization of Polymers*. 2009, p. 43-162. doi : 10.1007/978-1-4020-9372-2_2.

[66] R Younes. *Le bois et les mousses*.

[67] Rune Ziethén. « Reliability of proof-loaded Norway spruce ». In : *Holz als Roh - und Werkstoff* 66.6 (2008), p. 401-408. issn : 00183768. doi : 10.1007/s00107-008-0253-5.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain
Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/epl**