

# Mécanisme d'entretien d'un pendule de Foucault par lames flexibles

Travail de Bachelor

Département TIN  
Filière Microtechniques  
Orientation Mécatronique

Evan Rochat

26 juillet 2024

Supervisé par :  
Prof. Y. Chevallier (HEIG-VD)



# Préambule

Ce travail de Bachelor (ci-après : "**TB**") est réalisé en fin de cursus d'études, en vue de l'obtention du titre de Bachelor of Science HES-SO en Ingénierie.

En tant que travail académique, son contenu, sans préjuger de sa valeur, n'engage ni la responsabilité de l'auteur, ni celle du jury du travail de Bachelor et de l'École.

Toute utilisation, même partielle, de ce TB doit être faite dans le respect du droit d'auteur.

HEIG-VD  
Le Chef du Département

Yverdon-les-Bains, le 26 juillet 2024



# Authentification

Je soussigné, Evan Rochat, atteste par la présente avoir réalisé seul ce travail et n'avoir utilisé aucune autre source que celles expressément mentionnées.

Evan Rochat

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Evan Rochat".

Yverdon-les-Bains, le 26 juillet 2024



# Remerciements

Je souhaite remercier tout d'abord le professeur Yves Chevallier de m'avoir permis de réaliser ce travail de Bachelor. Son soutien et ses conseils m'ont été précieux tout au long de ce projet.

Je remercie également l'ensemble des collaborateurs technique de la HEIG-VD pour leur aide et leur disponibilité. En particulier Monsieur Christophe Maendly pour ses conseils et la réalisation des échantillons du câbles sertis. Monsieur David Bovet pour son aide pour la découpe laser des clinquants Inox pour la maquette. Ou encore Monsieur Adrien Cardinale pour son aide et sa disponibilité pour les multiples accès au toit de la HEIG-VD ainsi que pour nos échanges sur le Pendule de Foucault.

Et finalement je tiens à remercier Monsieur Florent Cosandier d'avoir fait le déplacement à la HEIG-VD pour répondre à mes questions et de m'avoir fait part de son expertise quant à la réalisation d'éléments flexibles.



# Résumé

Ce travail de Bachelor se concentre sur la modification du mécanisme d'entretien du Pendule de Foucault de la HEIG-VD. Le mécanisme actuel n'est pas optimal et doit être remplacé par un système plus fiable et robuste. L'aspect principal de ce travail est l'implémentation de guidages flexibles dans le mécanisme d'entretien du pendule. Les guidages flexibles permettent de réduire les frottements et les perturbations du système. Ce sont des éléments qui se déforment sous l'effet d'une force et qui reviennent à leur position initiale une fois la force disparue.

En parallèle de l'implémentation des guidages flexibles, le câble de suspension du pendule doit être modifié pour pouvoir retirer le système à couteaux croisés qui conduit à une anisotropie du système. Le but est donc de tester la proposition de Georges Derron qui consiste à utiliser un câble à section variable pour éviter que le fil ne casse après quelques heures d'utilisation.

\*\*

This Bachelor's thesis focuses on the modification of the maintenance mechanism of the Foucault Pendulum of the HEIG-VD. The current mechanism is not optimal and needs to be replaced by a more reliable and robust system. The main aspect of this work is the implementation of compliant elements in the pendulum maintenance mechanism. Compliant elements reduce friction and disturbance to the system. They are elements that deform under the effect of a force and return to their initial position once the force has disappeared.

In parallel with the implementation of the flexible guides, the pendulum suspension cable needs to be modified so that the cross-knife system, which leads to anisotropy in the system, can be removed. The aim is to test Georges Derron's proposal to use a cable with a variable cross-section to prevent the wire breaking after few hours of use.



# Table des matières

<b>Préambule</b>	<b>i</b>
<b>Authentification</b>	<b>iii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>v</b>
<b>Résumé</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Pendule de Foucault . . . . .	1
1.1.1 Historique . . . . .	1
1.1.2 Calculs théoriques . . . . .	2
1.1.3 Le Pendule de Foucault de la HEIG-VD . . . . .	5
1.2 Guidages flexibles . . . . .	6
<b>2 Cahier des charges</b>	<b>7</b>
2.1 Analyse des besoins . . . . .	7
2.2 Fonctions et exigences du système . . . . .	8
2.2.1 Fonctions de service . . . . .	8
2.2.2 Fonctions techniques . . . . .	9
2.2.3 Fonctions de contrainte . . . . .	9
2.3 Exigences . . . . .	9
<b>3 État de l'art</b>	<b>11</b>
3.1 Mécanismes à guidages flexibles . . . . .	11
3.1.1 Tables à cols . . . . .	11
3.1.2 Tables à lames parallèles . . . . .	11
3.1.3 Bras de Sarrus . . . . .	12
3.1.4 Machine d'exercice à force pratiquement constante . . . . .	12
3.1.5 Mécanisme à raideur quasi-nulle . . . . .	13
3.1.6 Mécanisme à raideur variable . . . . .	13
3.1.7 4-RCC . . . . .	14
<b>4 Catalogue de solutions</b>	<b>15</b>
4.1 Actionneur dZ . . . . .	15
4.2 Câble à section variable . . . . .	16
4.3 Mécanismes à guidages flexibles . . . . .	17
4.3.1 Options de structure flexible . . . . .	17

## TABLE DES MATIÈRES

<b>5 Choix de solutions</b>	<b>21</b>
5.1 Actionneur dz . . . . .	21
5.2 Câble à section variable . . . . .	21
5.3 Mécanisme à guidages flexibles . . . . .	21
<b>6 Simulation</b>	<b>23</b>
6.1 Simulation BCM sur DAS-2D . . . . .	23
<b>7 Conception</b>	<b>27</b>
7.1 Câble à section variable . . . . .	27
7.2 Maquette . . . . .	28
7.3 Prototype bistable . . . . .	29
7.4 Implémentation finale . . . . .	30
7.4.1 Système bistable . . . . .	30
7.4.2 Guidage flexible linéaire . . . . .	31
7.4.3 Moteur linéaire . . . . .	33
7.4.4 Système de réglage . . . . .	34
7.4.5 Butée . . . . .	35
7.4.6 Ancrage du câble . . . . .	35
<b>8 Mesures</b>	<b>37</b>
8.1 Maquette en compression . . . . .	37
8.2 Câble à section variable . . . . .	39
8.2.1 Traction jusqu'à rupture . . . . .	40
8.2.2 Traction cyclique . . . . .	40
8.3 Ellipticité du Pendule de Foucault . . . . .	48
8.3.1 Ellipticité, théorie . . . . .	49
8.3.2 Mesures position x-y . . . . .	49
8.3.3 Mesure ellipticité et angle de l'orientation de l'ellipse . . . . .	51
8.4 Prototype bistable . . . . .	53
<b>9 Conclusion</b>	<b>57</b>
9.1 Câble à section variable . . . . .	57
9.2 Maquette . . . . .	57
9.3 Prototype bistable . . . . .	57
9.4 Implémentation finale . . . . .	58
<b>Appendices</b>	<b>63</b>
<b>A Mises en plan</b>	<b>63</b>
A.1 Échantillon sertissage . . . . .	63
A.2 Support monobloc . . . . .	65
A.3 Maquette V1 . . . . .	67
A.4 Prototype bistable . . . . .	69
A.5 Implémentation finale . . . . .	78
<b>B Mesures</b>	<b>83</b>
B.1 Maquette en compression . . . . .	83
B.2 Échantillons de sertissage . . . . .	86
B.2.1 Traction cyclique . . . . .	86
B.3 Mesures du Pendule de Foucault . . . . .	111

*TABLE DES MATIÈRES*

B.3.1 Ellipticité . . . . .	124
<b>C Divers</b>	<b>131</b>
C.1 Fiche fournisseur CuBe2 . . . . .	131
C.2 Journal de Travail . . . . .	134
C.3 Planning . . . . .	138

# Table des figures

1.1	Schéma du Pendule de Foucault . . . . .	2
1.2	Position théorique du pendule de Foucault en xy . . . . .	4
1.3	Position théorique du pendule de Foucault dans l'espace . . . . .	4
1.4	Assemblage éclaté du Pendule de Foucault de la HEIG-VD . . . . .	5
1.5	Vue en coupe de l'assemblage 3D du Pendule de la HEIG-VD . . . . .	5
1.6	Photo du pivot à flexion monolithique "papillon" . . . . .	6
2.1	Diagramme de cas d'utilisation . . . . .	8
3.1	Tables à cols [Hen00] . . . . .	11
3.2	Table à quatres lames parallèles [Hen00] . . . . .	12
3.3	Bras de Sarrus proposé par F. Cosandier [Cos13] . . . . .	12
3.4	Mécanisme à force constante, extrait du brevet US7060012B2 [HM04]	13
3.5	Mécanisme à raideur quasi-nulle [Zho+20] . . . . .	13
3.6	Photographies des mécanismes OCF et OCT . . . . .	14
3.7	Mécanisme 4-RCC [Tis+22] . . . . .	14
4.1	Options actionneur dZ . . . . .	15
4.2	Options de raccord pour câbles Ø3 et Ø1 mm . . . . .	16
4.3	Options de structure flexible . . . . .	17
4.4	Options de pivots à deux lames pour configurations Sarrus . . . . .	18
4.5	Options de systèmes à angle réglable . . . . .	18
4.6	<b>B9.3 - B9.6</b> Options de systèmes à angle fixe . . . . .	18
4.7	<b>B9.7</b> Option de système à angle fixe et lames continues . . . . .	19
5.1	Moteur linéaire (version actuelle) . . . . .	21
5.2	Assemblage des câbles sertis . . . . .	21
6.1	Modélisation du mécanisme à raideur quasi-nulle . . . . .	24
6.2	Simulations <i>DAS-2D</i> v0.8 . . . . .	25
6.3	Graphique de la simulation du mécanisme à raideur quasi-nulle . . . . .	25
6.4	Graphique de la simulation analytique et résultats expérimentaux . . . . .	25
7.1	Modélisation du mécanisme d'entretien adapté . . . . .	27
7.2	Modélisation de la maquette V1, vue isométrique . . . . .	28
7.3	Modélisation de la maquette V1, vue de coupe . . . . .	28
7.4	Modélisation du prototype bistable . . . . .	29
7.5	Modélisation de l'implémentation finale . . . . .	30
7.6	Modélisation du système bistable de l'implémentation finale . . . . .	30
7.7	Modélisation du guidage flexible linéaire de l'implémentation finale . . . . .	31

## TABLE DES FIGURES

7.8	Simulation FEM du guidage flexible . . . . .	32
7.9	Simulation FEM du guidage flexible . . . . .	32
7.10	Modélisation de l'implémentation finale du moteur linéaire . . . . .	33
7.11	Modélisation du système de réglage de l'implémentation finale . . . . .	34
7.12	Modélisation de la butée de l'implémentation finale . . . . .	35
7.13	Modélisation de l'ancrage du câble de l'implémentation finale . . . . .	35
8.1	Installation de la maquette pour mesures en compression . . . . .	37
8.2	Force en fonction de la Course . . . . .	38
8.3	Force en fonction de la Course, 2 <sup>e</sup> boucle . . . . .	38
8.4	Force et Raideur en fonction du Temps, 2 <sup>e</sup> boucle . . . . .	39
8.5	Échantillons 1,2,3 . . . . .	40
8.6	Tests de traction jusqu'à rupture, échantillons 1, 2 et 3 . . . . .	40
8.7	Échantillons 4,5,6 . . . . .	41
8.8	Échantillon 4-3, Force en fonction du Déplacement . . . . .	42
8.9	Échantillon 4-3, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	42
8.10	Échantillon 4-4, Force en fonction du Déplacement . . . . .	43
8.11	Échantillon 4-4, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	43
8.12	Échantillon 4-11, Force en fonction du Déplacement . . . . .	44
8.13	Échantillon 4-11, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	44
8.14	Échantillon 5-1, Force en fonction du Déplacement . . . . .	45
8.15	Échantillon 5-1, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	46
8.16	Échantillon 5-4, Force en fonction du Déplacement . . . . .	46
8.17	Échantillon 5-4, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	47
8.18	Localisation de la caméra sur le mécanisme d'entretien du pendule .	48
8.19	Ellipse [Bac+15] . . . . .	49
8.20	Mesure x-y du pendule à couteaux croisés . . . . .	50
8.21	Mesure x-y du pendule à câble à section variable . . . . .	50
8.22	Ellipticité du Pendule de Foucault à couteaux croisés . . . . .	51
8.23	Ellipticité du Pendule de Foucault à câble à section variable . . . . .	51
8.24	Simulation de la déformation de la planche de fixation . . . . .	52
8.25	Ellipticité moyenne par jour . . . . .	52
8.26	Mesure du prototype bistable . . . . .	53
8.27	Mesure de la force en fonction de la course du prototype bistable .	54
8.28	Déformation aléatoire des lames lors de la compression . . . . .	55
B.1	Force en fonction du Temps . . . . .	83
B.2	Force en fonction de la Course . . . . .	84
B.3	Force en fonction du Temps, 1 <sup>re</sup> boucle . . . . .	84
B.4	Force en fonction du Temps, 2 <sup>e</sup> boucle . . . . .	85
B.5	Force et Raideur en fonction du Temps, 2 <sup>e</sup> boucle . . . . .	85
B.6	Échantillon 4-1, Force en fonction du Déplacement . . . . .	86
B.7	Échantillon 4-1, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	86
B.8	Échantillon 4-2, Force en fonction du Déplacement . . . . .	87
B.9	Échantillon 4-2, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	87
B.10	Échantillon 4-3, Force en fonction du Déplacement . . . . .	88
B.11	Échantillon 4-3, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	88
B.12	Échantillon 4-4, Force en fonction du Déplacement . . . . .	89
B.13	Échantillon 4-4, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	89
B.14	Échantillon 4-5, Force en fonction du Déplacement . . . . .	90

## TABLE DES FIGURES

B.15 Échantillon 4-5, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	90
B.16 Échantillon 4-6, Force en fonction du Déplacement . . . . .	91
B.17 Échantillon 4-6, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	91
B.18 Échantillon 4-7, Force en fonction du Déplacement . . . . .	92
B.19 Échantillon 4-7, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	92
B.20 Échantillon 4-8, Force en fonction du Déplacement . . . . .	93
B.21 Échantillon 4-8, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	93
B.22 Échantillon 4-9, Force en fonction du Déplacement . . . . .	94
B.23 Échantillon 4-9, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	94
B.24 Échantillon 4-10, Force en fonction du Déplacement . . . . .	95
B.25 Échantillon 4-10, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	95
B.26 Échantillon 4-11, Force en fonction du Déplacement . . . . .	96
B.27 Échantillon 4-11, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	96
B.28 Échantillon 5-1, Force en fonction du Déplacement . . . . .	97
B.29 Échantillon 5-1, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	97
B.30 Échantillon 5-2, Force en fonction du Déplacement . . . . .	98
B.31 Échantillon 5-2, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	98
B.32 Échantillon 5-3, Force en fonction du Déplacement . . . . .	99
B.33 Échantillon 5-3, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	99
B.34 Échantillon 5-4, Force en fonction du Déplacement . . . . .	100
B.35 Échantillon 5-4, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	100
B.36 Échantillon 5-5, Force en fonction du Déplacement . . . . .	101
B.37 Échantillon 5-5, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	101
B.38 Échantillon 5-6, Force en fonction du Déplacement . . . . .	102
B.39 Échantillon 5-6, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	102
B.40 Échantillon 5-7, Force en fonction du Déplacement . . . . .	103
B.41 Échantillon 5-7, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	103
B.42 Échantillon 5-8, Force en fonction du Déplacement . . . . .	104
B.43 Échantillon 5-8, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	104
B.44 Échantillon 5-9, Force en fonction du Déplacement . . . . .	105
B.45 Échantillon 5-9, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	105
B.46 Échantillon 5-10, Force en fonction du Déplacement . . . . .	106
B.47 Échantillon 5-10, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	106
B.48 Échantillon 5-11, Force en fonction du Déplacement . . . . .	107
B.49 Échantillon 5-11, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	107
B.50 Échantillon 5-12, Force en fonction du Déplacement . . . . .	108
B.51 Échantillon 5-12, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	108
B.52 Échantillon 5-13, Force en fonction du Déplacement . . . . .	109
B.53 Échantillon 5-13, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	109
B.54 Échantillon 5-14, Force en fonction du Déplacement . . . . .	110
B.55 Échantillon 5-14, Déplacement en fonction du Temps . . . . .	110
B.56 Mesure ancien système (22 juin 2024), Y en fonction de X . . . . .	111
B.57 Mesure ancien système (23 juin 2024), Y en fonction de X . . . . .	112
B.58 Mesure nouveau système (25 juin 2024), Y en fonction de X . . . . .	113
B.59 Mesure nouveau système (26 juin 2024), Y en fonction de X . . . . .	114
B.60 Mesure nouveau système (27 juin 2024), Y en fonction de X . . . . .	115
B.61 Mesure nouveau système (28 juin 2024), Y en fonction de X . . . . .	116
B.62 Mesure nouveau système (29 juin 2024), Y en fonction de X . . . . .	117
B.63 Mesure nouveau système (30 juin 2024), Y en fonction de X . . . . .	118
B.64 Mesure nouveau système (01 juillet 2024), Y en fonction de X . . . . .	119

*TABLE DES FIGURES*

B.65 Mesure nouveau système (02 juillet 2024), Y en fonction de X . . . . .	120
B.66 Mesure nouveau système (03 juillet 2024), Y en fonction de X . . . . .	121
B.67 Mesure nouveau système (04 juillet 2024), Y en fonction de X . . . . .	122
B.68 Mesure nouveau système (05 juillet 2024), Y en fonction de X . . . . .	123
B.69 Ellipticité (21 juin 2024), ancien système . . . . .	124
B.70 Ellipticité (22 juin 2024), ancien système . . . . .	124
B.71 Ellipticité (23 juin 2024), ancien système . . . . .	125
B.72 Ellipticité (26 juin 2024), nouveau système . . . . .	125
B.73 Ellipticité (27 juin 2024), nouveau système . . . . .	126
B.74 Ellipticité (28 juin 2024), nouveau système . . . . .	126
B.75 Ellipticité (29 juin 2024), nouveau système . . . . .	127
B.76 Ellipticité (30 juin 2024), nouveau système . . . . .	127
B.77 Ellipticité (01 juillet 2024), nouveau système . . . . .	128
B.78 Ellipticité (02 juillet 2024), nouveau système . . . . .	128
B.79 Ellipticité (03 juillet 2024), nouveau système . . . . .	129
B.80 Ellipticité (04 juillet 2024), nouveau système . . . . .	129
B.81 Ellipticité (05 juillet 2024), nouveau système . . . . .	130
B.82 Ellipticité moyenne . . . . .	130

# Liste des tableaux

1.1	Travaux de Bachelor à la HEIG-VD sur le pendule de Foucault . . . . .	2
2.1	Besoins . . . . .	8
2.2	Fonctions de service . . . . .	8
2.3	Fonctions techniques . . . . .	9
2.4	Fonctions de contrainte . . . . .	9
2.5	Exigences . . . . .	9
2.6	Exigences techniques . . . . .	9
6.1	Dimension Lames bistables . . . . .	24
6.2	Dimension Lames linéaires . . . . .	24
8.1	Paramètres des tests de traction cyclique de l'échantillon 4 . . . . .	41
8.2	Paramètres des tests de traction cyclique de l'échantillon 5 . . . . .	45
8.3	Plan d'expérience pour prototype bistable . . . . .	53

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Pendule de Foucault

Le pendule de Foucault de la HEIG-VD est un objet d'art et de science qui attire l'attention des visiteurs. Ce travail de Bachelor se concentre sur la modification de son mécanisme d'entretien. Le mécanisme actuel n'est pas optimal de part son ellipticité parasite et doit être remplacé par un système plus fiable et robuste.

Par conséquent, l'aspect principal de ce travail est l'implémentation de guidages flexibles dans le mécanisme d'entretien du pendule. Les guidages flexibles permettent de réduire significativement les frottements et les perturbations du système. Ce sont des éléments qui se déforment élastiquement sous l'effet d'une force et qui reviennent à leur position initiale une fois la force disparue.

En parallèle de l'implémentation des guidages flexibles, le câble de suspension du pendule doit être modifié pour pouvoir retirer le système à couteaux croisés qui permet de faire office de pivot à l'ancrage supérieur du câble. Ce système à couteaux croisés conduit à une anisotropie du système. Le but sera donc de tester la proposition de Georges Derron qui consiste à utiliser un câble de diamètre variable ( $\varnothing 3$  millimètres sur les 2 mètres à la fixation du câble et  $\varnothing 1$  millimètre sur la longueur restante) pour éviter que le fil ne casse après quelques heures d'utilisation.[DM10]

#### 1.1.1 Historique

J. B. Léon Foucault a démontré en 1851 que la Terre tourne sur elle même en observant le mouvement du pendule accroché à la voûte du Panthéon de Paris. Il mesurait 67 mètres et supportait un poids de 28.3 kilogrammes. [Wik24a]

Le pendule de Foucault de la HEIG-VD a été installé pour la première fois en 1995. Son mécanisme d'entretien a été modifié à plusieurs reprises pour arriver à sa version actuelle. Les travaux de Bachelor réalisés à la HEIG-VD sur le pendule de Foucault sont répertoriés dans le tableau 1.1. Son fonctionnement est détaillé dans la section 1.1.3.

Année	Travail de Bachelor
1995	Réalisation de la commande d'un pendule de Foucault
1995	Construction d'un mécanisme d'entraînement d'un pendule de Foucault
1997	Visualisation et mesures du pendule de Foucault
1998	Entretien et contrôle du mouvement d'un pendule de Foucault à l'aide d'un microcontrôleur
2000	Commande d'un pendule de Foucault à l'aide d'un microcontrôleur
2011	Conception d'un système de mesure et d'analyse de la vitesse de précession d'un pendule de Foucault
2014	Système d'entretien des oscillations d'un pendule de Foucault
2023	Pendule de Foucault de 20 mètres à la HEIG-VD dans sa version 4.0

Table 1.1 – Travaux de Bachelor à la HEIG-VD sur le pendule de Foucault

### 1.1.2 Calculs théoriques

Schéma et calculs théorique de la position et de l'évolution du pendule de Foucault en fonction du temps sans prendre en compte l'amortissement dû aux frottements.

Le pendule de Foucault oscille d'un angle  $\theta$  autour de la verticale ( $Z$ ). Alors que le plan d'oscillation du pendule évolue d'un angle  $\psi$  autour de la verticale ( $Z$ ).

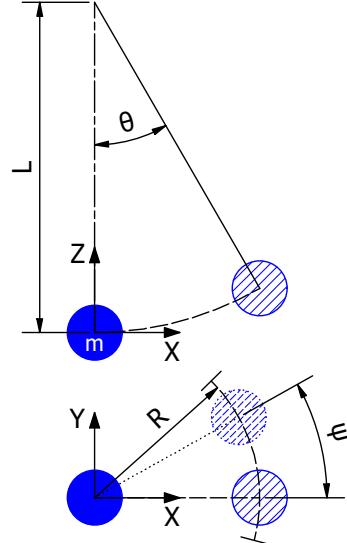


Figure 1.1 – Schéma du Pendule de Foucault

Constantes :

$L$	: Longueur câble	20 m
$R$	: Rayon	0.9 m
$m$	: Masse de la sphère	20 kg
$g$	: Accélération terrestre [MET20]	9.806 m/s <sup>2</sup>
$\lambda$	: Latitude <sup>1</sup>	0.816 rad
$\Omega_{Terre}$	: Vitesse angulaire de la Terre [Wik24b]	$7.292 \cdot 10^{-5}$ rad/s

Variables :

$\theta_0$	: Angle d'oscillation initial	[rad]
$\theta$	: Angle d'oscillation	[rad]
$\psi$	: Angle du plan d'oscillation	[rad]
$T_{sidérale}$	: Période de rotation sidérale <sup>2</sup>	[s]
$T_{pendulaire}$	: Période pendulaire <sup>3</sup>	[s]
$T_{pendule}$	: Période d'oscillation du pendule <sup>4</sup>	[s]
$\omega_{pendule}$	: Vitesse angulaire du pendule [Wik24a]	[rad/s]
$\omega_p$	: Vitesse angulaire du plan d'oscillation [DM02]	[rad/s]
$x, y, z$	: Coordonnées cartésiennes de la sphère	[m]
$t$	: Temps	[s]

1. HEIG-VD : 46°46'46"N 6°39'35"E [Goo22]

### 1.1. PENDULE DE FOUCAULT

$$\theta_0 = \arctan\left(\frac{R}{L}\right) = 0.045 \text{ rad} \quad (1.1)$$

$$T_{sidereal} = \frac{2\pi}{\Omega_{Terre}} = 8.616 \cdot 10^4 \text{ s} \\ = 23 : 56 : 04 \text{ h : m : s} \quad (1.2)$$

$$T_{pendulaire} = \frac{T_{sidereal}}{\sin(\lambda)} = 1.182 \cdot 10^5 \text{ s} \\ = 32 : 50 : 40 \text{ h : m : s} \quad (1.3)$$

$$T_{pendule} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} = 8.973 \text{ s} \quad (1.4)$$

$$\omega_{pendule} = \sqrt{\frac{g}{L}} = 0.700 \text{ rad/s} \quad (1.5)$$

$$\omega_p = \Omega_{Terre} \cdot \sin(\lambda) = 5.314 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s} \quad (1.6)$$

$$\theta(t) = \theta_0 \cdot \cos(\omega_{pendule} \cdot t) \quad (1.7)$$

$$\psi(t) = \omega_p \cdot t \quad (1.8)$$

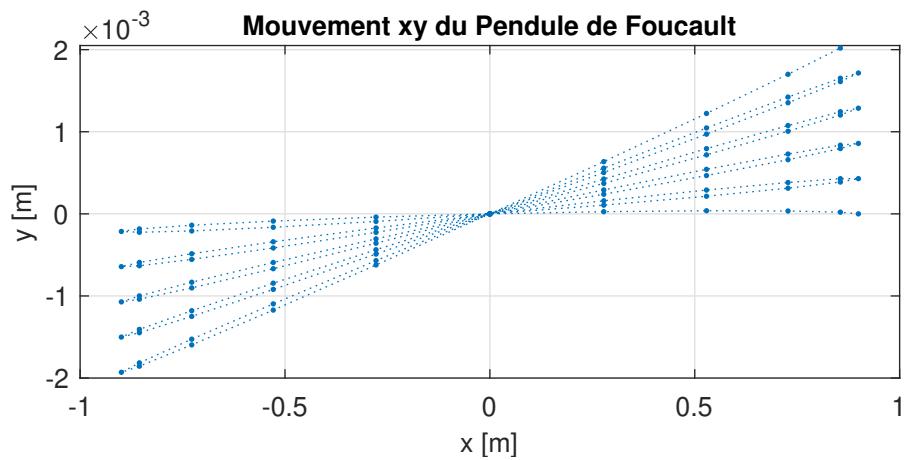
$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \cdot \theta(t) \cdot \cos(\psi(t)) \\ L \cdot \theta(t) \cdot \sin(\psi(t)) \\ L \cdot (1 - \cos(\theta(t))) \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

---

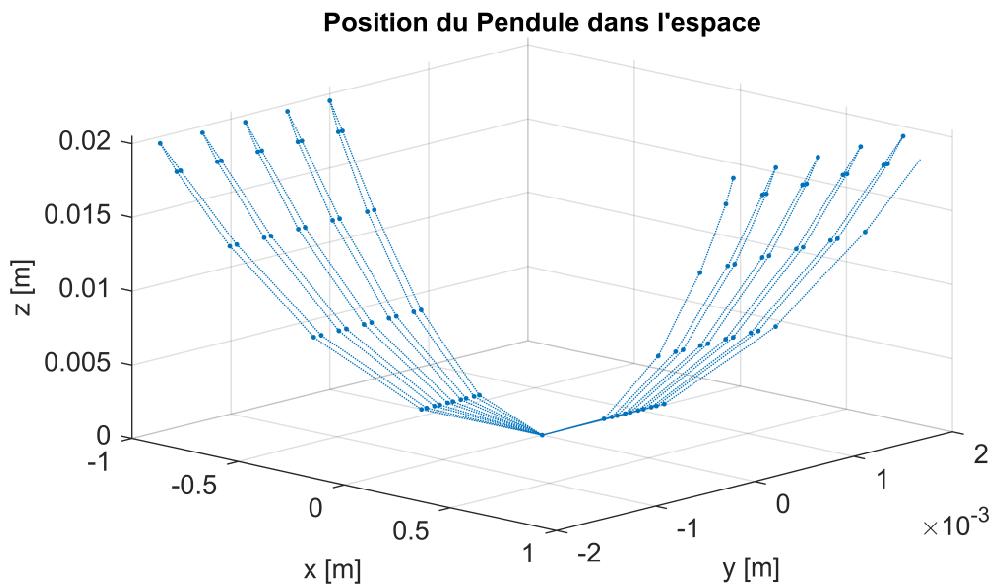
2. Rotation sidérale : temps au bout duquel la planète retrouve la même orientation par rapport aux étoiles environnantes [Wik23b]

3. Jour pendulaire : est le temps nécessaire au plan d'oscillation du pendule de Foucault pour accomplir une rotation complète autour de la verticale du lieu [Wik23a]

4. Période d'oscillation du pendule simple : temps nécessaire pour effectuer une oscillation complète, pour  $\theta \cong \sin(\theta)$  [Wik22]



**Figure 1.2 – Position théorique du pendule de Foucault en  $xy$  en fonction du temps des 5 premières oscillations, selon l'équation (1.9)**



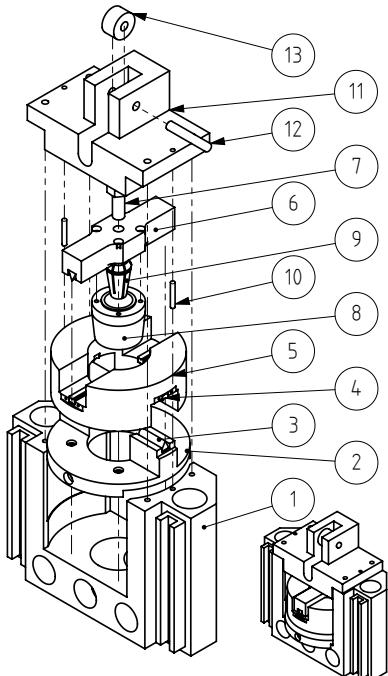
**Figure 1.3 – Position théorique du pendule de Foucault dans l'espace en fonction du temps des 5 premières oscillations, selon l'équation (1.9)**

## 1.1. PENDULE DE FOUCAULT

### 1.1.3 Le Pendule de Foucault de la HEIG-VD

#### Son fonctionnement

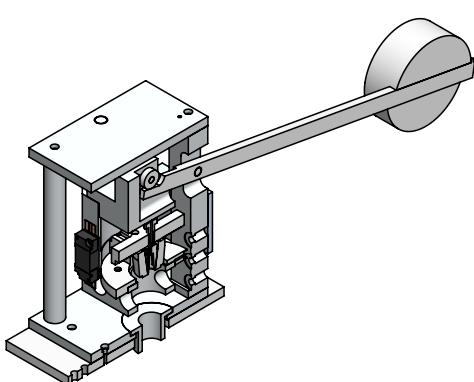
La version actuelle du Pendule de Foucault de la HEIG-VD (Figures 1.4 et 1.5) est composée d'un câble de suspension de 20 mètres de longueur ainsi qu'une sphère de 20 kilogrammes. Le point d'accroche du pendule se fait par l'intermédiaire d'une pince de serrage ⑨ logée dans un cône ⑧. Ce dernier est fixé à la partie supérieure du système à couteaux croisés ⑥. Le système à couteaux croisés est composé de 3 parties : partie inférieure ②, partie intermédiaire ⑤, partie supérieure ⑥. Entre chaque partie, une paire de couteaux ③ en rubis synthétique font la liaison. Les deux paires de couteaux croisés sont positionnées à un angle de 90° l'une part rapport à l'autre. L'ensemble de ce système est positionné sur le chariot ① qui lui est guidé par deux douilles à billes et actionné par deux moteurs linéaires. Afin de réduire la force à fournir par les moteurs linéaires, un système de contre-poids équilibre le système en son point de repos inférieur. La force du contre-poids s'applique sur la douille ⑬ fixée sur le chariot supérieur ⑪.



**Figure 1.4 – Assemblage éclaté du Pendule de Foucault de la HEIG-VD**

#### Ses problématiques

Le système actuel du Pendule de Foucault de la HEIG-VD présente plusieurs problèmes : le premier est l'anisotropie du système créée par le mécanisme de couteaux croisés. En effet, ce phénomène amène le pendule à avoir une précession propre indépendante de la rotation de la Terre et qui peut aller, si l'anisotropie est trop grande, jusqu'à perturber la précession naturelle du pendule.[DM10]



**Figure 1.5 – Vue en coupe de l'assemblage 3D du Pendule de la HEIG-VD**

Le deuxième problème est le contre-poids. Celui-ci est nécessaire pour équilibrer le système, réduire la force à fournir par les moteurs linéaires et à délester le mécanisme d'entretien. Cependant, l'inertie du système s'en trouve drastiquement augmentée et augmente ainsi les efforts à fournir par les moteurs linéaires lors de l'inversion du mouvement. En contre partie, le contre-poids trouve son avantage lors de l'arrêt du pendule. Il permet de maintenir le pendule en position basse sans avoir besoin d'alimenter les moteurs linéaires. Ceci

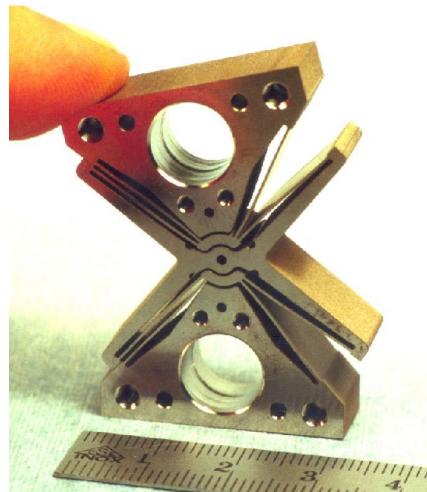
s'explique par le roulement du point d'application de la force en l'extrémité intérieure du bras de levier. Cette configuration offre donc un bras de levier plus important lorsque le pendule est en position basse.

## 1.2 Guidages flexibles

Durant ces dernières décennies, les mécanismes à guidages flexibles ont connu un essor important. Ce progrès s'explique par le fait que le domaine des guidages conventionnels (lisses, roulants, etc.) a atteint ses limites en termes de précision pour des raisons physiques telles que la présence de frottement, la faible rigidité des éléments roulants de petites dimensions et les tolérances de fabrication.

Ils sont utilisés dans de nombreux domaines tels que l'industrie, la robotique, l'aéronautique, etc. Ils permettent de réduire les frottements, les jeux et les vibrations et sont exempts de lubrification et d'usure, ce qui permet de ne créer aucune particule et de supprimer un quelconque risque de grippage. Ils sont également utilisés pour des applications nécessitant une grande précision ainsi qu'une certaine compacité.

Cependant, on peut noter que les guidages flexibles demeurent limités en terme de course et restent sensibles à la température. Ils demandent des modèles géométriques complexes (translation curviligne, rotation autour d'un centre instantané se déplaçant au cours du mouvement, etc.). Mais ces trajectoires se répètent de manière précise. [Hen00]



**Figure 1.6 – Photo du pivot à flexion monolithique "papillon".** Course angulaire jusqu'à  $\pm 15^\circ$ . Translation parasite (déplacement du centre) inférieure à  $2 \mu\text{m}$  pour des courses de  $\pm 10^\circ$ . Usiné monolithiquement en titane [Hen+03]

## Chapitre 2

# Cahier des charges

### *2.1 Analyse des besoins*

L'analyse des besoins permet de mettre en évidence et de comprendre ceux d'un pendule de Foucault à la HEIG-VD. Les utilisateurs de ce pendule sont les suivants :

- HEIG-VD ;
- techniciens ;
- scientifiques ;
- professeurs & étudiants ;
- visiteurs.

Ces utilisateurs ont comme besoins :

- HEIG-VD ;
- avoir une vitrine technologique de son savoir-faire ;
- promouvoir l'école ;
- enseigner les sciences aux futurs ingénieurs ;
- techniciens ;
- assembler/désassembler le pendule ;
- faire une maintenance peu complexe ;
- scientifiques ;
- collecter des données ;
- visiteurs, professeurs & étudiants ;
- observer le pendule ;
- satisfaire leur curiosité ;
- découvrir/apprendre les sciences et le métier d'ingénieur.

## CHAPITRE 2. CAHIER DES CHARGES

Il en découle les principaux besoins :

#	Besoins
B1	Être une vitrine technologique du savoir-faire de la HEIG-VD
B2	Promouvoir l'école
B3	Enseigner les sciences aux futurs ingénieurs
B4	Avoir le pendule assemblable/désassemblable
B5	Permettre une maintenance peu complexe
B6	Collecter des données
B7	Avoir le pendule observable
B8	Satisfaire la curiosité

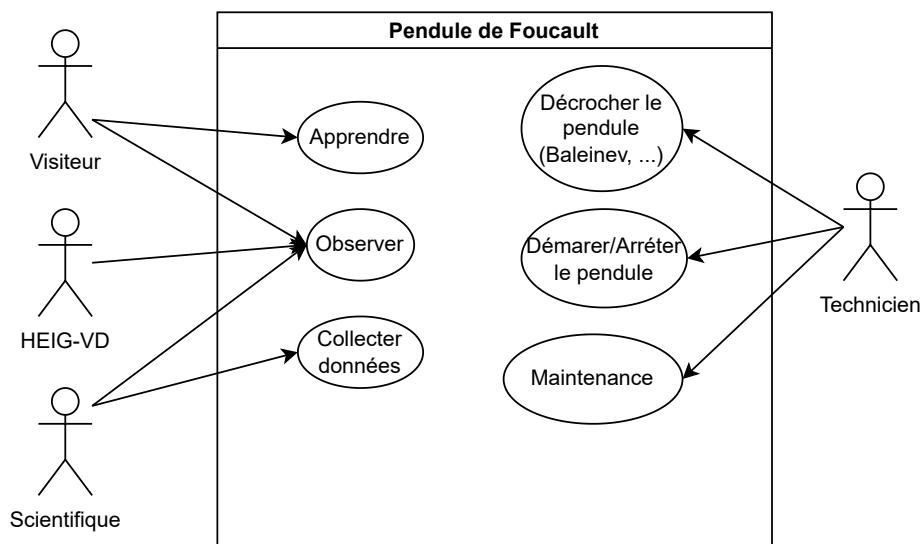
**Table 2.1 – Besoins**

## 2.2 Fonctions et exigences du système

### 2.2.1 Fonctions de service

#	Fonctions de service	Besoins
FS1	Mise à disposition des mesures effectuées sur le pendule	B1-B3, B8
FS2	Maintien automatique de l'oscillation du pendule	B5

**Table 2.2 – Fonctions de service**



**Figure 2.1 – Diagramme de cas d'utilisation**

### 2.3. EXIGENCES

#### 2.2.2 Fonctions techniques

#	Fonctions techniques
FT1	Fournir une excitation au pendule afin de compenser les pertes par frottements (air, pivotement, etc.)
FT2	Connaître la position du pendule de manière à pouvoir réguler son excitation de maintien
FT3	Avoir de faibles variations dues à des facteurs externes (température, humidité, ...)

Table 2.3 – Fonctions techniques

#### 2.2.3 Fonctions de contrainte

#	Fonctions de contrainte
FC1	Être sûr pour les utilisateurs
FC2	Prévoir son comportement lors d'une coupure de courant

Table 2.4 – Fonctions de contrainte

### 2.3 Exigences

#	Exigences
E1	Le système mécanique du pendule de Foucault doit être installé en haut de la tour de l'école
E2	Permettre qu'il soit facilement déconnecté pour être déplacé pour des maintenances
E3	La position de la sphère doit être mesurée avec un système de vision
E4	L'amplitude du pendule doit être régulée autour de son amplitude de consigne (1,2 m)
E5	Les données des mesures de position et les paramètres de régulation doivent être récupérés

Table 2.5 – Exigences

#	Exigences techniques	min.	nom.	max.	unité
ET1	Longueur		19,712		[m]
ET2	Amplitude excitation (dZ)	± 8	± 8	± 12	[mm]
ET3	Nombre de DDL		3		-
ET4	Encombrement	160 x 200 x 300			[mm]
ET5	Volume de travail		9.6·10 <sup>6</sup>		[mm <sup>3</sup> ]
ET6	Rectitude en Z			Ø 100 / 5	[µm / mm]
ET7	Vitesse de fonctionnement	10	12	20	[mm/s]
ET8	Charges		20	30	[kg]
ET9	Rigidité en Z	0		<<	[N/mm]
ET10	Rigidité en X-Y	>>		∞	[N/mm]

Table 2.6 – Exigences techniques



# Chapitre 3

## État de l'art

### 3.1 Mécanismes à guidages flexibles

#### 3.1.1 Tables à cols

La Table à cols circulaires (Figure 3.1a) est un mécanisme applicable avec de faibles courses et une architecture monolithique, ce qui impose un moyen de fabrication précis par électro-érosion (Electrical Discharge Machining (EDM)) ou Computer Numerical Control (CNC). La Table à cols prismatiques (Figure 3.1b) est une variante de la Table à cols circulaires, où les cols peuvent être considérés comme des lames flexibles. Ce mécanisme est plus adapté pour des courses plus longues et des charges plus importantes. Il est plus facile à fabriquer que la Table à cols circulaires car les cols peuvent être assemblés à la structure de la table qui n'a pas besoin d'être monolithique.

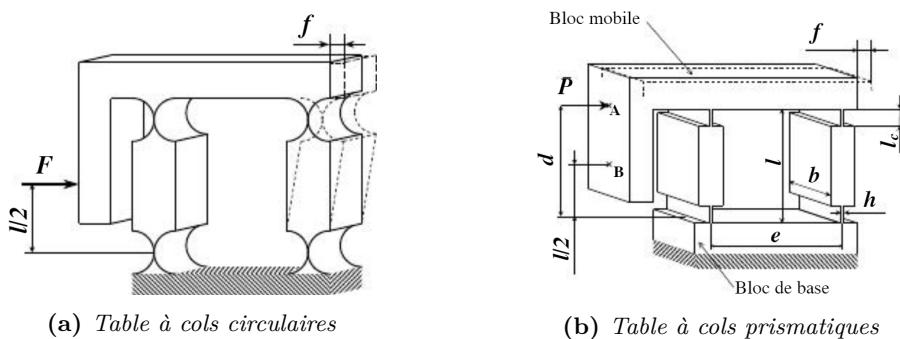


Figure 3.1 – Tables à cols [Hen00]

#### 3.1.2 Tables à lames parallèles

Ce guidage en translation redondant est sensiblement similaires aux tables à cols. Il est composé de deux lames flexibles encastrées aux deux extrémités reliant la base fixe au bloc intermédiaire. Et de deux lames supplémentaires encastrées reliant le bloc intermédiaire au bloc mobile. Cette configuration offre des avantages semblables à la table à cols prismatiques en plus de supprimer le déplacement parasite perpendiculaire au déplacement du bloc mobile.

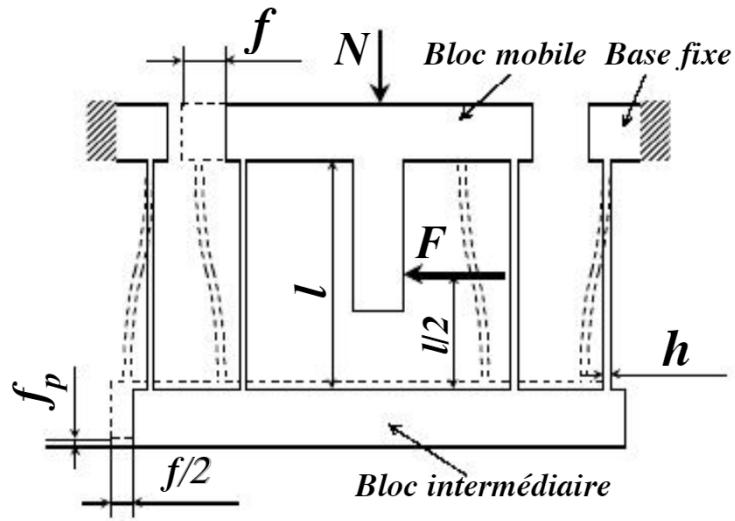


Figure 3.2 – Table à quatres lames parallèles [Hen00]

### 3.1.3 Bras de Sarrus

Une *Conception d'Axes Motorisés Rectilignes d'Ultra-Haute Précision* avec une architecture basée sur un système de Bras de Sarrus a été proposée par F. Cosandier en 2013 pour la réalisation d'une balance de watt. Ce projet s'inscrit dans le cadre de la redéfinition de l'unité du kilogramme.[Cos13]. Il offre donc une grande précision de part sa rectitude et sa rigidité latérale élevée. L'architecture d'un tel mécanisme peut s'avérer intéressante pour le guidage du chariot du pendule de Foucault.

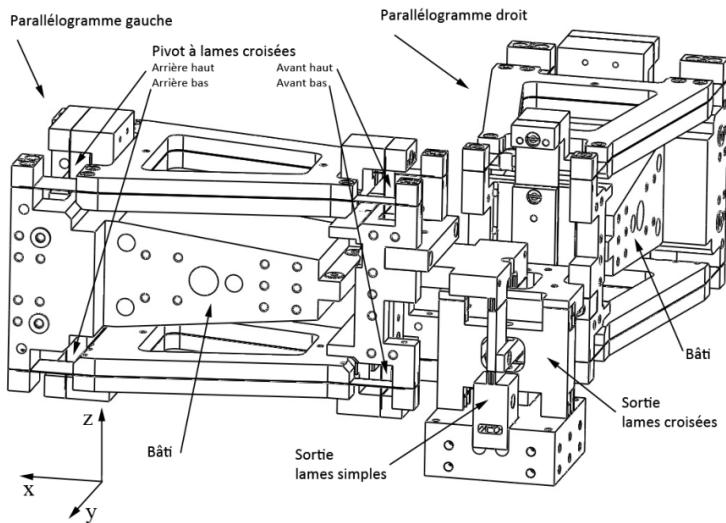


Figure 3.3 – Bras de Sarrus proposé par F. Cosandier [Cos13]

### 3.1.4 Machine d'exercice à force pratiquement constante

Ce système breveté [HM04] propose une machine d'exercice. Il offre une large plage de mouvement et une force pratiquement constante sur toute la course. Il est composé de lames encastrées à une extrémité et d'un roulement à bille de l'autre qui parcourt une came. L'interface roulement-came risque de créer

### 3.1. MÉCANISMES À GUIDAGES FLEXIBLES

des perturbations lors de la lecture du courant des moteurs linéaires. Avoir une force constante serait un avantage pour la régularité du mouvement d'entretien du pendule de Foucault.

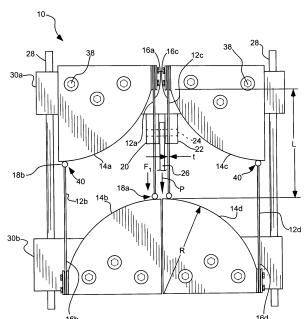


FIG. 1

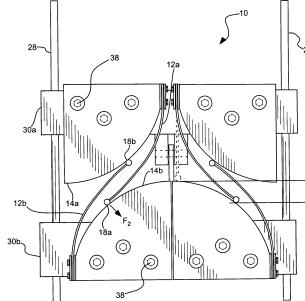


FIG. 2

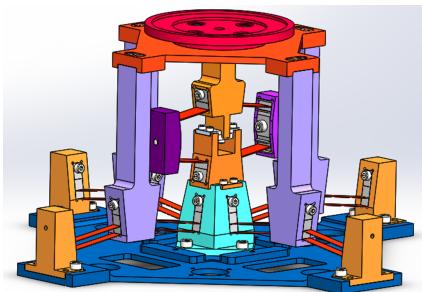
**(a) Vue de face**

(b) Vue de face, en position inférieure

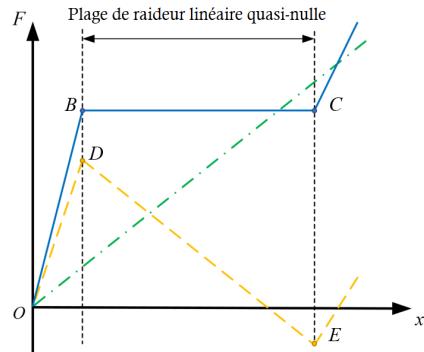
**Figure 3.4 – Mécanisme à force constante, extrait du brevet US7060012B2 [HM04]**

### 3.1.5 Mécanisme à raideur quasi-nulle

Dans le but de pallier aux limitations d'un système bistable conventionnel [Zho+20], Zhou Z. *et al.* ont développé un mécanisme composé de sous-systèmes bistables avec une rigidité négative couplés à un sous-système linéaire. Montés en parallèle, les raideurs s'additionnent pour obtenir une raideur quasi-nulle sur une plage de déplacement donnée. Un tel mécanisme permettrait de s'affranchir du contre-poids présent dans la version actuelle du pendule.



### (a) Modélisation du mécanisme nulle proposée par Zhou Z. et al.



(b) Illustration d'une raideur quasi-nulle constituée de l'addition d'une raideur négative et d'une raideur positive ( $-$  — Raideur négative linéaire,  $-.$  — Raideur positive linéaire,  $—$  — Raideur quasi-nulle)

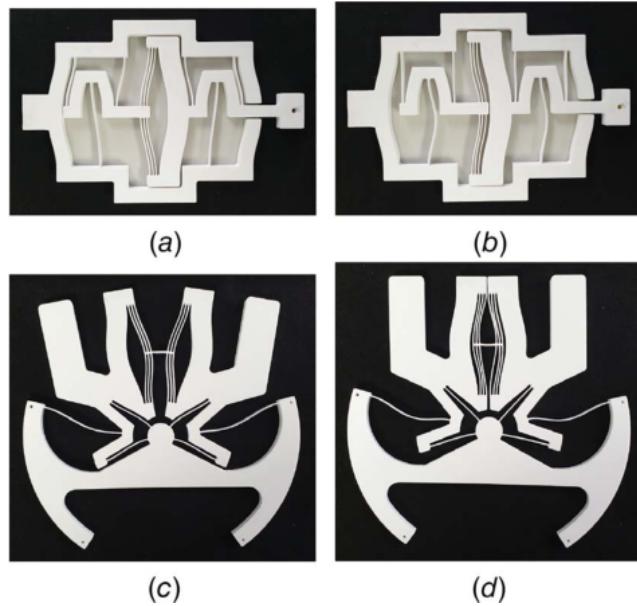
Figure 3.5 – Mécanisme à raideur quasi-nulle [Zho+20]

### 3.1.6 Mécanisme à raideur variable

Ce système proposé par l'Université de technologie de Delft permet d'avoir deux états de raideur différents ; un état souple avec une rigidité quasi-nulle pour les phases de déplacement et un état rigide pour les phases de maintien. Le changement d'état est obtenu par un système bistable qui fait varier la tension dans les lames en fonction de sa position. Ce mécanisme serait intéressant à

### CHAPITRE 3. ÉTAT DE L'ART

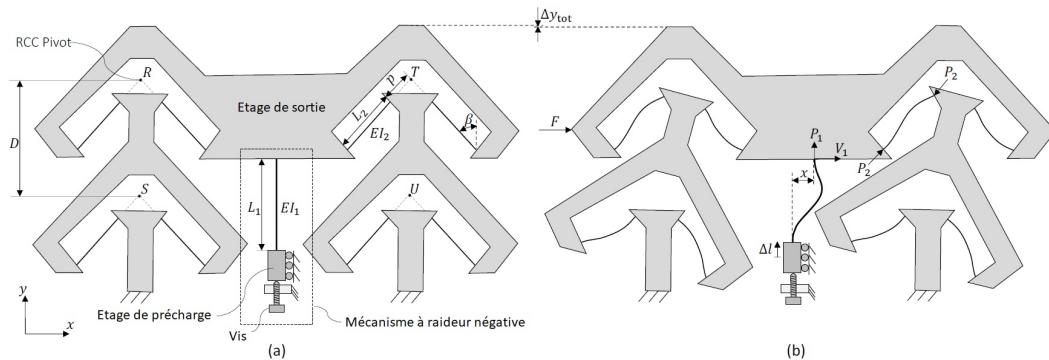
implémenter pour maintenir le pendule de Foucault en position lors de son démontage ou d'une coupure de courant par exemple.



**Figure 3.6 – Photographies des mécanismes Opposing Constant Force (OCF) et Opposing Constant Torque (OCT) imprimés en 3D. Le mécanisme OCF est représenté dans une configuration (a) rigide et (b) souple. Le mécanisme OCT est représenté dans une configuration (c) rigide et (d) souple. [Kup+20]**

#### 3.1.7 4-RCC

Ce mécanisme plan à quatre barres flexibles, appelé 4-RCC (Remote Center Compliance), permet de compenser le mouvement parasite perpendiculaire au déplacement. Celui-ci a pour avantage une force d'actionnement très faible, de l'ordre de quelque millineutron sur une plage de  $\pm 4$  millimètres. Il pourrait être intéressant de l'utiliser pour le guidage du chariot du pendule de Foucault.



**Figure 3.7 – Mécanisme 4-RCC [Tis+22]**

## Chapitre 4

# Catalogue de solutions

### 4.1 Actionneur dZ

L'actionneur dZ est le système qui permet de réaliser le mouvement en translation selon l'axe Z (vertical) de la plateforme où vient s'ancre le câble du pendule. Les options d'actionneurs dZ sont présentées à la figure 4.1 :

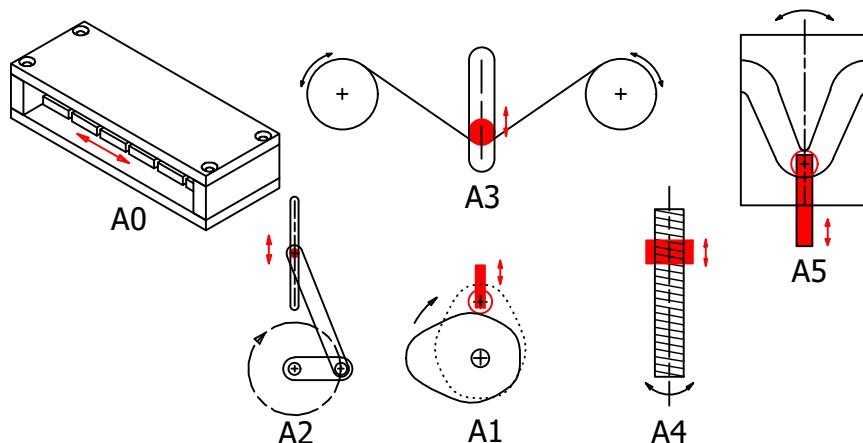


Figure 4.1 – Options actionneur dZ (partie mobile en *rouge*)

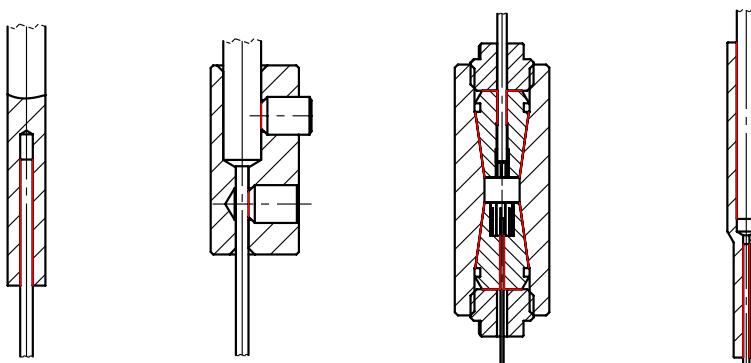
- **A0** Moteurs linéaires (version actuelle : *BLDC Ironless*) ;
  - ⊕ Lecture de la force réluctante avec un minimum de bruits parasites ;
  - ⊕ Évite les perturbations dues aux différentes interfaces ;
  - ⊕ Implémentation similaires à la version actuelle ;
  - ⊖ Coût élevé ;
  - ⊖ Régulation complexe ;
- **A1** Système à came + palpeur ;
  - ⊕ Coût réduit ;
  - ⊕ Facilité de régulation ;
  - ⊕ Répétabilité du mouvement ;
  - ⊖ Bruyant ;
  - ⊖ Force unidirectionnelle ;

- Interface mécanique ;
- **A2** Système à bielle + manivelle ;
  - Coût réduit ;
  - Facilité de régulation ;
  - Répétabilité du mouvement ;
  - Interface mécanique ;
- **A3** Système à bobines + câble ;
  - Coût réduit ;
  - Précision de positionnement ;
  - Nécessite 2 moteurs ;
- **A4** Système à vis ;
  - Coût réduit ;
  - Précision de positionnement ;
  - Interface mécanique ;
- **A5** Système à came cylindrique ;
  - Facilité de régulation ;
  - Répétabilité du mouvement ;
  - Interface mécanique ;

## 4.2 Câble à section variable

Dans le but de tester la proposition de Georges Derron, il est nécessaire de joindre 2 câbles de diamètre de 1 et 3 mm. Cette proposition consiste à remplacer le système à couteaux croisés qui supprime la flexion au niveau de la fixation du câble par un câble de section plus importante au niveau de l'ancre.

Voici ci-après une sélection de solutions qui répondent à ce besoin :



(a) *Sertissage*      (b) *Douille à vis*      (c) *Double mords*      (d) *Douille à sertir*

**Figure 4.2 – Options de raccord pour câbles Ø3 et Ø1 mm**

### 4.3. MÉCANISMES À GUIDAGES FLEXIBLES

#### 4.3 Mécanismes à guidages flexibles

##### 4.3.1 Options de structure flexible

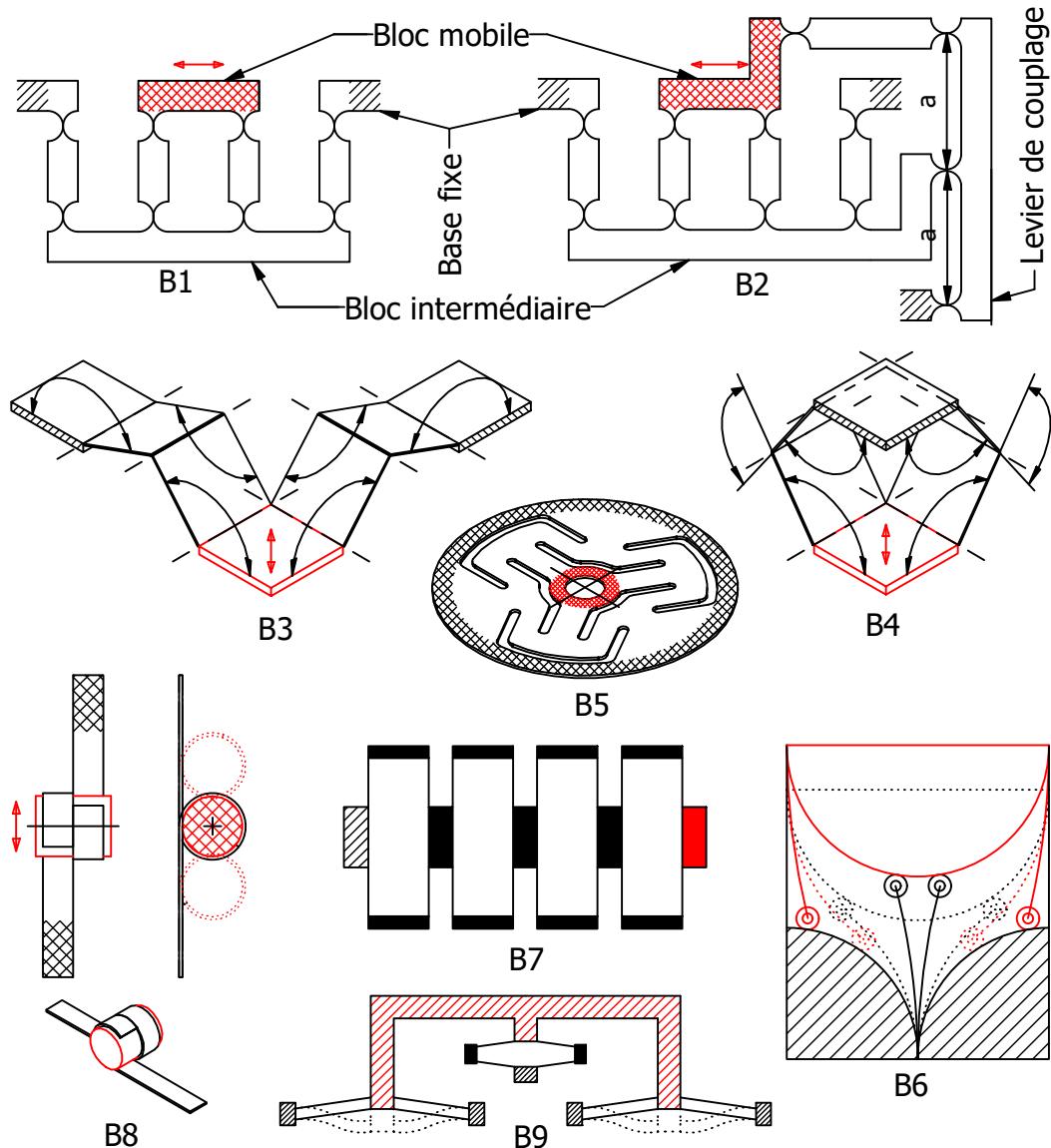
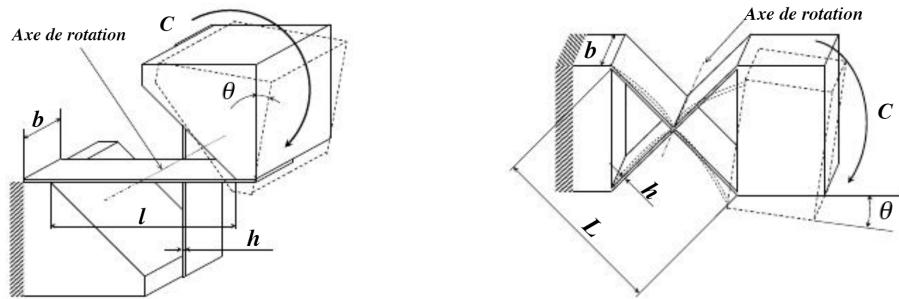


Figure 4.3 – Options de structure flexible (partie mobile en rouge)

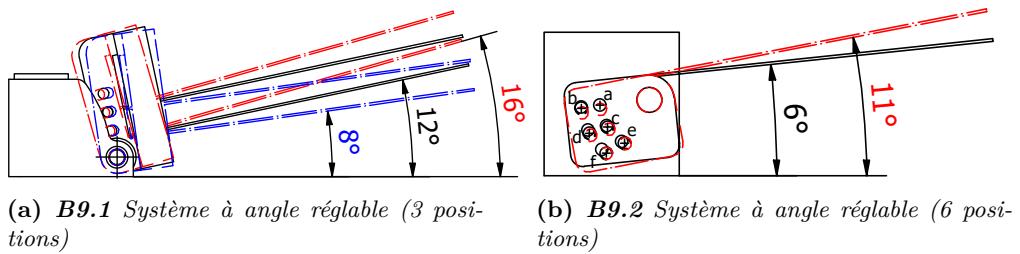
- **B1** Table compensée à 8 cols [Hen00]
- **B2** Table compensée à 13 cols [Hen00]
- **B3** Configuration Sarrus ouvert [Cos13]
- **B4** Configuration Sarrus fermé [Cos13]
- **B5** Membrane flexible [Hen00]
- **B6** Mécanisme à force constante [HM04]
- **B7** Mécanisme à mouvement linéaire
- **B8** Mécanisme à pseudo "crémaillère - pignon" flexible
- **B9** Mécanisme à raideur quasi-nulle [Zho+20]

## CHAPITRE 4. CATALOGUE DE SOLUTIONS



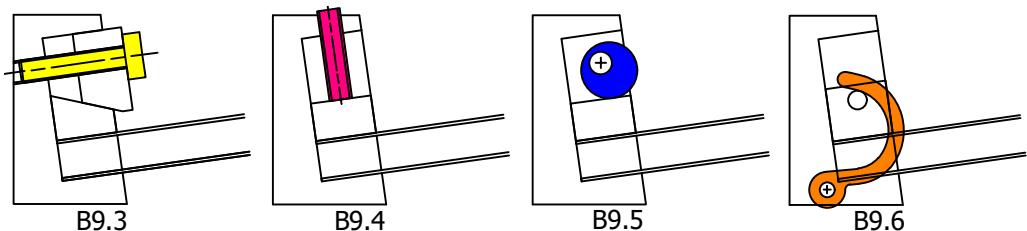
(a) **B3.1 / B4.1** Pivot à deux lames croisées séparées [Hen00]      (b) **B3.2 / B4.2** Pivot à deux lames croisées non séparées [Hen00]

**Figure 4.4 – Options de pivots à deux lames pour configurations Sarrus ouvert et fermé**



(a) **B9.1** Système à angle réglable (3 positions)      (b) **B9.2** Système à angle réglable (6 positions)

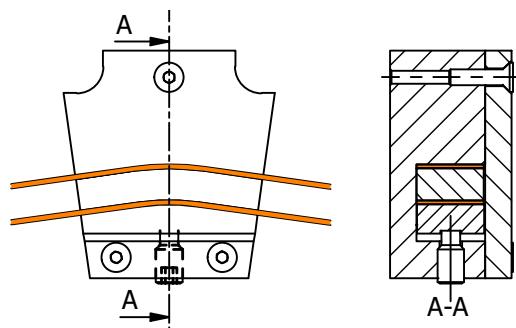
**Figure 4.5 – Options de systèmes à angle réglable**



**Figure 4.6 – B9.3 - B9.6 Options de systèmes à angle fixe**

- **B9.1** Système à angle réglable (3 positions)
- **B9.2** Système à angle réglable (6 positions)
- **B9.3** Système à angle fixe à vis et cale prismatique à base trapézoïdale [Zho+20]
- **B9.4** Système à angle fixe à vis sans tête
- **B9.5** Système à angle fixe à excentrique
- **B9.6** Système à angle fixe à crochet

#### 4.3. MÉCANISMES À GUIDAGES FLEXIBLES



**Figure 4.7 – B9.7** Option de système à angle fixe et lames continues



# Chapitre 5

## Choix de solutions

### 5.1 Actionneur *dz*

Afin de garantir une lecture avec le minimum de bruits parasites de la force réluctante au niveau de l'ancrage du câble et d'éviter les perturbations dues aux différentes interfaces, il est recommandé d'utiliser des moteurs linéaires pour l'actionneur *dz* comme dans sa version actuelle. La quantité de moteurs et leur configuration seront définies par la suite. À noter qu'il serait intéressant de monter la partie aimant du moteur sur la partie mobile pour éviter d'avoir des câbles volants et ainsi ne pas avoir de chaîne porte câble.

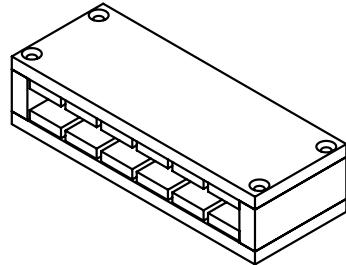


Figure 5.1 – Moteur linéaire (version actuelle)

### 5.2 Câble à section variable

Dans un soucis de limiter un effet de double pendule, la solution doit être la plus légère possible. Mais, elle doit aussi être capable de supporter la masse de 20 kg du pendule. C'est pourquoi l'option du sertissage (Figure 5.2) sera testée. Dans la mesure où le système ne supporte pas le poids appliqué, l'option de douille à vis (Figure 4.2b) pourra y être ajoutée en supplément.

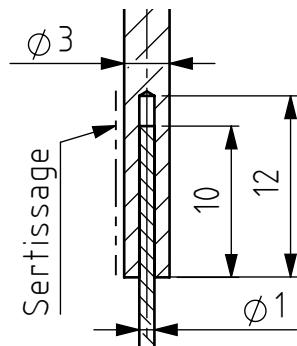


Figure 5.2 – Assemblage des câbles sertis

L'option du mécanisme à raideur quasi-nulle proposé par Zhou Z. [Zho+20] offre plusieurs avantages à son application. En effet, il intègre l'utilisation de lames flexibles ce qui répond à la problématique du Travail de Bachelor. De plus, il permet de s'affranchir du contre-poids présent dans la version actuelle du pendule de part sa raideur quasi-nulle pour une plage donnée. On constate encore que ce mécanisme sera facilement adaptable avec la solution de câble à section variable.



# Chapitre 6

## Simulation

### 6.1 *Simulation BCM sur DAS-2D*

En recherchant un moyen de simulation plus rapide mais aussi précis que la simulation FEM, l'article suivant propose une alternative intéressante. L'article "*Analysis of planar compliant mechanisms based on non-linear analytical modeling including shear and lateral contraction*", écrit par Stefan Henning et Lena Zentner [HZ21], se concentre sur le développement du logiciel *Compliant Mechanism User Interface (CoMUI)*, axé sur la conception d'éléments flexibles et propose aussi une table récapitulative de plusieurs logiciels similaires existants.

Après un essai du logiciel *CoMUI*, il s'avère que celui-ci est très performant pour la simulation de mécanismes flexibles, mais reste limité par le nombre d'éléments qu'il peut traiter. En parcourant la liste des logiciels existants de l'article, on remarque que le logiciel *DAS-2D*, basé sur *MATLAB*, offre une grande flexibilité pour la modélisation.

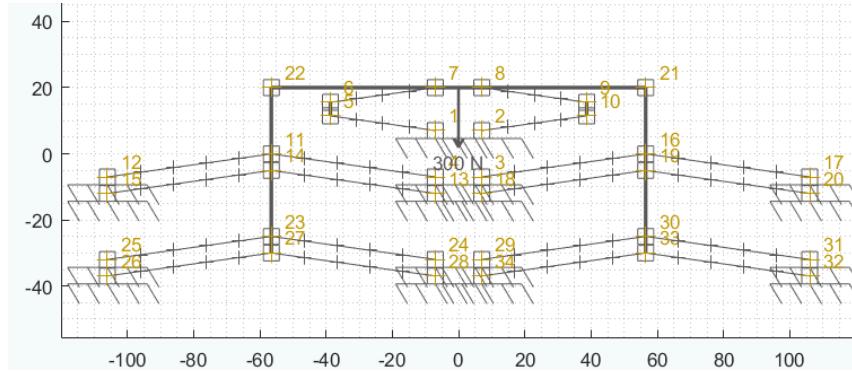
En effet, *DAS-2D* (Design, Analysis and Synthesis), développé par Turkkan O. et Su H. [TS16], est un outil de conception qui intègre les modèles de corps pseudo-rigides, de poutre à contrainte, de poutre linéaire et les théories d'analyse/synthèse cinétostatique pour les mécanismes flexibles.

"Le modèle de contrainte de poutre, ou Beam Constraint Model (BCM), a été développé pour analyser avec précision les poutres dans la plage de déflexion intermédiaire. Le BCM à segments multiples peut traiter avec précision des déflexions importantes. Le BCM a des équations de forme fermée pour la déformation de la poutre et l'énergie de déformation. La déformation axiale est présente dans la poutre BCM."<sup>1</sup>

Ce modèle est donc particulièrement adapté pour simuler ce mécanisme, car les déformations importantes au niveau des lames peuvent être considérées comme des poutres.

---

1. Traduction de l'anglais de la description du modèle BCM dans *DAS-2D* v0.8



**Figure 6.1 – Modélisation du mécanisme à raideur quasi-nulle proposée par Zhou Z. en BCM sur DAS-2D v0.8**

Dans la figure 6.1, la modélisation du mécanisme est constituée de 4 sous-mécanismes bistables et du sous-mécanisme linéaire. Chaque système bistable est constitué de 4 lames encastrées aux extrémités et discrétisées en 5 segments de poutre. Chaque lame est dimensionnée selon l'article de Zhou Z. :

Élément	Symbole	Valeur	Unité
Longueur	L	50	mm
Epaisseur	h	0,4	mm
Largeur	d	8	mm
Angle	$\beta$	8	deg
Module de Young	G	110	GPa

**Table 6.1 – Dimension Lames bistables**

Le sous-système linéaire est constitué de 4 lames encastrées aux extrémités et discrétisées en 4 segments de poutre. Elles sont dimensionnées selon l'article de Zhou Z. :

Élément	Symbol	Valeur	Unité
Longueur	L	32	mm
Épaisseur	h	0,8	mm
Largeur	d	14	mm
Angle	$\beta$	8	deg
Module de Young	G	110	GPa

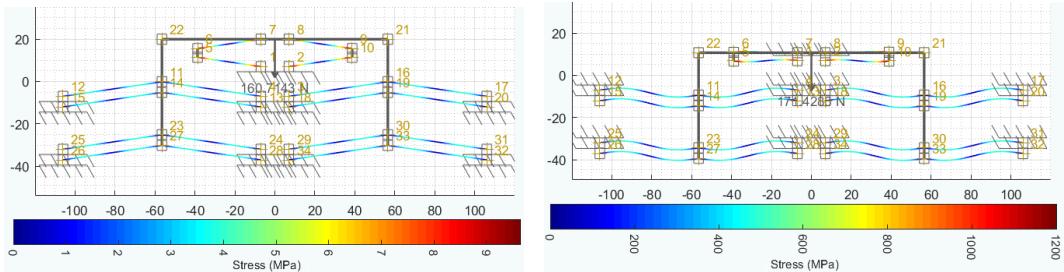
**Table 6.2 – Dimension Lames linéaires**

Les sous-systèmes sont reliés entre eux par des éléments de liaisons infiniment rigides. Une force de 300 [N] est appliquée au centre de l'élément de liaison 7-8.

Afin de visualiser les déformations des lames, les figures 6.2a - 6.2b montrent respectivement le système avant et après le changement de raideur. On y constate une concentration importante de contraintes au niveau de l'encastrement des lames du système linéaire.

### 6.1. SIMULATION BCM SUR DAS-2D

Le graphique de la figure 6.3 montre la force en fonction du déplacement du mécanisme. Avec le plateau théorique désiré en rouge et un plateau hypothétique en jaune. Ce dernier risque de se produire si les systèmes bistables sont sous-dimensionnés par rapport au système linéaire. De par la nature de la simulation, il n'est pas possible de savoir si les systèmes bistable sont sous-dimensionnés ou non. Cependant, la simulation est en accord avec les résultats expérimentaux de Zhou Z. [Zho+20] en figure 6.4.



(a) Simulation à  $F = 160.7 \text{ [N]}$  et  $\delta = 0.12 \text{ [mm]}$ , avant changement de raideur  
 (b) Simulation à  $F = 171.4 \text{ [N]}$  et  $\delta = 9.33 \text{ [mm]}$ , après changement de raideur

Figure 6.2 – Simulations DAS-2D v0.8

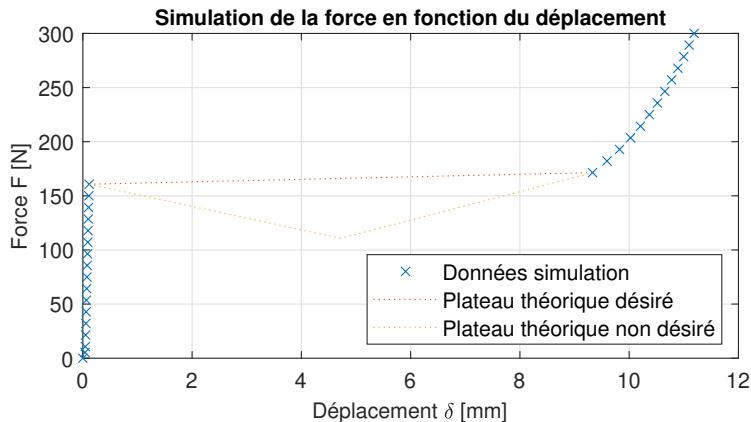


Figure 6.3 – Graphique de la simulation du mécanisme à raideur quasi-nulle proposé par Zhou Z. en BCM sur DAS-2D v0.8

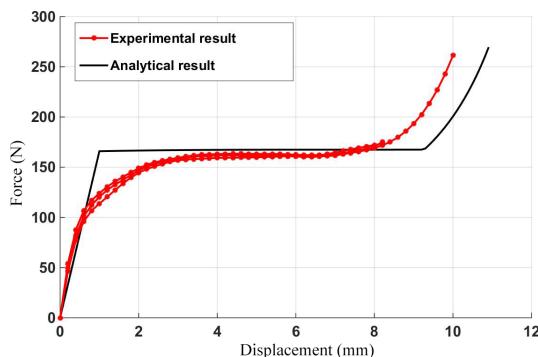


Figure 6.4 – Graphique de la simulation analytique et résultats expérimentaux du mécanisme à raideur quasi-nulle proposé par Zhou Z. [Zho+20]

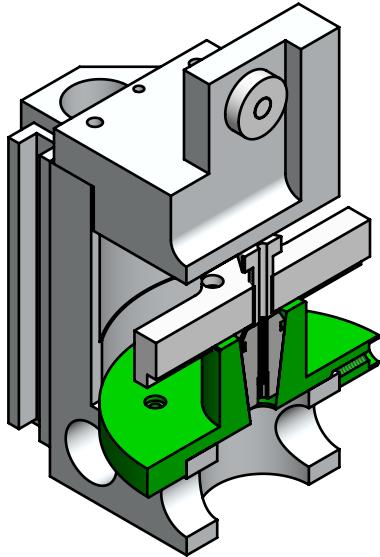


# Chapitre 7

## Conception

### 7.1 Câble à section variable

Afin d'adapter le mécanisme actuel pour accueillir la nouvelle version du câble, il a fallu remplacer le système de couteaux croisés par un **support monobloc**<sup>1</sup>. Ce dernier permet d'y placer la nouvelle pince de serrage<sup>2</sup> de Ø3 mm tout en limitant les modifications au reste du mécanisme.



**Figure 7.1 – Modélisation du mécanisme d'entretien adapté pour le câble à section variable, coupe vue isométrique**

---

1. Mise en plan disponible en Annexe A.2

2. Pince de serrage ER ER16 | 426E | <15µm | Ø3-2 : <https://www.kemmler-shop.de/fr/pinces-de-serrage/pinces-de-serrage-systeme-er-15-m/426-e-er-16-15-m/1965/pince-de-serrage-er-er16-426e-15-m-oe-3-2?c=3242>

## 7.2 Maquette

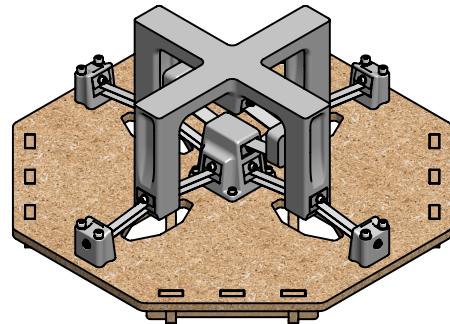
Les pièces suivantes de la maquette ont été réalisées en impression 3D Fused Deposition Modelling (FDM), avec du filament en PLA :

- ① Bloc mobile
- ② Base fixe extérieure
- ③ Cale inter-lame
- ④ Cale supérieure
- ⑤ Support lames linéaires
- ⑥ Cale lame linéaire

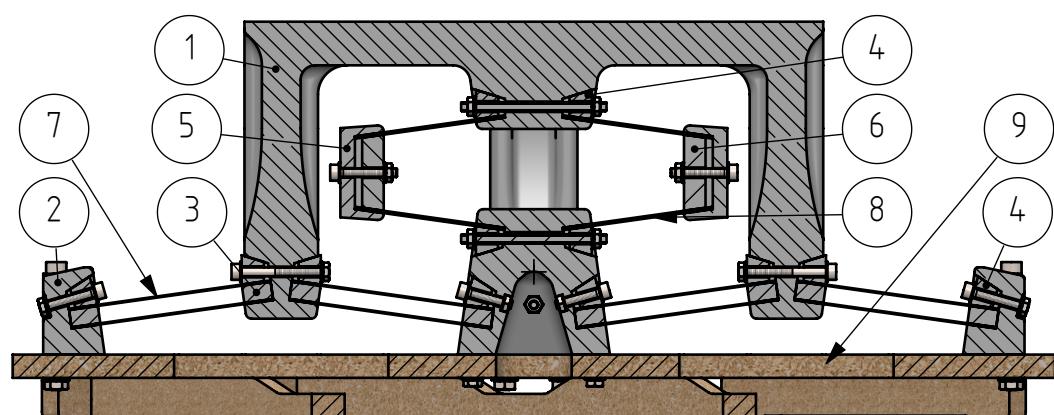
Quant au socle principal ⑨, il fût réalisé en Medium Density Fiberboard (MDF).

Enfin, les lames flexibles ⑦ et ⑧ ont été découpées dans un premier temps dans des clinquants en acier inox. Et dans un second temps, elles ont été remplacées par des lames en CuBe découpées à la cisaille. Cependant ces dernières ne se sont pas montrées satisfaisantes, car la force à appliquer pour le changement d'état était trop faible. C'est pourquoi l'utilisation de l'inox sera recommandé par la suite.

Le moyen de fixation des lames s'inspire de la solution proposée par Zhou [Zho+20], ce qui correspond à la proposition de solution **B9.3** de la figure 4.6 en page 18.<sup>3</sup>. Cette solution permet l'adaptabilité de lame de différentes épaisseurs et largeurs.



**Figure 7.2 – Modélisation de la maquette V1, vue isométrique**



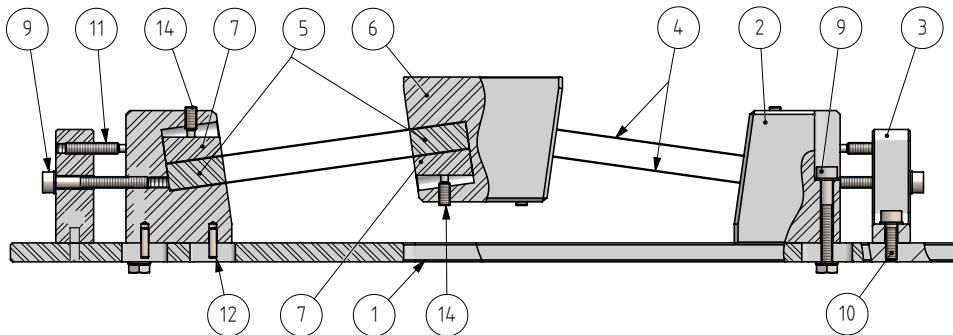
**Figure 7.3 – Modélisation de la maquette V1, vue de coupe**

3. Mise en plan disponible en Annexe A.3

### 7.3. PROTOTYPE BISTABLE

#### 7.3 Prototype bistable

Afin de tester expérimentalement le mécanisme bistable, un prototype proche de la potentielle implémentation finale a été réalisé par procédé conventionnel de fabrication type Computer Numerical Control (CNC). Les pièces ont été usinées dans de l'aluminium 6082 et une demande d'offre pour du CuBe2 a été envoyée aux *Lamineries MATTHEY* pour les lames flexibles. La figure 7.4 montre le prototype réalisé.<sup>4</sup>



**Figure 7.4 – Modélisation du prototype bistable**

L'ensemble du prototype est fixé sur une plaque de base ①. La position des blocs de support ② est réglable par l'intermédiaire d'une vis ⑨ et d'une vis sans tête ⑪. Ceci permet d'ajusté la précontrainte présent dans le système et d'adapter le mécanisme à différentes longueurs de lames ④. Le bloc de réglage ③ est fixé en position par 2 vis ⑨. L'espacement entre les lames est assuré par deux cales ⑤ à chaque encastrement. Une cale de profil trapézoïdale ⑦ permet de maintenir les lames en position par l'intermédiaire d'une vis sans tête ⑭. La même configuration est utilisée au niveau de la tête mobile du bistable ⑥.

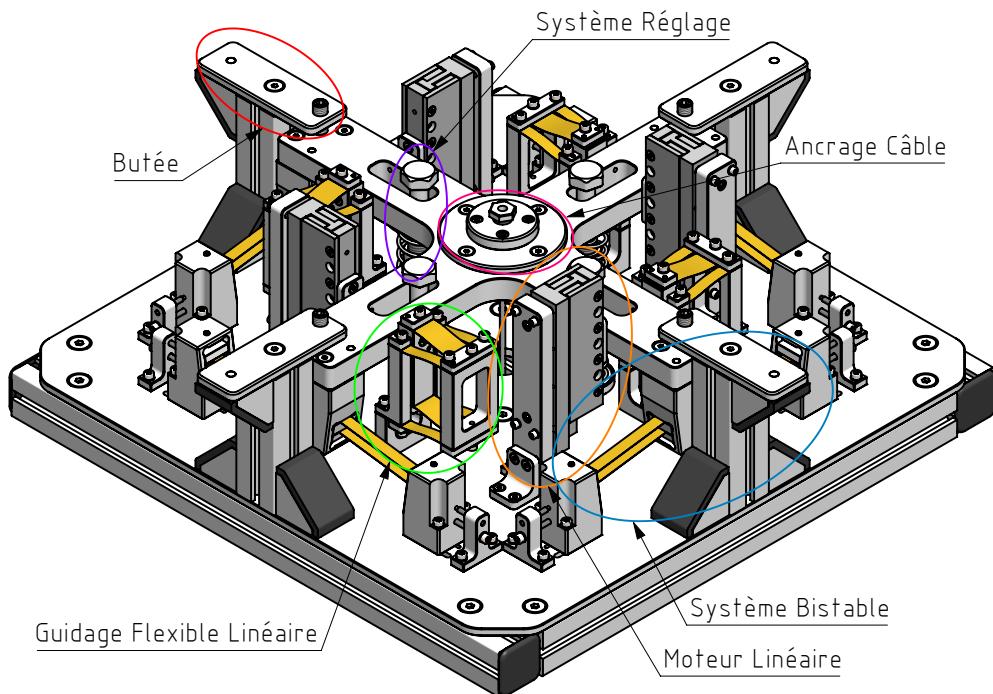
---

4. Mise en plan disponible en Annexe A.4

## 7.4 Implémentation finale

L'implémentation finale du Pendule de Foucault est constituée de 6 parties principales :

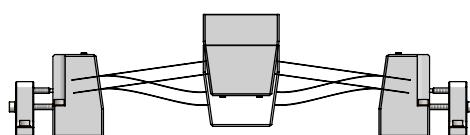
- Système bistable ;
- Guidage flexible linéaire ;
- Moteur linéaire ;
- Système de réglage ;
- Butée ;
- Anchorage du câble.



**Figure 7.5 – Modélisation de l'implémentation finale**

### 7.4.1 Système bistable

Le système bistable de l'implémentation finale est fortement inspiré du prototype réalisé en figure 7.4. Il a cependant été adapté au niveau de la fixation des bases pour offrir un plus large choix de longueur de lames, de 50 à 67 mm. Quant à l'épaisseur des lames, elle peut aller jusqu'à 1.20 mm.

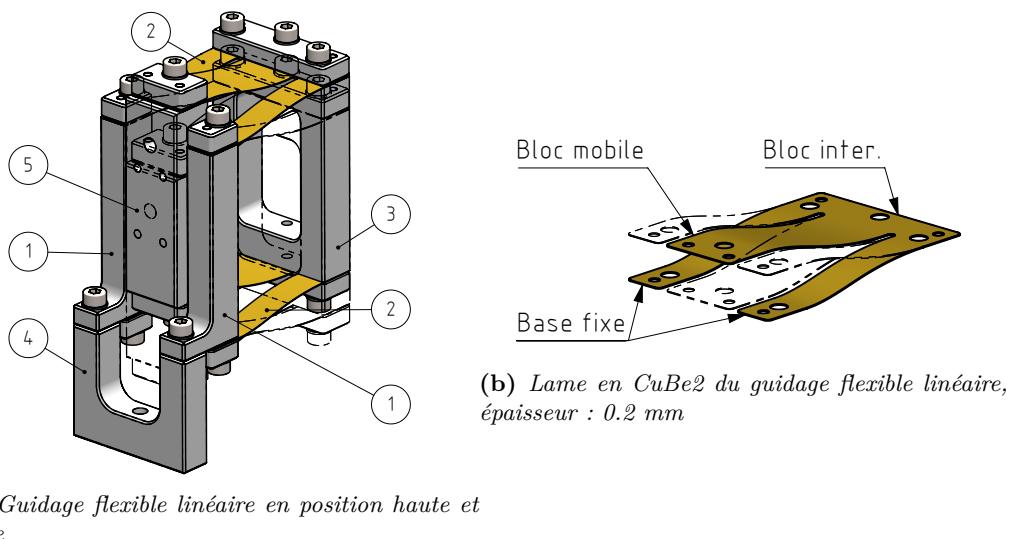


**Figure 7.6 – Modélisation du système bistable de l'implémentation finale**

## 7.4. IMPLÉMENTATION FINALE

### 7.4.2 Guidage flexible linéaire

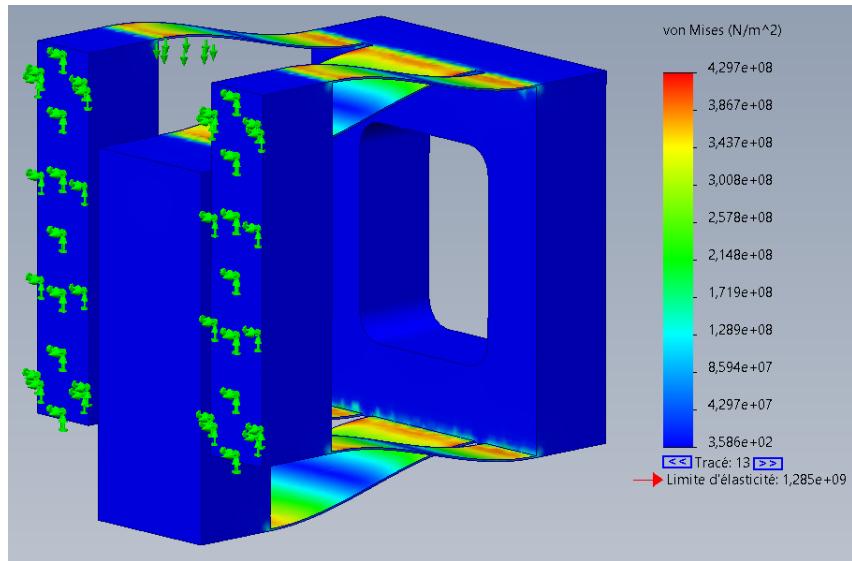
Dans un but de garantir la linéarité et la précision du mouvement, un guidage flexible linéaire est utilisé. Sa conception est basée sur le système linéaire à 4 lames parallèles 3.1.2 proposé par Simon Henein [Hen00]. La principale différence réside dans le fait que les lames reliant la base fixe ① au bloc intermédiaire ③ sont positionnées dans le même plan que les lames reliant le bloc intermédiaire ③ à la partie mobile ⑤. Ceci permet de réduire l'encombrement du système et de simplifier la conception.



**Figure 7.7 – Modélisation du guidage flexible linéaire de l'implémentation finale**

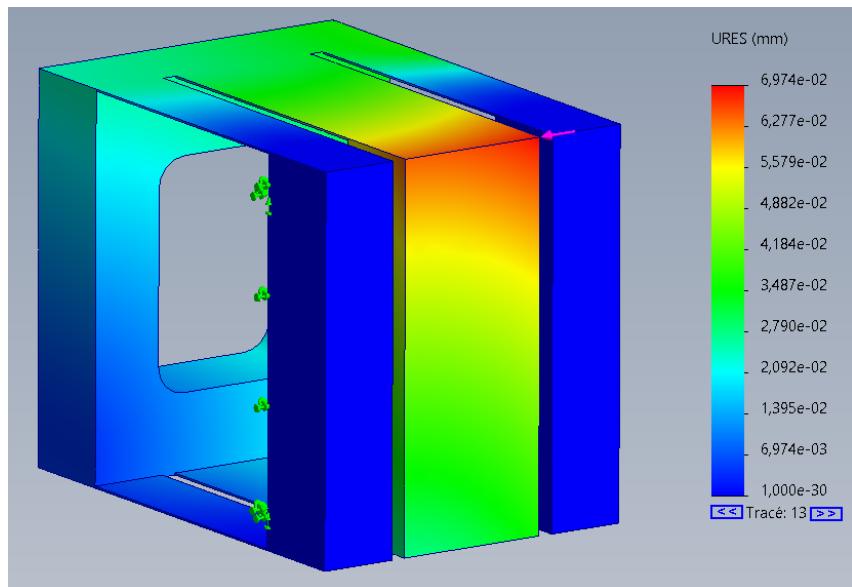
Ce guidage à pour avantage de ne faire subir un déplacement aux lames deux fois inférieur au déplacement de la partie mobile. Ceci permet de réduire les contraintes et la fatigue dans les lames.

Les lames monoblocs offrent comme avantage de garantir la position entre chaque lame et ainsi réduire les défauts d'alignements lors de l'assemblage, ce qui pourrait créer des perturbations lors de son utilisation.



**Figure 7.8 – Simulation FEM du guidage flexible linéaire, force verticale de 7.4 N**

En réalisant une simulation FEM du guidage flexible linéaire, figure 7.8, on peut constater que la force nécessaire pour déplacer la partie mobile de 10 mm est de l'ordre de 7.4 N, alors que la force pour déplacer latéralement le bloc mobile de 70  $\mu\text{m}$  est de 20 N. Ce qui permet de garantir un mouvement linéaire et précis. Quant aux contraintes subies par les lames, elles sont au maximum de  $4,3 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ , ce qui est en dessous de la limite élastique du CuBe2 dur+durci à  $1,28 \cdot 10^9$ . Ceci garanti un coefficient de sécurité proche de 3.



**Figure 7.9 – Simulation FEM du guidage flexible linéaire, force latérale de 20 N**

## 7.4. IMPLÉMENTATION FINALE

### 7.4.3 Moteur linéaire

Le moteur linéaire AUM-1 de la marque TDS<sup>5</sup> ③ est fixé sur la plaque de montage ②, elle même montée sur la base du système par l'intermédiaire de vis et de l'équerre ①. Quant au rail du moteur linéaire ④, il fixé sur la partie mobile du système par l'intermédiaire d'une plaquette de fixation ⑦. Afin de régler le jeu entre les deux parties du moteur linéaire, 2 vis sans tête ⑤ permettent de régler la distance entre la plaque de montage ② et le moteur linéaire ③.

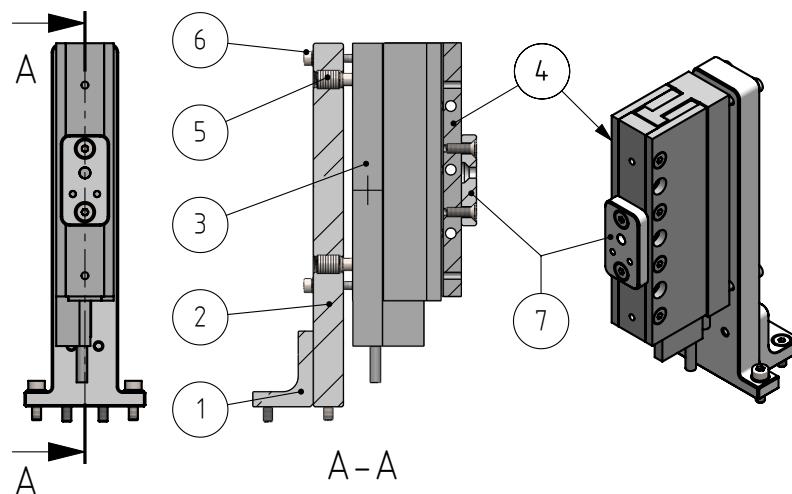


Figure 7.10 – Modélisation de l'implémentation finale du moteur linéaire

5. <https://www.tds-pp.com/en/product/ironless-linear-motors/>

#### 7.4.4 Système de réglage

Ce système de réglage permet d'ajuster facilement la force inverse au système bistable ainsi que la raideur du système linéaire. La force se règle à l'aide de la vis ④ et de l'écrou ⑤ en fonction de la précontrainte appliquée au ressort hélicoïdal ⑥. La vis ④ est centrée et mise en butée contre l'axe de réglage ③, lui même fixé sur la base du système par l'intermédiaire d'une vis ⑦ et maintenu en rotation dans une rainure usinée dans la base. La raideur se règle quant à elle en changeant les caractéristiques du ressort hélicoïdal ⑥ : comme le diamètre du fil, le pas, le nombre de spires, le diamètre moyen ou encore la matière. La raideur du ressort est donnée par les équations (7.1) et (7.2).

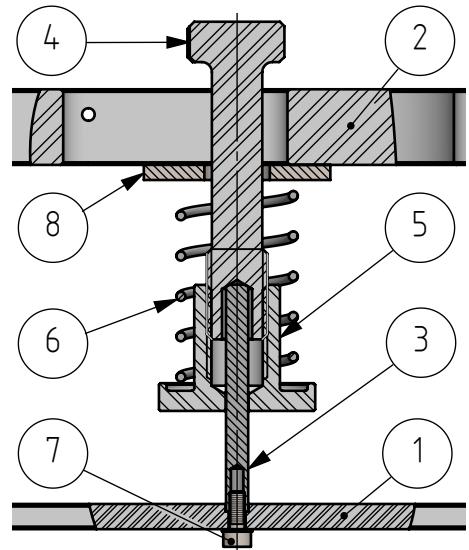


Figure 7.11 – Modélisation du système de réglage de l'implémentation finale

$$k = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n} \quad (7.1)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{ll} k & : \text{Raideur du ressort} & [\text{N/m}] \\ G & : \text{Module de cisaillement eq.(7.2)} & [\text{Pa}] \\ d & : \text{Diamètre du fil} & [\text{m}] \\ D & : \text{Diamètre moyen du ressort} & [\text{m}] \\ n & : \text{Nombre de spires} & [\text{m}] \end{array} \right.$$

$$G = \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)} \cdot E \quad (7.2)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{ll} G & : \text{Module de cisaillement} & [\text{Pa}] \\ \nu & : \text{Coefficient de Poisson} & [-] \\ E & : \text{Module de Young} & [\text{Pa}] \end{array} \right.$$

## 7.4. IMPLEMENTATION FINALE

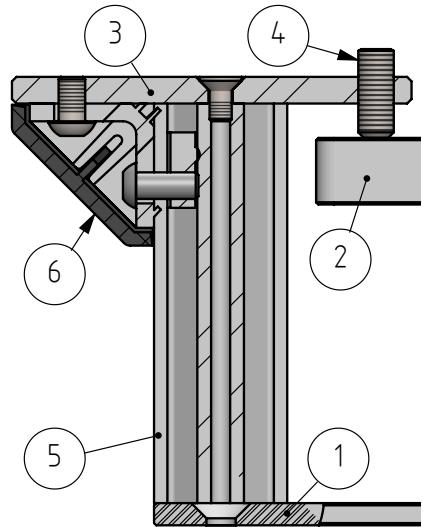
### 7.4.5 Butée

La butée a comme utilité de limiter la course de la partie mobile du système ainsi que de pré-contraindre les systèmes bistables pour limiter l'effort à fournir par les moteurs linéaires lors du démarrage du mouvement. De plus, la butée évite que les chocs en fin de course haute ne soient transmis aux lames flexibles, ce qui les ferait glisser de leur encastrement.

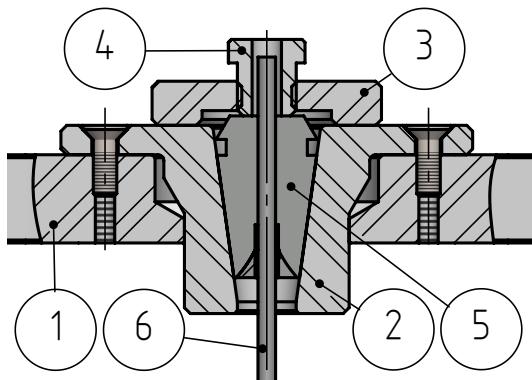
La vis sans tête ④, faisant office de butée réglable, est vissée à plaque de butée ③. Cette dernière est fixée sur un profilé en aluminium ⑤ à l'aide d'une équerre à profilé ⑥ pour assurer la rigidité de l'ensemble.

### 7.4.6 Anchorage du câble

Le système de fixation du câble est inspiré de la version existante du Pendule de Foucault. Il est constitué d'une pince de serrage conique de Ø3 mm ⑤ centrée dans un contre cône ②, lui-même centré et vissé à la base mobile ①. Afin de serrer la pince de serrage ⑤, une bague de serrage ③ est vissée sur le contre cône ② par l'intermédiaire de 4 vis coniques pour permettre à la vis de serrage ④ d'appliquer la force nécessaire au maintien du câble ⑥.



**Figure 7.12 – Modélisation de la butée de l'implémentation finale**



**Figure 7.13 – Modélisation de l'ancrage du câble de l'implémentation finale**



# Chapitre 8

## Mesures

### 8.1 Maquette en compression

Afin de caractériser la maquette, des mesures cycliques en compression ont été réalisées. Celles-ci ont été effectuées en salle C37 de laboratoire de matériaux de la HEIG-VD avec l'aide de Monsieur Pierre Burdet. La maquette a été installée comme sur la Figure 8.1. Les paramètres de mesures sont les suivants :

- Précharge :  $F_{precharge} = 2.0 \text{ [N]}$
- Vitesse :  $v = 10 \text{ [mm/s]}$
- Course :  $\delta = 1 \text{ à } 9 \text{ [mm]}$
- Nombre de cycles :  $N = 8 \text{ [-]}$
- Matière des lames : Acier Inox

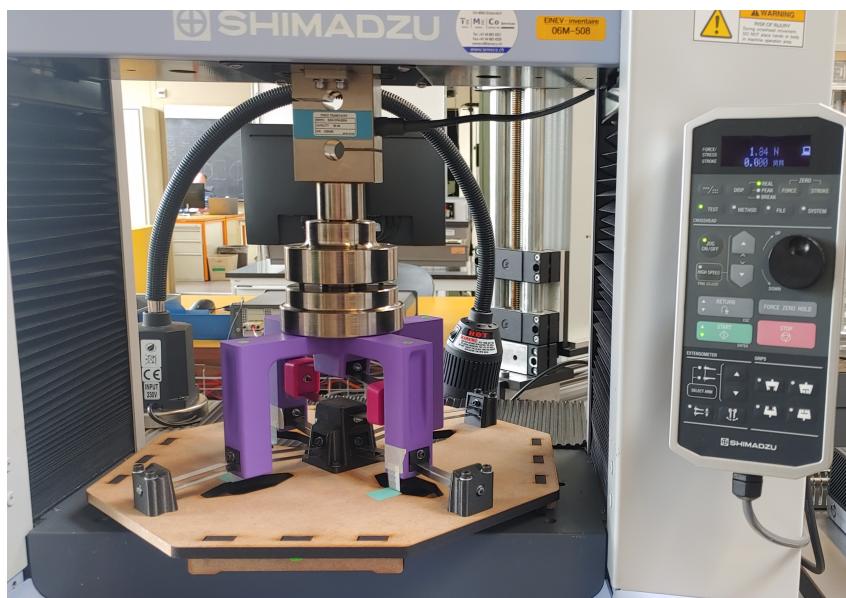


Figure 8.1 – Installation de la maquette pour mesures en compression

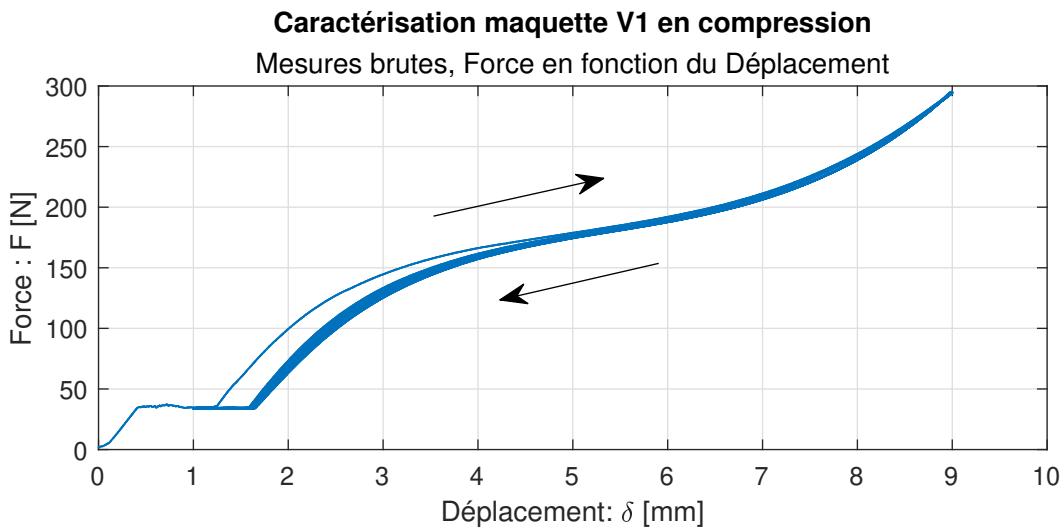


Figure 8.2 – Test cyclique en compression de la maquette, Force en fonction de la Course

Dans le premier graphique (Figure 8.2), on observe une différence notable entre le 1<sup>er</sup> et les autres cycles. Ceci est dû au possible mauvais encastrement des lames durant le 1<sup>er</sup> cycle. Celui-ci s'est amélioré par la suite en raison du réalignement des lames.

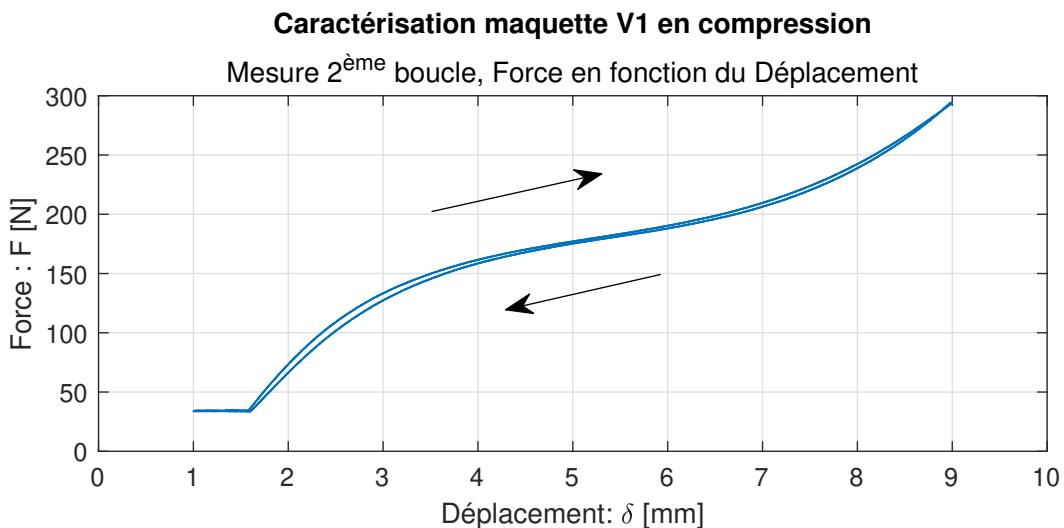
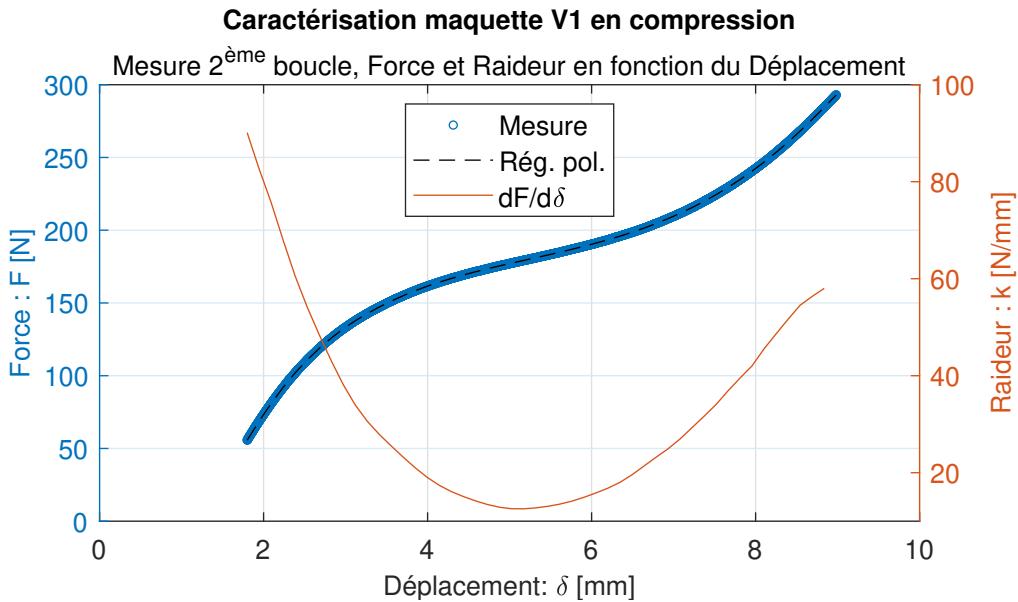


Figure 8.3 – Tests cycliques en compression de la maquette, Force en fonction de la Course, 2<sup>e</sup> boucle

En isolant la 2<sup>e</sup> boucle (Figure 8.3), on observe un phénomène d'hystérèse. La force en compression est plus importante qu'à la remontée au même point de déplacement. Ceci peut être dû à la déformation de la structure en PLA de la maquette.

## 8.2. CÂBLE À SECTION VARIABLE



**Figure 8.4 – Tests cycliques en compression de la maquette, Force et Raideur en fonction du Temps, 2<sup>e</sup>boucle**

En faisant la régression polynomiale de la force en fonction de la course, et en dérivant cette fonction, on obtient la raideur en fonction du déplacement pour la 2<sup>e</sup> boucle (Figure 8.4). On observe une raideur à peine inférieure à 20[N/mm] sur une plage allant de 4 à 6 [mm]. Ceci n'est pas en accord avec les résultats de la simulation réalisée en figure 6.3. Cette disparité peut être expliquée par la déformation du plastique de la structure ainsi que l'absence d'une vis de réglage pour la précharge des systèmes bistables.

## 8.2 Câble à section variable

Dans le but de connaître les limites en traction de la partie sertie du câble, plusieurs échantillons ont été testés :

- 3 échantillons en traction jusqu'à rupture ;
- 3 échantillons en traction cyclique.

Les échantillons sont dimensionnés de sorte à ce qu'ils correspondent à la version finale du câble, comme selon la Figure 5.2 en page 21 avec une longueur de câble de 60 millimètres chacun. (Mise en plan disponible en Annexe A.1).

### 8.2.1 Traction jusqu'à rupture

Les échantillons 1, 2 et 3 (Figure 8.5) ont été testés en traction jusqu'à rupture. Les résultats sont présentés dans le graphique en figure 8.6.

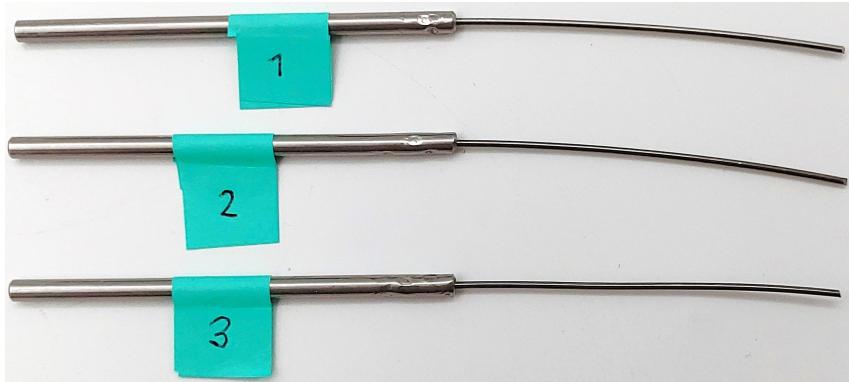


Figure 8.5 – Échantillons 1,2,3

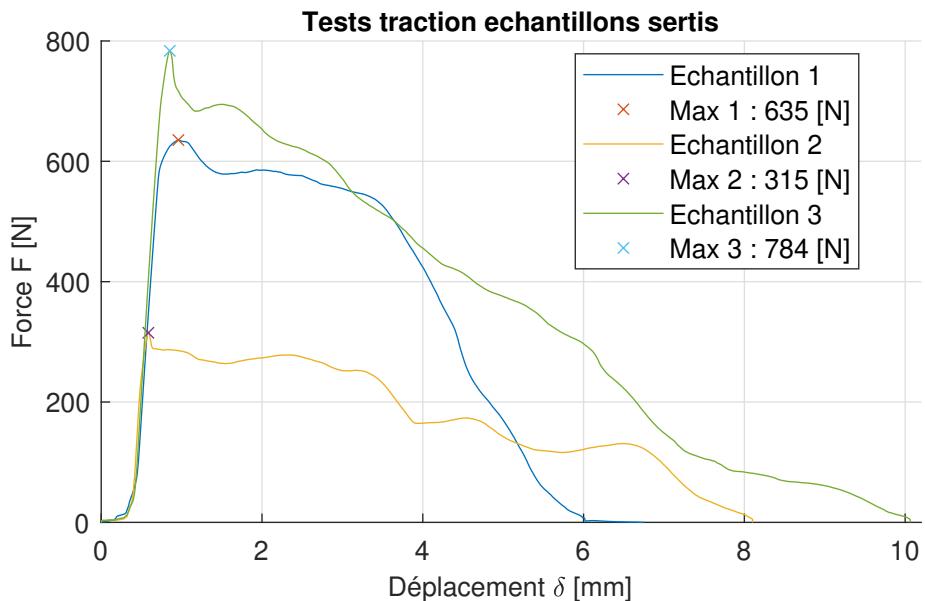


Figure 8.6 – Tests de traction jusqu'à rupture, échantillons 1, 2 et 3

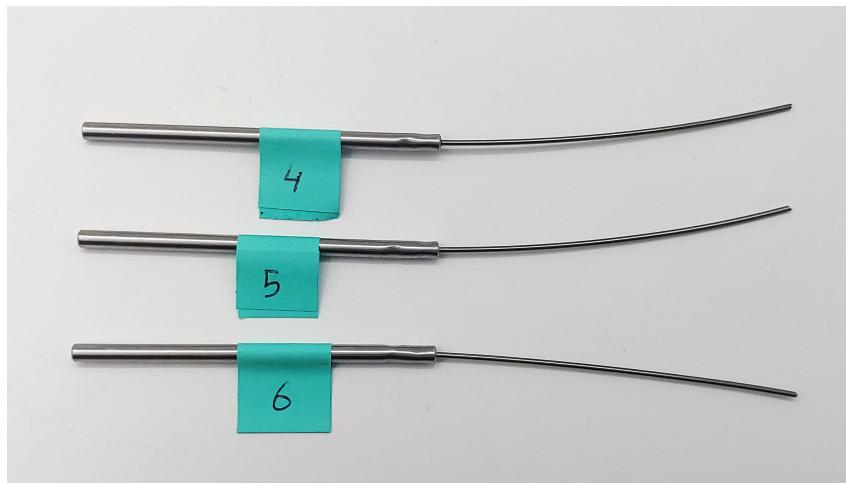
On remarque une certaine disparité dans les résultats, avec 3 maximums de tenue en traction à 635 [N], 315 [N] et 784 [N]. Ceci peut s'expliquer par une différence de qualité de sertissage entre les échantillons, car ceux-ci ont été réalisés à la main. Il sera donc primordial de contrôler la qualité du sertissage pour la version finale du câble.

### 8.2.2 Traction cyclique

Afin de connaître le comportement du sertissage du câble sur le long terme, des tests en traction cyclique ont été réalisés sur les échantillons 4, 5 et 6 (Figure 8.7).

## 8.2. CÂBLE À SECTION VARIABLE

### Échantillon 4



**Figure 8.7 – Échantillons 4,5,6**

Les paramètres des différents tests de traction cyclique sur l'échantillon 4 sont les suivants :

N°	Vitesse [mm/ min]	Consigne inf. [N]	Consigne sup. [N]	Nbr de cycles [-]
ech.4-1	5	200	250	300
ech.4-2	5	200	250	10'000
ech.4-3	5	200	250	44'000
ech.4-4	5	200	300	44'000
ech.4-5	10	200	400	1'800
ech.4-6	20	200	500	1'800
ech.4-7	20	200	600	1'800
ech.4-8	20	200	800	1'800
ech.4-9	40	200	800	1'800
ech.4-10	40	400	800	1'800
ech.4-11	40	400	900	1'800

**Table 8.1 – Paramètres des tests de traction cyclique de l'échantillon 4**

L'ensemble des mesures de l'échantillon 4 sont disponibles en Annexe B.2.1.

Dans les différents graphiques du déplacement en fonction du temps, on observe un phénomène en dent de scie du déplacement. Après discussion avec Monsieur Pierre Burdet, enseignant du cours de matériaux, ceci s'expliquerait par la fréquence d'échantillonnage ainsi que de l'inertie de la machine de test. L'inertie a aussi comme impacte d'appliquer une force maximale supérieure à la consigne.

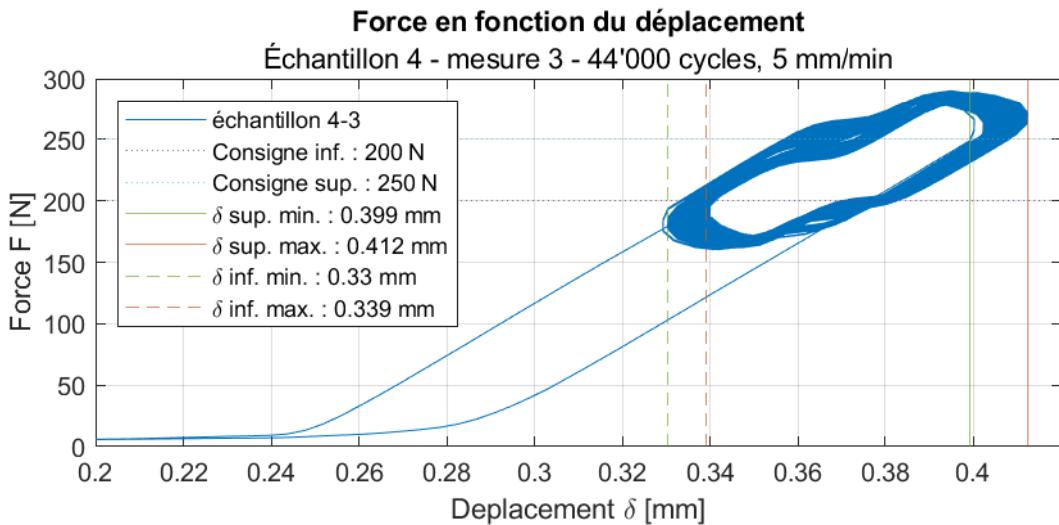


Figure 8.8 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-3, Force en fonction du Déplacement

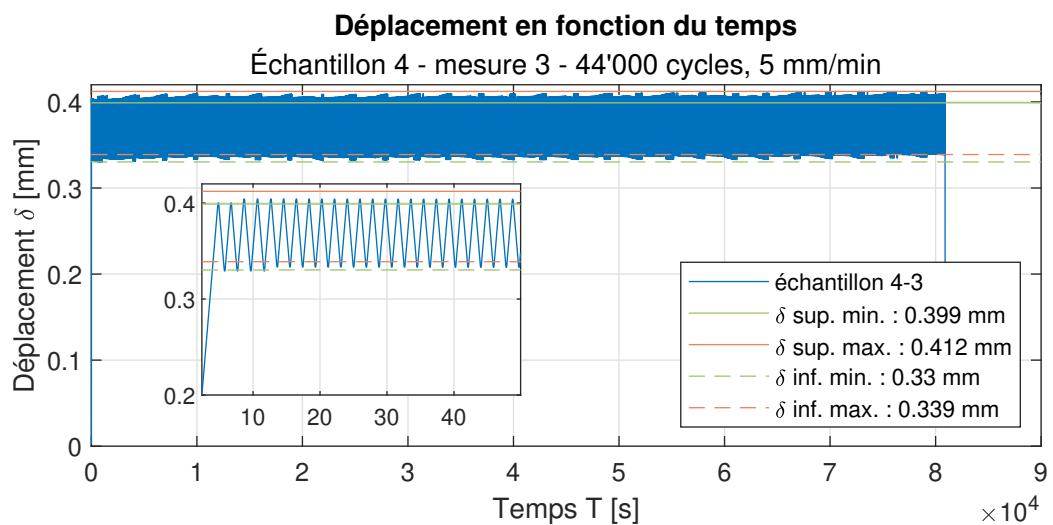
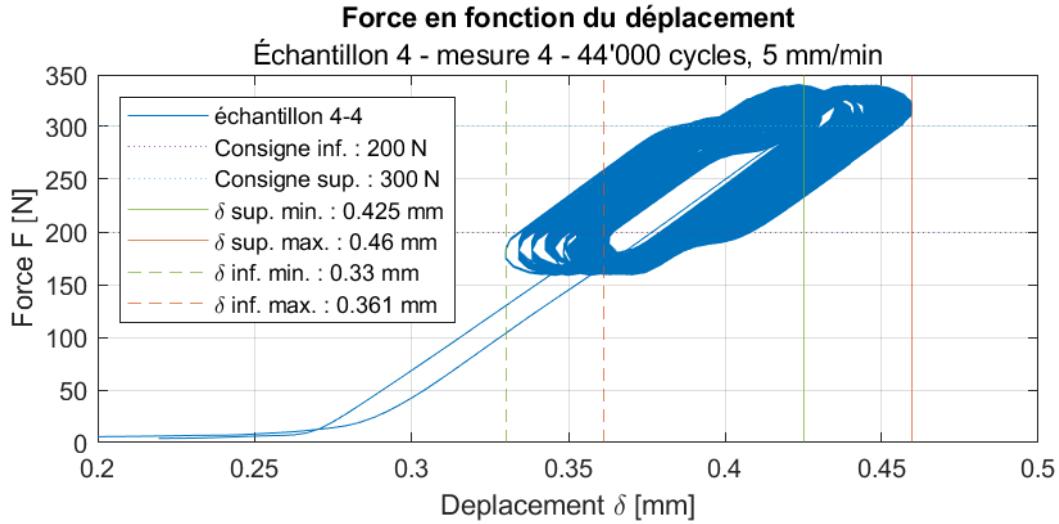


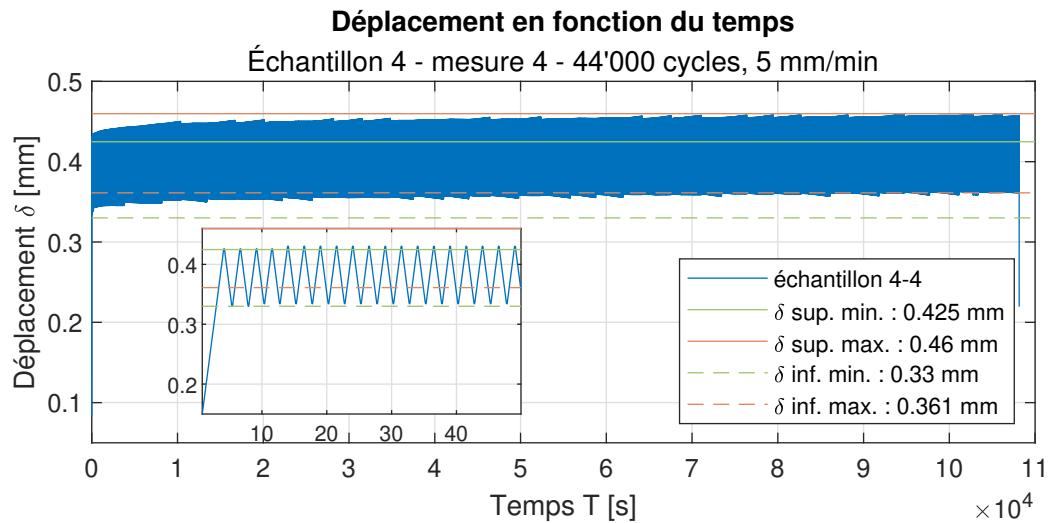
Figure 8.9 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-3, Déplacement en fonction du Temps

On remarque dans la mesure de l'échantillon 4-3 (Figure 8.8 et 8.9) une évolution du déplacement après les 44'000 cycles. Celui-ci passe d'un déplacement inférieur minimal de 0.33 mm à un déplacement inférieur maximal de 0.34 mm ainsi qu'un déplacement supérieur minimal de 0.40 mm à un déplacement supérieur maximal de 0.41 mm. On peut donc en déduire de que l'échantillon s'est allongé de 0.01 mm au niveau du sertissage après 44'000 cycles.

## 8.2. CÂBLE À SECTION VARIABLE

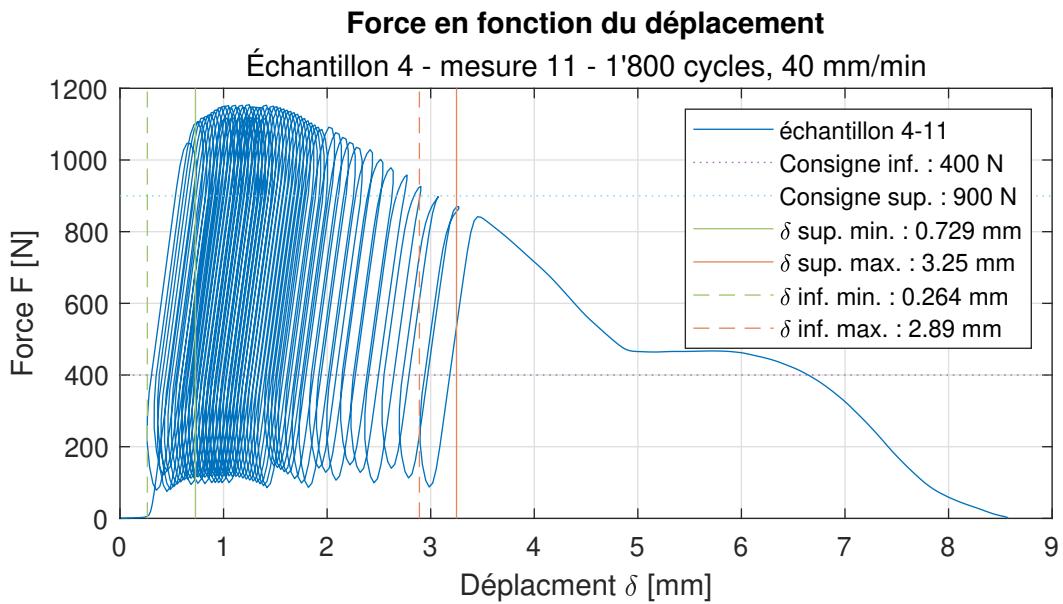


**Figure 8.10 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-4, Force en fonction du Déplacement**

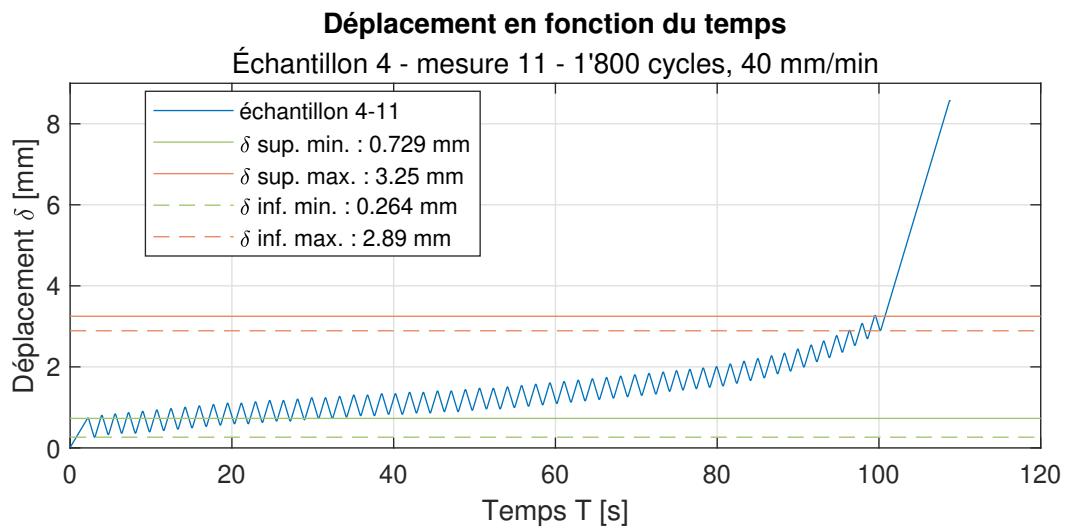


**Figure 8.11 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-4, Déplacement en fonction du Temps**

Dans les figures 8.10 et 8.11, on observe également une évolution du déplacement, celui-ci se décale d'environ 0.03 mm après 44'000 cycles. Cependant, sur la figure 8.11 on constate que l'évolution à tendance à se stabiliser après la moitié des cycles. On peut donc supposer que l'allongement du sertissage à tendance à se stabiliser après un certain nombre de cycles.



**Figure 8.12 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-11, Force en fonction du Déplacement**



**Figure 8.13 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-11, Déplacement en fonction du Temps**

Les figures 8.12 et 8.13 montrent le moment où l'échantillon 4 atteint la rupture en appliquant une consigne de force bien supérieur au cas réel. Ceci permet d'observer un déplacement grandissant jusqu'à la rupture de l'échantillon.

## 8.2. CÂBLE À SECTION VARIABLE

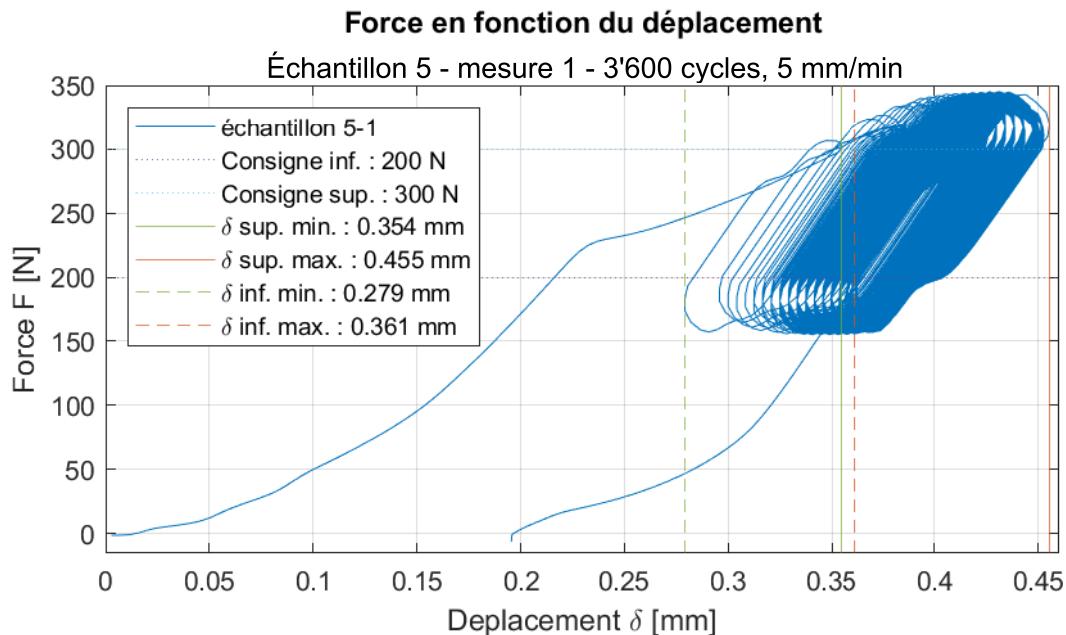
### Échantillon 5

Les paramètres des différents tests de traction cyclique sur l'échantillon 5 sont les suivants :

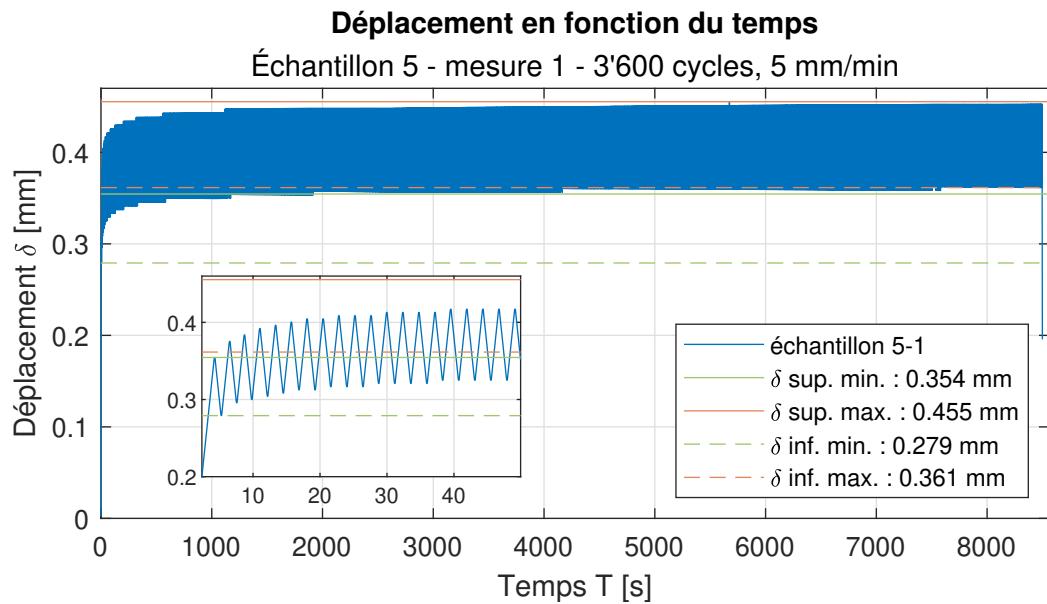
N°	Vitesse [mm/min]	Consigne inf. [N]	Consigne sup. [N]	Nbr de cycles [-]
ech.5-1	5	200	300	3'600
ech.5-2	5	200	300	3'600
ech.5-3	10	200	400	1'800
ech.5-4	5	200	300	100'000
ech.5-5	5	200	300	5'400
ech.5-6	5	200	300	18'000
ech.5-7	10	200	400	3'600
ech.5-8	10	200	500	3'600
ech.5-9	10	200	300	3'600
ech.5-10	5	200	300	18'000
ech.5-11	10	200	600	1'800
ech.5-12	10	200	600	1'800
ech.5-13	10	200	800	670
ech.5-14	10	300	900	1'800

**Table 8.2 – Paramètres des tests de traction cyclique de l'échantillon 5**

L'ensemble des mesures de l'échantillon 5 sont disponibles en Annexe B.2.1 à partir de la figure B.28.

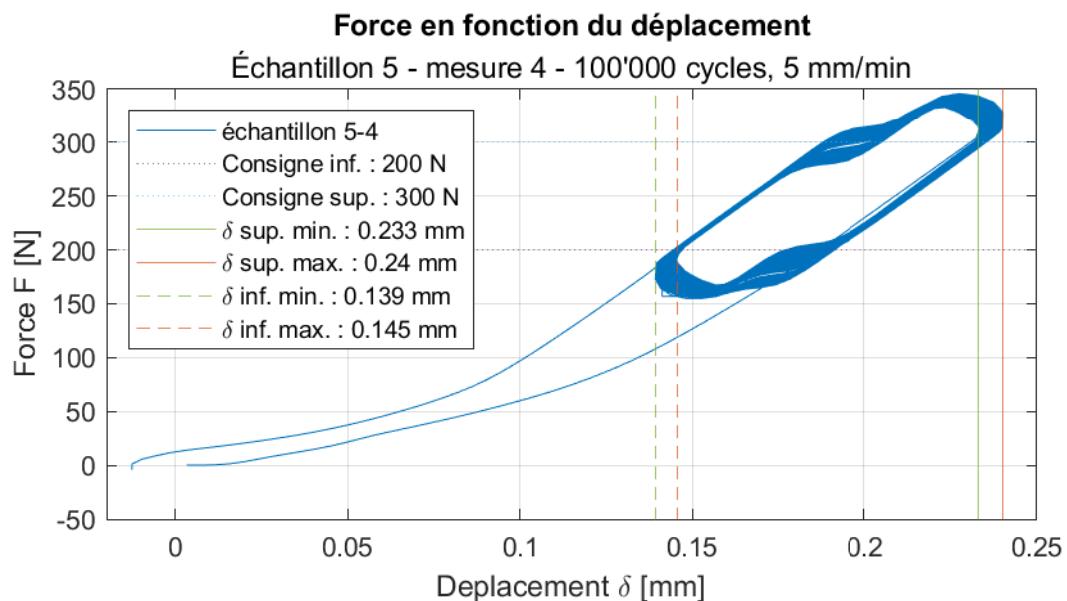


**Figure 8.14 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-1, Force en fonction du Déplacement**



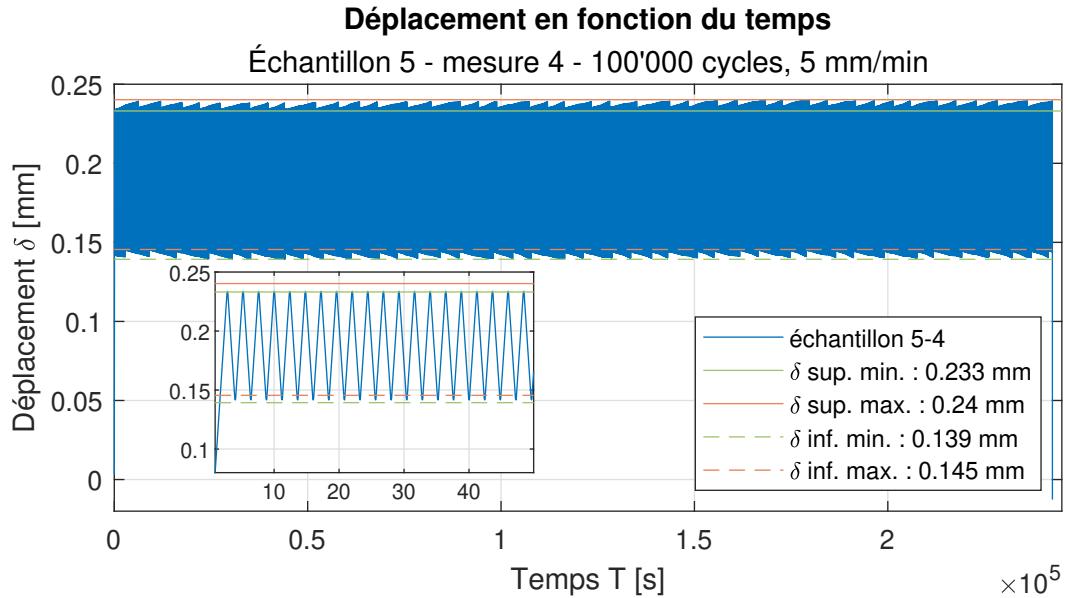
**Figure 8.15 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-1, Déplacement en fonction du Temps**

Dans les figures 8.14 et 8.15, on observe la première mise sous traction de l'échantillon 5. On constate un allongement important lors des premiers cycles et qu'il se avant la fin du premier tier de la mesure.



**Figure 8.16 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-4, Force en fonction du Déplacement**

## 8.2. CÂBLE À SECTION VARIABLE



**Figure 8.17 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-4, Déplacement en fonction du Temps**

La mesure 4 de l'échantillon 5 est particulièrement intéressante, car c'est la mesure en traction cyclique la plus longue avec 100'000 cycles. Grâce à cette mesure on remarque que l'allongement du sertissage n'évolue pratiquement pas, environ  $7\mu\text{m}$ , après 100'000 cycles. On peut donc en déduire que le sertissage du câble est satisfaisant pour une utilisation de longue durée.

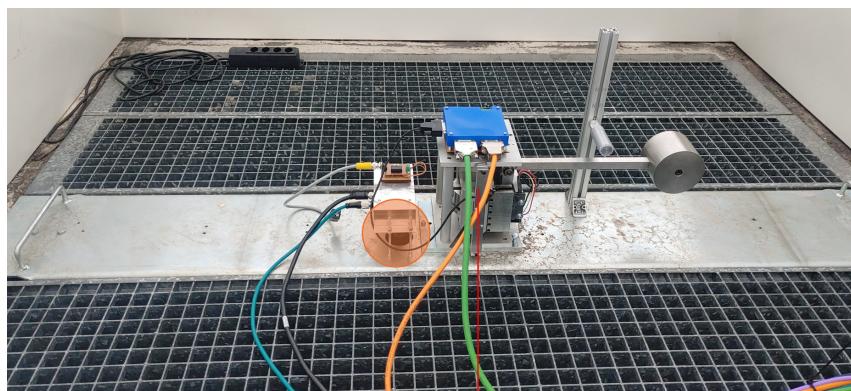
En terme de comparaison, 100'000 cycles correspondent environ à plus de 11 jours de fonctionnement continu à une période 10 secondes par cycle.

### Échantillon 6

Les mesures sur l'échantillon 6 n'ont pas été réalisées pour des raisons de manque de temps de part la durée importante des mesure et de leur traitement.

### 8.3 *Ellipticité du Pendule de Foucault*

Les mesures de l'ellipticité du Pendule de Foucault permettent de comparer si la proposition de Monsieur Georges Derron, c'est à dire d'utiliser un câble de Ø3 mm sur les 2 m à l'ancrage du câble pour reprendre la flexion, résout belle et bien les effets d'anisotropie dû au système de couteaux croisés [DM10]. Les mesures ont été réalisées par Monsieur Adrien Cardinale suite à son travail de Bachelor "Pendule de Foucault de 20 mètres à la HEIG-VD dans sa version 4.0" [Car23]. La position du pendule est mesurée par une caméra fixée sur la planche de maintien du mécanisme d'entretien du pendule qui localise un autocollant orange collé sur le haut de la sphère.



**Figure 8.18 – Localisation de la caméra sur le mécanisme d'entretien du pendule**

### 8.3. ELLIPTICITÉ DU PENDULE DE FOUCAULT

#### 8.3.1 Ellipticité, théorie

L'ellipticité d'une ellipse, aussi appelée excentricité, est définie de la manière suivante :

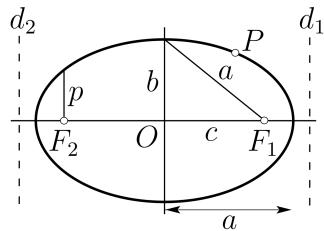


Figure 8.19 – Ellipse [Bac+15]

$$e = \frac{c}{a} < 1 \quad (e = 0 : cercle) \quad (8.1)$$

Avec :

$$\begin{cases} e & : \text{Ellipticité} & [-] \\ a & : \text{Demi-grand axe} & [\text{mm}] \\ c & : \text{Demi-distance focale eq.(8.2)} & [\text{mm}] \end{cases}$$

$$c = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (8.2)$$

Avec :

$$\begin{cases} c & : \text{Demi-distance focale} & [\text{mm}] \\ a & : \text{Demi-grand axe} & [\text{mm}] \\ b & : \text{Demi-petit axe} & [\text{mm}] \end{cases}$$

Ce qui veut dire que plus l'ellipticité est proche de 0, plus l'ellipse est proche d'un cercle et donc inversement, plus l'ellipticité est proche de 1, plus l'ellipse est allongée. Dans notre cas on cherche une ellipticité proche de 1 pour le pendule de Foucault, car cela signifie que l'ellipse est allongée et donc que le pendule oscille dans un plan bien défini.

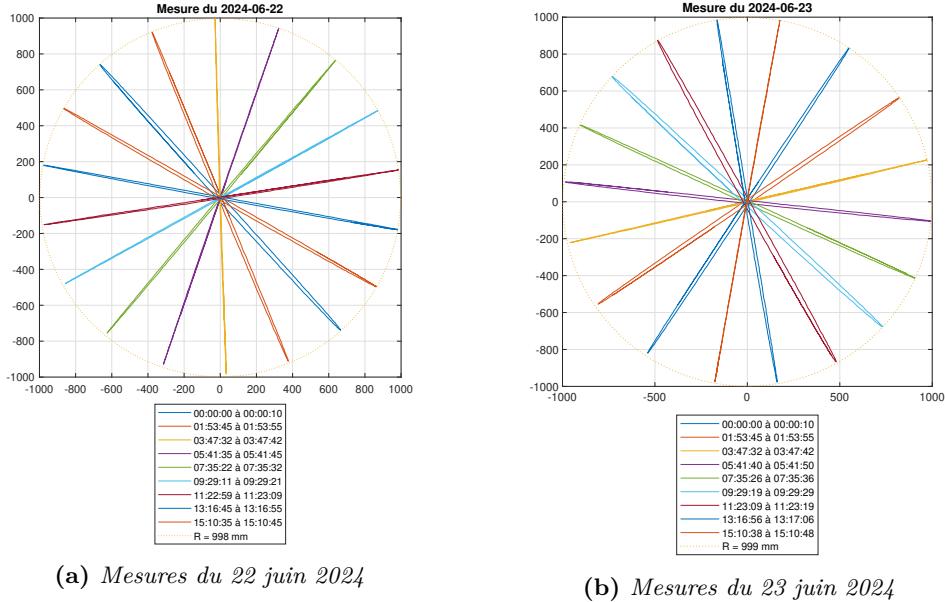
En plus de l'ellipticité, l'angle de l'orientation de l'ellipse est aussi mesuré. Cet angle est défini par l'angle entre l'axe x et le demi-grand axe de l'ellipse. Il ne s'agit donc pas de l'angle du plan d'oscillation du pendule  $\psi$ . Ceci est dû à la fonction MATLAB utilisée `fit_ellipse` [Gal03], qui permet de connaître les paramètres de l'ellipse à partir de points mesurés et qui donne l'angle d'inclinaison de l'ellipse entre le demi-grand axe et l'axe x.

#### 8.3.2 Mesures position x-y

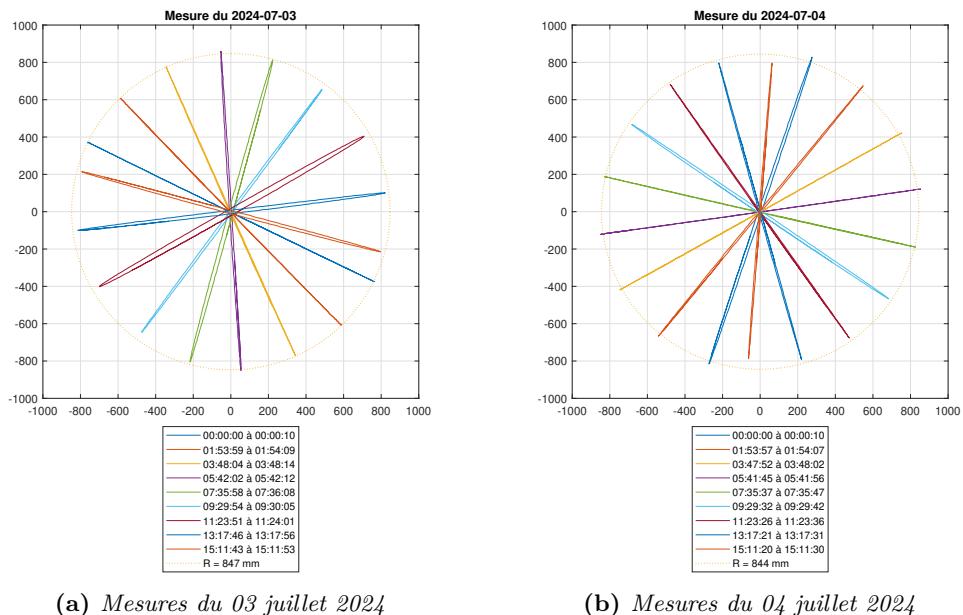
Les mesures du Pendule de Foucault à couteaux croisés datent du 22 et 23 juin 2024, soit juste avant l'installation du câble à section variable et du support monobloc. Les mesures du Pendule de Foucault à câble à section variable datent du 26 juin au 05 juillet, les mesures du 24 et 25 juin sont disponibles

## CHAPITRE 8. MESURES

mais inexploitable car la régulation du pendule a dû être rétablie suite au changement de mécanisme. Les mesures sont disponibles en Annexe B.3.



**Figure 8.20 – Mesure de la position x-y [mm] du pendule de Foucault à couteaux croisés**



**Figure 8.21 – Mesure de la position x-y [mm] du pendule de Foucault à câble à section variable**

Dans les figures 8.20 et 8.21, on remarque premièrement que le rayon de l'amplitude du pendule est significativement réduit. En effet avec le système à couteaux croisés, le rayon de l'amplitude est proche de 1 mètre, alors qu'une fois le système à câble à section variable installé, le rayon de l'amplitude est réduit à moins de 0.85 mètre. Ce phénomène peut s'expliquer par l'effet ressort créé par le câble au niveau de son ancrage.

### 8.3. ELLIPTICITÉ DU PENDULE DE FOUCAULT

Deuxièmement, il est plus difficile d'identifier avec le système de câble à section variable les angles où les ellipses s'élargissent. Alors que pour le système à couteaux croisés, les ellipses s'élargissent à  $\pm 45^\circ$  de l'axe des x.

#### 8.3.3 Mesure ellipticité et angle de l'orientation de l'ellipse

En mesurant l'ellipticité et l'orientation de chaque ellipse lors d'une oscillation du pendule, on peut observer leur évolution au cours du temps. Et ainsi trouver une possible corrélation entre l'ellipticité et l'angle d'orientation de l'ellipse. L'ensemble des mesures de l'ellipticité et de l'angle d'orientation de l'ellipse sont disponibles en Annexe B.3.1.

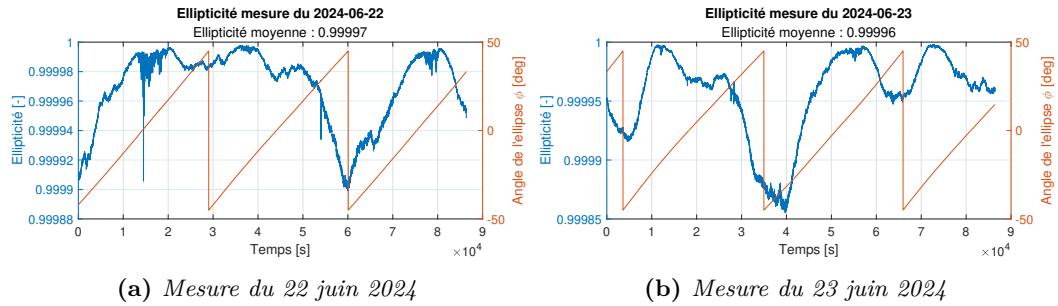


Figure 8.22 – Ellipticité du Pendule de Foucault à couteaux croisés

Pour la version du pendule à couteaux croisés, figures 8.22, on remarque une chute de l'ellipticité tout les  $90^\circ$ , et une fois sur deux cette chute est plus importante. Ceci est dû à l'effet de l'anisotropie du système à couteaux croisés lors de l'alignement du plan d'oscillation du pendule avec l'axe des x et l'axe des y. De plus l'état instable du mécanisme dû au point d'ancrage supérieur aux points de pivotements des couteaux croisés, peut venir ajouter des perturbations.

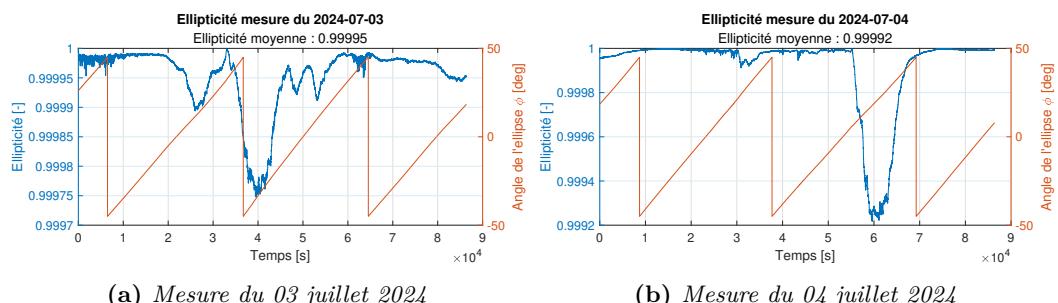
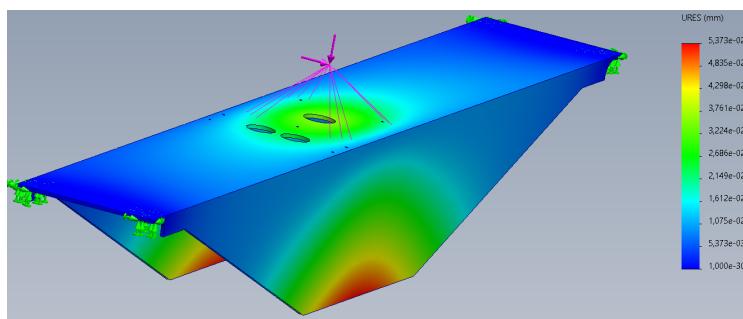


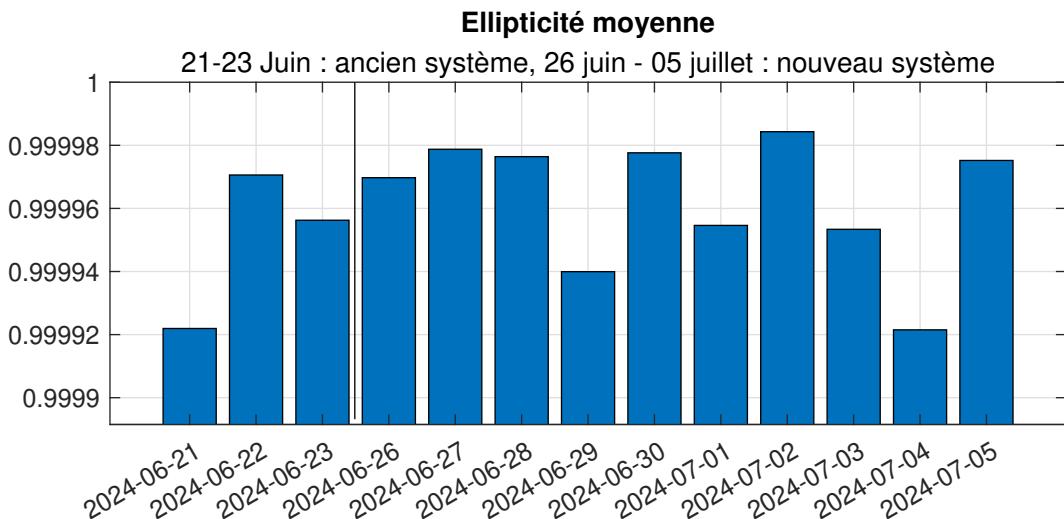
Figure 8.23 – Ellipticité du Pendule de Foucault à câble à section variable

Contrairement au système à couteaux croisés, il est plus difficile d'identifier un lien entre l'angle et l'ellipticité pour les mesures de l'ellipticité du pendule à câble à section variable, figures 8.23. En effet, la chute de l'ellipticité n'a pas l'air d'être en phase avec l'évolution de l'angle de l'ellipse. Ce phénomène peut être dû à l'ancrage rigide du câble au niveau du mécanisme d'entretien. Vu qu'aucun mécanisme ne reprend le moment de flexion du câble, celui-ci est

transmis dans la planche de fixation du mécanisme, donc cette dernière pourrait se déformer. Une déformation de la planche serait problématique car tout le système de vison est fixé à cette planche. Il suffirait d'une déformation de seulement quelque microns pour impacter les mesures de quelque centimètres. Cependant, une rapide simulation par éléments finis du système de fixation du câble montre que la déformation de la planche est négligeable, voir figure 8.24. De plus, des mesures au palpeur micromètre ont été réalisées lors du fonctionnement du pendule et n'ont pas montré de déformation de la planche de fixation du mécanisme d'entretien.



**Figure 8.24 – Simulation par éléments finis de la déformation de la planche de fixation du mécanisme d'entretien**



**Figure 8.25 – Ellipticité moyenne par jour, 21-23 juin : couteaux croisés, 26 juin - 05 juillet : câble à section variable**

En comparant les ellipticités, il est difficile de dire si le câble à section variable a un impact significatif sur l'ellipticité du pendule. Pour cela, il faudrait réaliser d'avantage de mesures et analyser à nouveau les résultats.

Cependant après une discussion avec Monsieur Adrien Cardinale, auteur du précédent TB sur le Pendule de Foucault [Car23], il énonçait comme hypothèse que ce défaut pourrait venir du lancement initial du pendule et qu'il faudrait attendre d'avantage pour que le pendule puisse se stabiliser. Il est donc pos-

#### 8.4. PROTOTYPE BISTABLE

sible que les mesures de l'ellipticité du pendule à câble à section variable ne soient pas représentatives de son comportement final.

#### 8.4 Prototype bistable

Dans un but de caractériser expérimentalement le comportement bistable du système, un prototype a été conçu. Malheureusement, ce dernier n'a pas été fabriqué à temps pour effectuer toutes les mesures. Les mesures prévues pour des clinquants en Inox ainsi que pour des lames en CuBe2 étaient les suivantes :

	$d_a$ [mm]	$d_b$ [mm]	$d_c$ [mm]	$L_a$ [mm]	$L_b$ [mm]	$L_c$ [mm]
$h_a$ [mm]	0,1	5	8	12	45	50
$h_b$ [mm]	0,2	5	8	12	45	50
$h_c$ [mm]	0,3	5	8	12	45	50
$h_d$ [mm]	0,4	5	8	12	45	50
$h_e$ [mm]	0,5	5	8	12	45	50

**Table 8.3 – Plan d'expérience pour prototype bistable,  $h$  : épaisseur de la lame,  $d$  : largeur de la lame,  $L$  : longueur de la lame**

Ces mesures auraient permis de caractériser le comportement bistable et ainsi de connaître les paramètres optimaux de conception pour le système bistable, notamment la force nécessaire pour changer d'état, les raideurs et la course du système.

Cependant, une seule configuration a pu être mesurée à temps une fois le prototype du bistable fabriqué et assemblé. Les mesures en compression ont été réalisées sur une machine de test *Shimadzu* au laboratoire de matériaux de la HEIG-VD.



**Figure 8.26 – Mesure du prototype bistable**

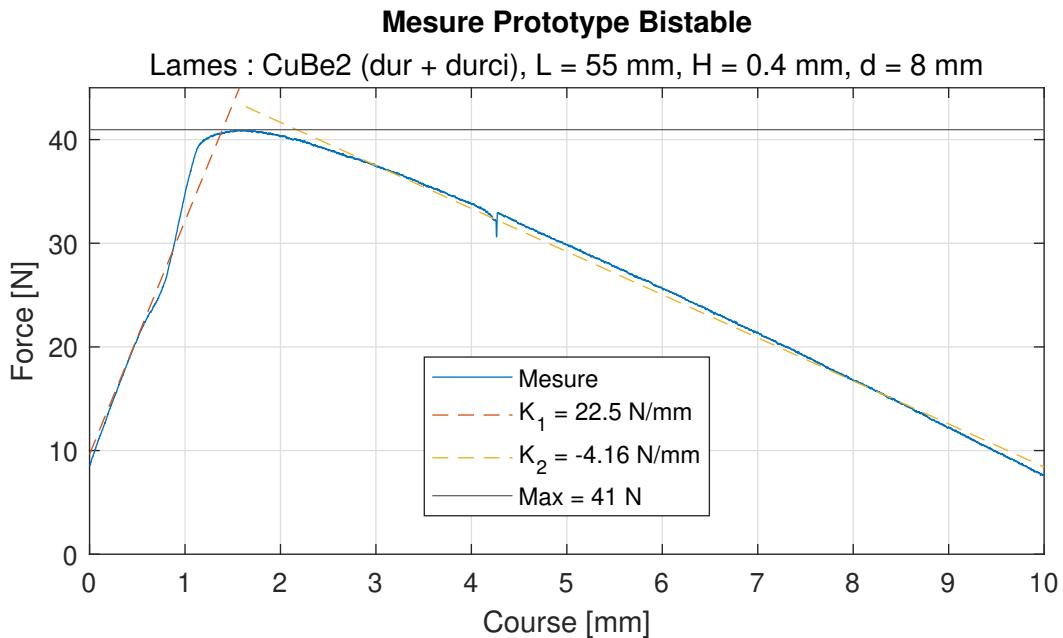


Figure 8.27 – Mesure de la force en fonction de la course du prototype bistable

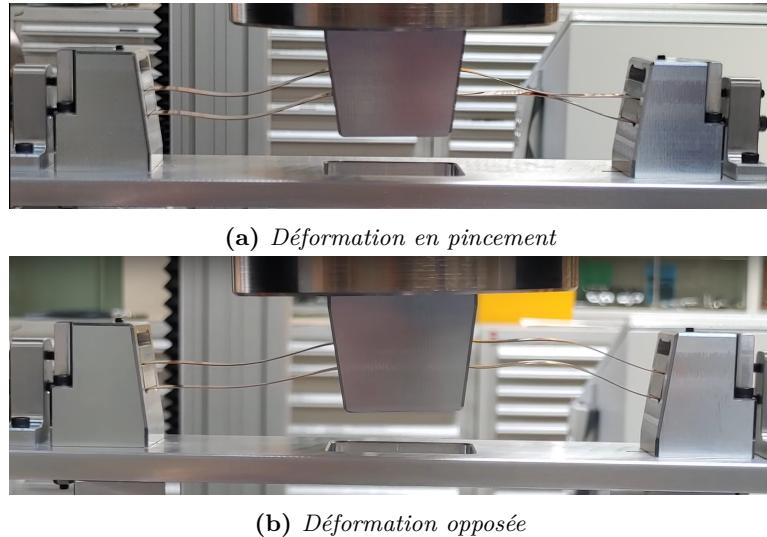
Dans la figure 8.27, il est représenté la mesure du prototype bistable assemblé avec des lames aux propriétés suivantes : matière : CuBe2 dur+durci, longueur utile : 55 mm, largeur : 8 mm et épaisseur : 0.4 mm.

On peut observer la linéarité recherchée du système bistable, ainsi que la force nécessaire au changement d'état à 41 N. De plus, en effectuant la régression linéaire de la force en fonction de la course, on obtient les raideurs des 2 zones distinctes du système, soit : 22.5 N/mm pour la 1<sup>re</sup> zone et -4.16 N/mm pour la 2<sup>de</sup> zone. On peut aussi mesurer le déplacement entre la position haute et la position basse qui est de 20 mm.

En comparaison avec les simulations BCM au chapitre 6.1, on remarque que la force mesurée nécessaire au changement d'état est quatre fois plus petite que la force simulée. Ce qui est cohérent, car la simulation prend en compte 4 système bistable. Cependant, la raideur simulée de la 1<sup>re</sup> zone est bien plus importante que la raideur mesurée. Ceci pourrait s'expliquer par d'éventuels glissements des lames au niveau de leurs encastrements.

#### 8.4. PROTOTYPE BISTABLE

Lors des mesures, il a été observé que le prototype bistable n'avait pas un comportement idéal. En effet, les lames se déformaient de manière aléatoire lors de la compression, comme illustré aux figures 8.28.



**Figure 8.28 – Déformation aléatoire des lames lors de la compression**

Un tel comportement peut être dû à un mauvais maintien de la tête mobile du bistable. En effet, dans le cas de ces mesures, la tête n'est pas guidée et possède donc un degré de liberté en rotation et peut donc influencer la manière dont les lames se déforment. Il serait donc intéressant de trouver un moyen de maintenir la tête du bistable lors des prochaines mesures.

Un autre comportement problématique à lieu lors du retour en position haute du bistable. En effet, si la tête du bistable n'est pas amortie lors de son retour, les lames peuvent légèrement glisser de leur encastrement et ainsi ajouter une précontrainte au système. Ceci peut facilement être éviter si la tête est maintenue lors de son retour en position haute. Il faudra donc prendre cette problématique en compte lors de son implémentation finale en prévoyant un système de butée pour la tête du bistable qui évitera toutes tensions dans les lames des bistables.



# Chapitre 9

## Conclusion

### 9.1 Câble à section variable

Le sertissage du câble à section variable a été réalisé avec succès. Les tests de traction jusqu'à rupture ont montré que la partie sertie du câble supportera la charge de 20 kg. De plus, la tenue sur le long terme a aussi été testée et les résultats sont satisfaisants. L'élongation de  $7\mu\text{m}$  au bout de 100'000 cycles garanti le bon fonctionnement du câble.

Quant à l'amélioration de l'ellipticité, celle-ci reste à être approfondie avec des mesures plus récentes, une fois le pendule stabilisé.

### 9.2 Maquette

En l'état, la maquette du pendule de Foucault n'est pas satisfaisante. En effet, les mesures en compression démontrent que le plateau à raideur nulle ne correspond pas à la simulation. Comme évoqué au chapitre 8.1, la déformation de la structure en plastique réduit considérablement l'effet recherché. De plus, l'absence de réglage pour les bases des bistables rend impossible l'ajustement de la précontrainte des lames flexibles. Ce qui est un paramètre primordial au bon fonctionnement du système.

De plus, la raideur quasi-nulle n'est pas atteinte sur une plage de déplacement suffisante.

Cette maquette a permis de se rendre compte de la nécessité d'un système plus rigide et réglable.

### 9.3 Prototype bistable

La conception du prototype bistable a été réalisée. Il a pu être fabriqué et assemblé juste à temps pour les premières mesures d'une configuration. Les premiers tests montrent le comportement bistable recherché malgré de possibles comportements non désirés des lames si la tête du bistable n'est pas bien guidée et maintenue. Les premiers tests ont aussi mis en lumière la nécessité d'une butée pour la tête du bistable afin d'éviter une tension dans les

lames lors du retour en position haute et qui causerait un glissement aux encastrements des lames.

Quant à l'analyse des mesures, celle-ci nous informe que la linéarité de la raideur est respectée et que la force au changement d'état est conforme à la simulation BCM. Il faudra donc encore réaliser les différentes mesures des configurations des lames pour ainsi connaître les paramètres optimaux.

#### ***9.4 Implémentation finale***

La conception d'une proposition de l'implémentation avec des guidages flexibles a été réalisée. Celle-ci reste à être adaptée en fonction des résultats des tests du prototype bistable. Les adaptations nécessaires seront les dimensions des lames flexibles des systèmes bistables et les dimensions des ressorts de réglages. Il restera donc à simuler les raideurs dans les différentes directions pour garantir le bon fonctionnement du système.

Evan Rochat

# Bibliographie

- [Hen00] Simon HENEIN. « Conception des structures articulées à guidages flexibles de haute précision ». In : (2000), p. 226. DOI : <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-2194>. URL : <http://infoscience.epfl.ch/record/32670> (cf. p. 6, 11, 12, 17, 18, 31).
- [DM02] Yves DE ROP et Olivier MOREAU. « La précession du plan d'oscillation du pendule de Foucault : une approche géométrique intuitive ». French. In : *Revue des Questions Scientifiques* 173.3 (2002). ISSN : 0035-2160 (cf. p. 2).
- [Gal03] Ohad GAL. *fit\_ellipse - File Exchange - MATLAB Central*. [https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3215-fit\\_ellipse](https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3215-fit_ellipse). (Accessed on 07/23/2024). Oct. 2003 (cf. p. 49).
- [Hen+03] Simon HENEIN et al. « Flexure pivot for aerospace mechanisms ». In : *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP* (jan. 2003) (cf. p. 6).
- [HM04] Larry L. HOWELL et Spencer P. MAGLEBY. *Substantially constant-force exercise machine*. US7060012B2. Avr. 2004. URL : <https://patents.google.com/patent/US7060012B2> (cf. p. 12, 13, 17).
- [DM10] Georges DERRON et Freddy MUDRY. « Notes sur l'entretien des oscillations d'un pendule ». In : (2010), p. 11. URL : [https://freddy.mudry.org/public/Divers/pf\\_gdn\\_2.pdf](https://freddy.mudry.org/public/Divers/pf_gdn_2.pdf) (cf. p. 1, 5, 48).
- [Cos13] Florent COSANDIER. « Conception d'axes motorisés rectilignes d'ultra-haute précision ». In : (2013). Title transl. in English : Conception of Ultra-High Straightness Motorized Linear Axis. DOI : <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-5665>. URL : <http://infoscience.epfl.ch/record/183915> (cf. p. 12, 17).
- [Bac+15] M.-Y. BACHMANN et al. *CRM Commissions romandes de mathématique, de physique et de chimie*. Sous la dir. de Éditions G d'ENCRE. CRM Diffusion, 2015 (cf. p. 49).
- [TS16] O. A. TURKKAN et H.-J. SU. « DAS-2D : a concept design tool for compliant mechanisms ». In : *Mechanical Sciences* 7.2 (2016), p. 135-148. DOI : <10.5194/ms-7-135-2016>. URL : <https://ms.copernicus.org/articles/7/135/2016/> (cf. p. 23).
- [Kup+20] Reinier KUPPENS et al. « Compliant Mechanisms That Use Static Balancing to Achieve Dramatically Different States of Stiffness ». In : *Journal of Mechanisms and Robotics* 13 (déc. 2020), p. 1-9. DOI : <10.1115/1.4049438> (cf. p. 14).
- [MET20] METAS. *Les zones de gravité en Suisse*. [En ligne ; Page disponible le 6-Juin-2024]. Août 2020. URL : <https://www.metas.ch/metas/fr/home/dok/gravitationszonen.html> (cf. p. 2).

## BIBLIOGRAPHIE

- [Zho+20] Z. ZHOU et al. « A bistable mechanism with linear negative stiffness and large in-plane lateral stiffness : design, modeling and case studies ». In : *Mechanical Sciences* 11.1 (2020), p. 75-89. DOI : [10.5194/ms-11-75-2020](https://doi.org/10.5194/ms-11-75-2020). URL : <https://ms.copernicus.org/articles/11/75/2020/> (cf. p. 13, 17, 18, 21, 25, 28).
- [HZ21] Stefan HENNING et Lena ZENTNER. « Analysis of planar compliant mechanisms based on non-linear analytical modeling including shear and lateral contraction ». In : *Mechanism and Machine Theory* 164 (2021), p. 104397. ISSN : 0094-114X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104397>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X21001555> (cf. p. 23).
- [Goo22] GOOGLE. *Google Earth*. [En ligne ; Page disponible le 6-Juin-2024]. Juill. 2022. URL : <https://earth.google.com/web/@46.77953501,6.65981577,449.62109327a,149.52971442d,35y,0.00000001h,44.99586422t,360r/data=0gMKATA> (cf. p. 2).
- [Tis+22] Loïc Benoît TISSOT-DAGUETTE et al. « Rectilinear translation four-bar flexure mechanism based on four Remote Center Compliance pivots ». In : *Proceedings of the 22nd International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology* (2022), p. 4. URL : <http://infoscience.epfl.ch/record/294557> (cf. p. 14).
- [Wik22] WIKIPÉDIA. *Pendule pesant — Wikipédia, l'encyclopédie libre*. [En ligne ; Page disponible le 18-juillet-2022]. 2022. URL : [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pendule\\_pesant&oldid=195416238](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pendule_pesant&oldid=195416238) (cf. p. 3).
- [Car23] Adrien CARDINALE. *Pendule de Foucault de 20 mètres à la HEIG-VD dans sa version 4.0*. <https://tb.heig-vd.ch/7904>. (Accessed on 07/23/2024). Juill. 2023 (cf. p. 48, 52).
- [Wik23a] WIKIPÉDIA. *Jour pendulaire — Wikipédia, l'encyclopédie libre*. [En ligne ; Page disponible le 6-septembre-2023]. 2023. URL : [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Jour\\_pendulaire&oldid=207643479](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Jour_pendulaire&oldid=207643479) (cf. p. 3).
- [Wik23b] WIKIPÉDIA. *Période de rotation — Wikipédia, l'encyclopédie libre*. [En ligne ; Page disponible le 27-novembre-2023]. 2023. URL : [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=P%C3%A9riode\\_de\\_rotation&oldid=210049398](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=P%C3%A9riode_de_rotation&oldid=210049398) (cf. p. 3).
- [Wik24a] WIKIPÉDIA. *Pendule de Foucault — Wikipédia, l'encyclopédie libre*. [En ligne ; Page disponible le 29-mai-2024]. 2024. URL : [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pendule\\_de\\_Foucault&oldid=215485560](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pendule_de_Foucault&oldid=215485560) (cf. p. 1, 2).
- [Wik24b] WIKIPÉDIA. *Rotation de la Terre — Wikipédia, l'encyclopédie libre*. [En ligne ; Page disponible le 30-mars-2024]. 2024. URL : [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Rotation\\_de\\_la\\_Terre&oldid=213800746](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Rotation_de_la_Terre&oldid=213800746) (cf. p. 2).

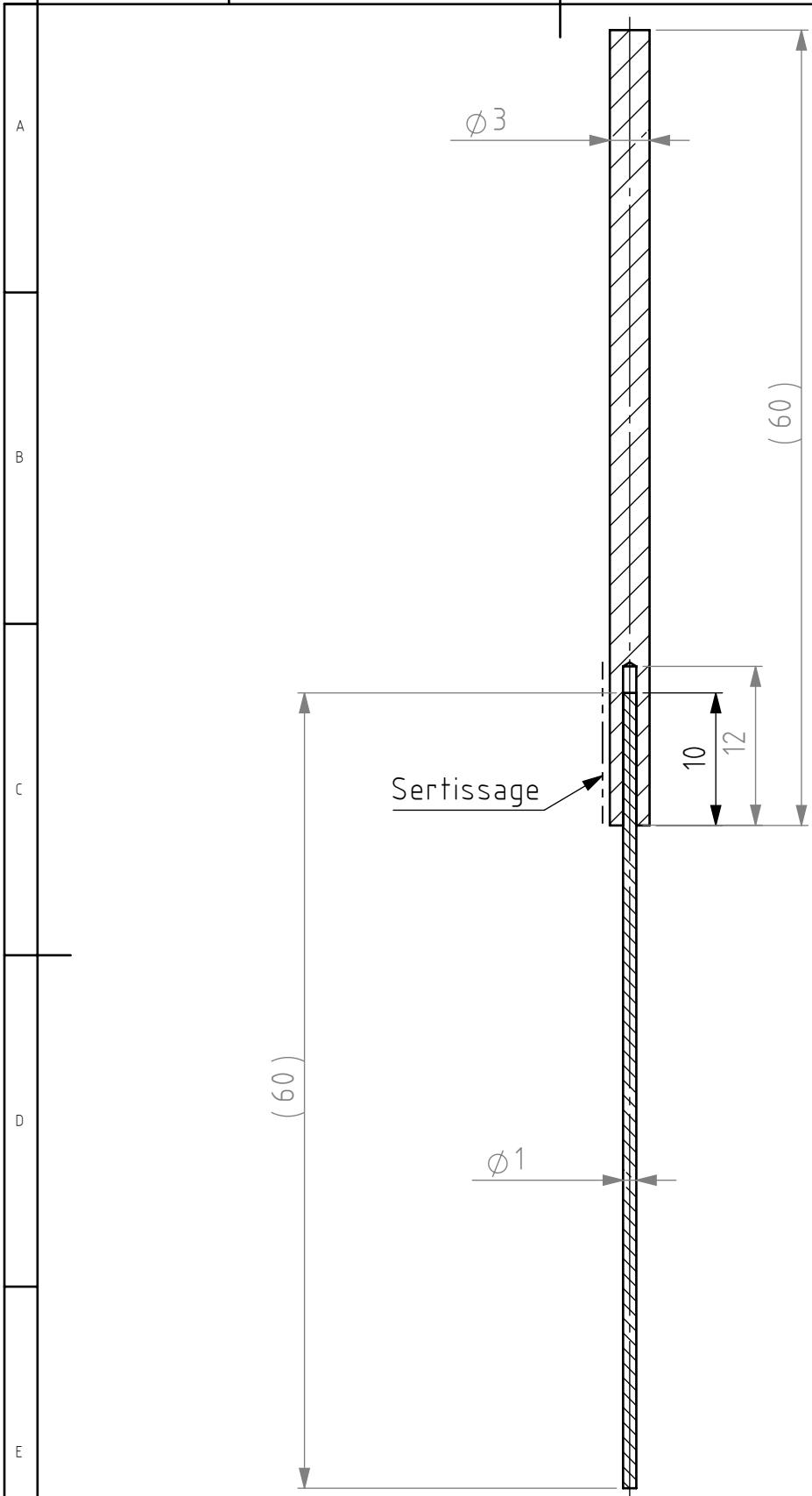
## **Annexes**



## Annexe A

### Mises en plan

#### *A.1 Échantillon sertissage*



Tolérances générales ISO 2768-  
Pièces maîtresses ISO 8062-C1  
Symboles de soudure ISO 2553  
Procédé de soudage  
Tol. gén de soudure ISO 13920-  
Pression d'essai

Finition:

Rayons non cotés R  
Chanfreine

Revision:

**HE**<sup>VD</sup> **HAUTE ÉCOLE**  
**HG** **D'INGÉNIERIE**  
**ET DE GESTION**  
**DU CANTON**  
**DE VAUD**

Dénomination:

## Echantillon Sertissage - Test Traction

	Nom	Signature	Date	
Dessiné	Rochat Evan		05.06.2024	
Contrôlé				
Conf. normes				

				Matériau :

Nom du fichier (Dessin)  
Assemblage\_echantillon\_sertissage



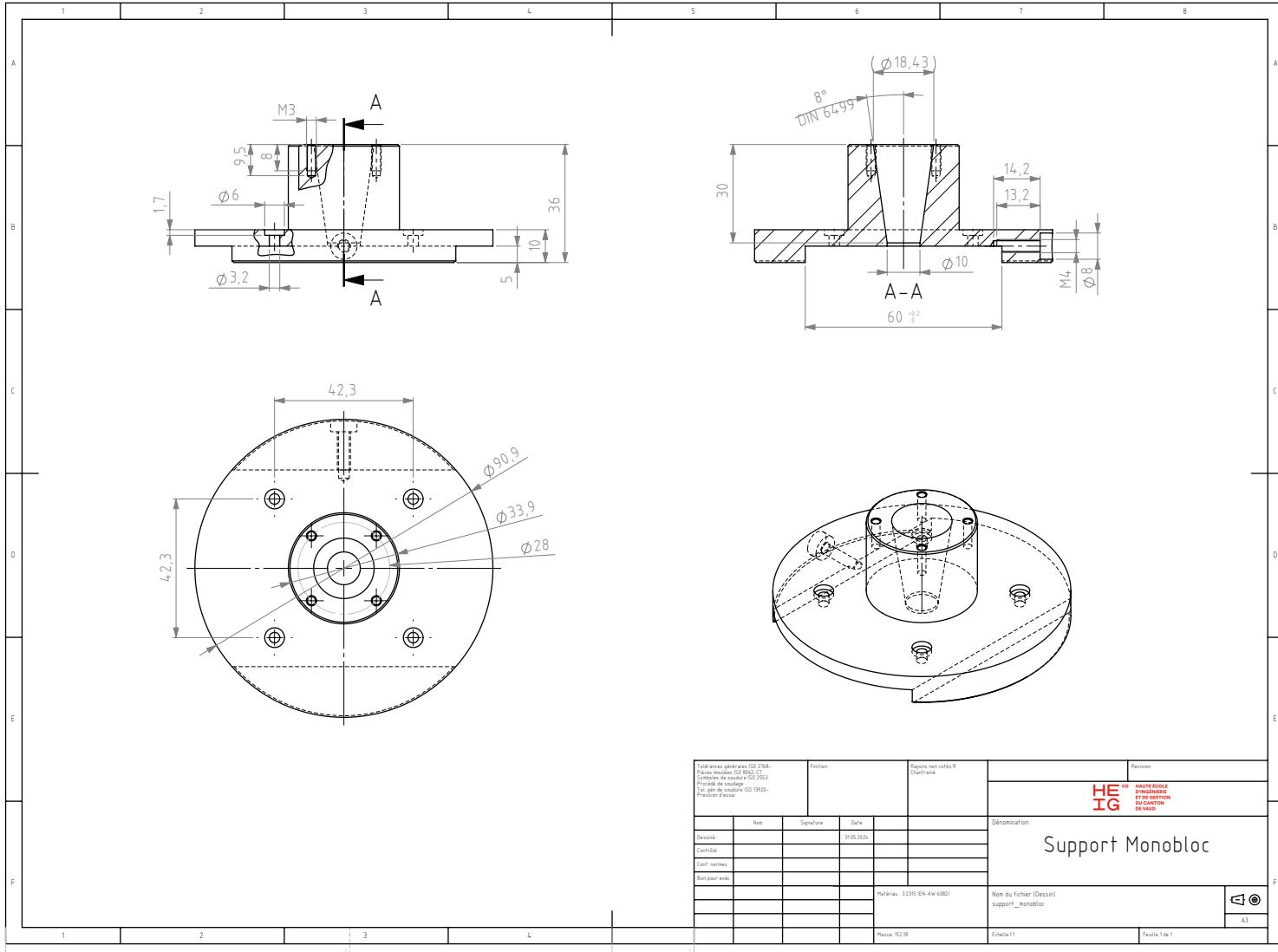
A4

Echelle: 2:1

Feuille 1 de 1

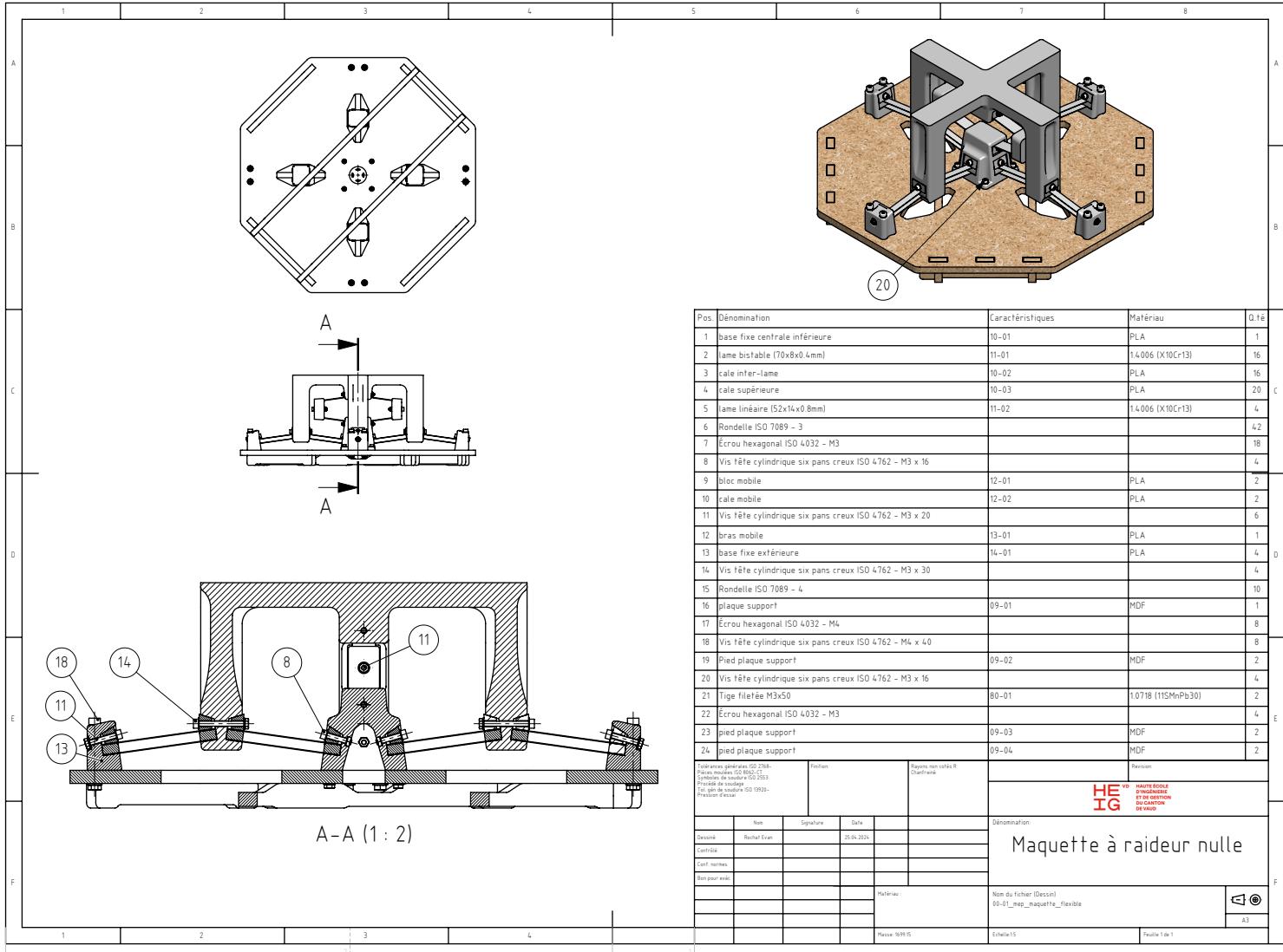
A.2. SUPPORT MONOBLOC

*A.2 Support monobloc*



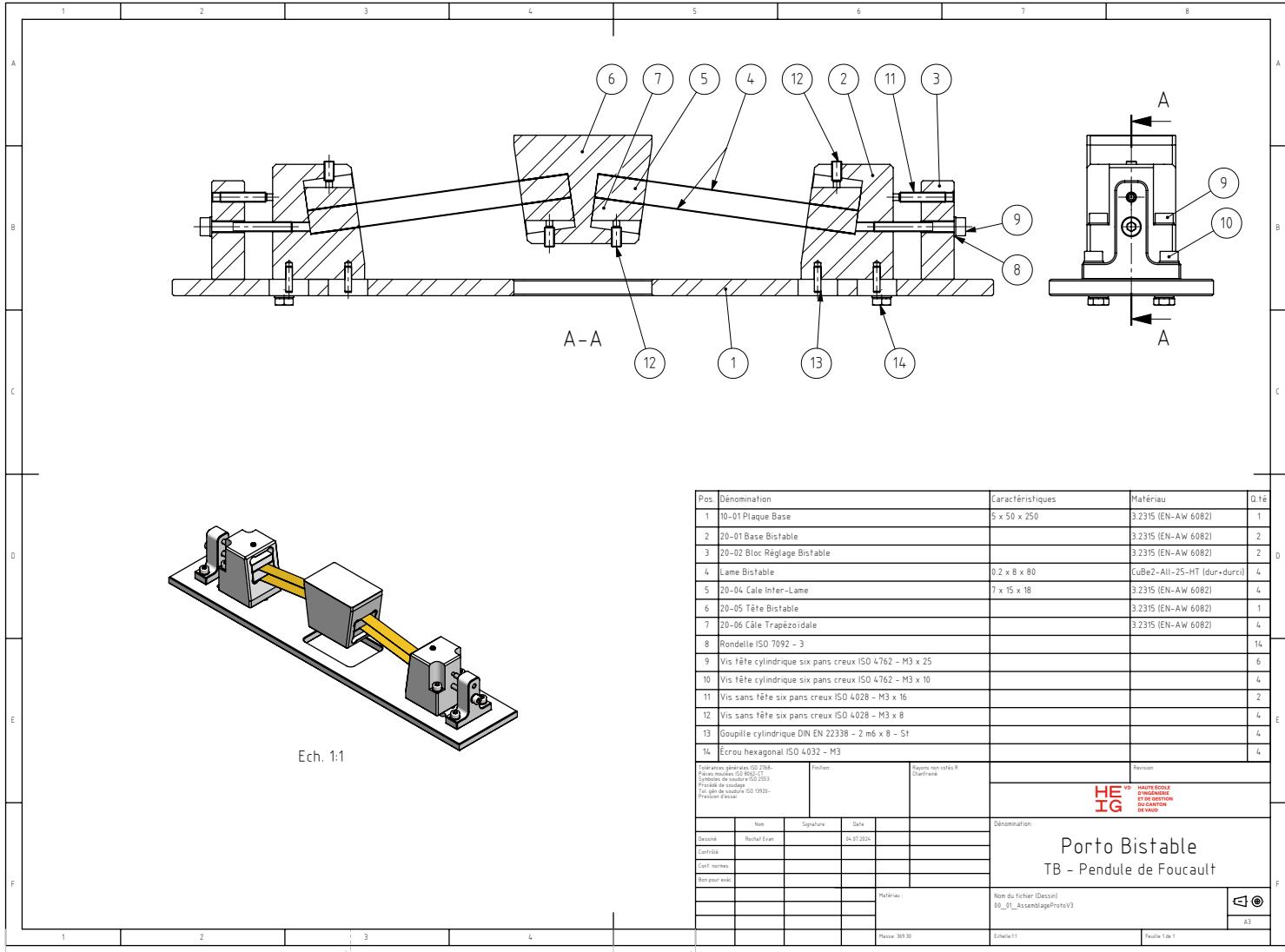
*A.3. MAQUETTE V1*

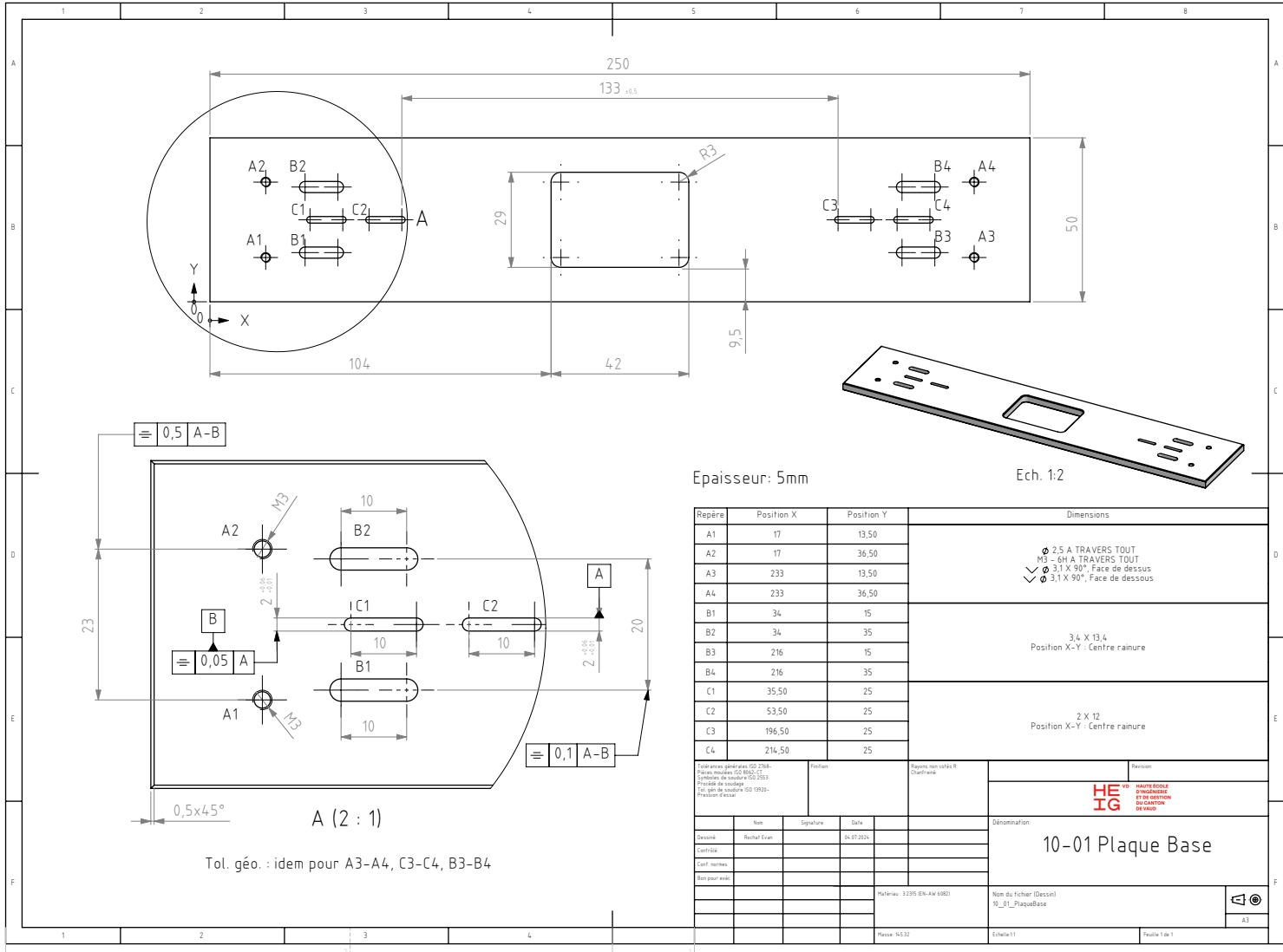
*A.3 Maquette V1*

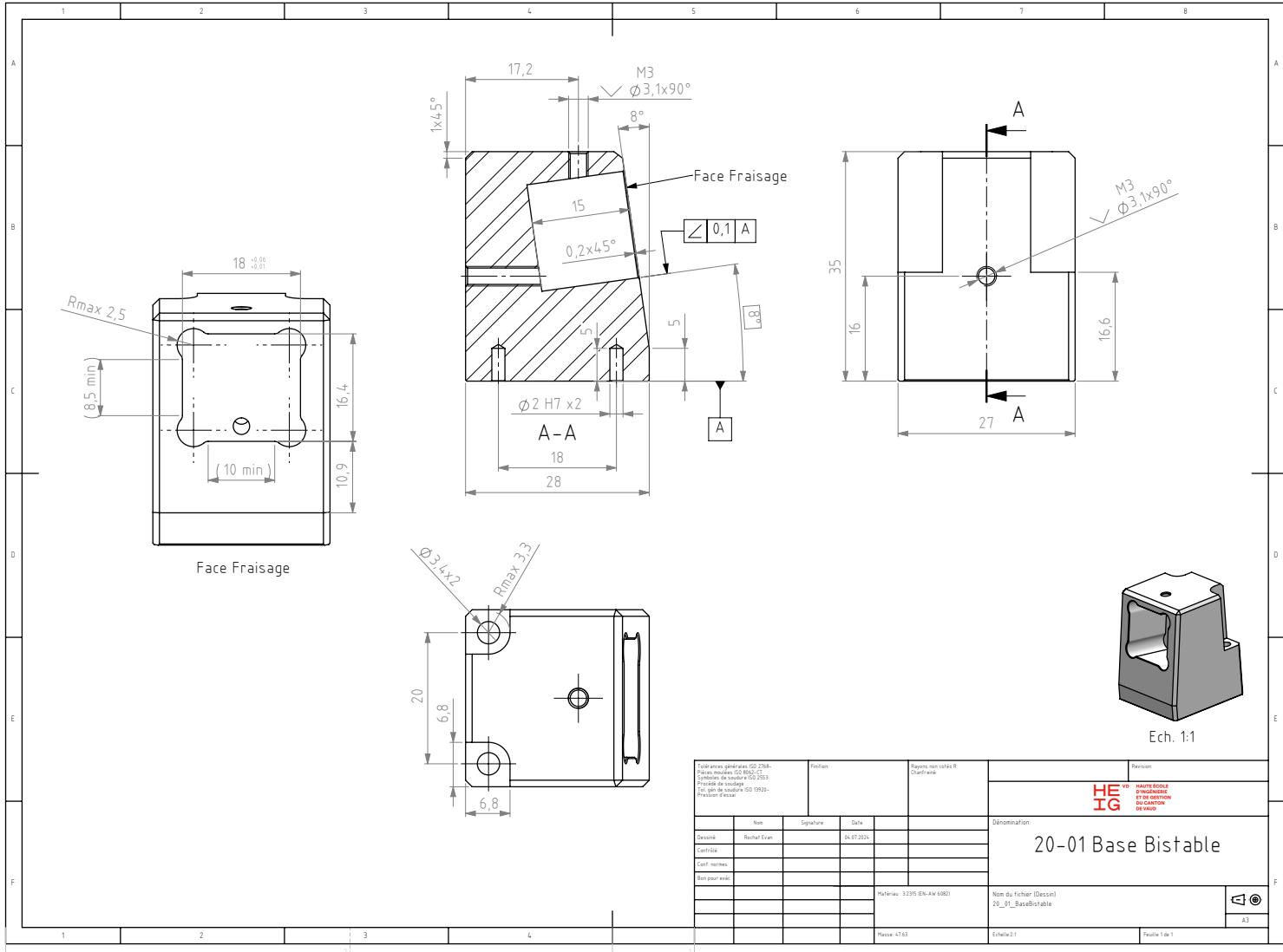


#### A.4. PROTOTYPE BISTABLE

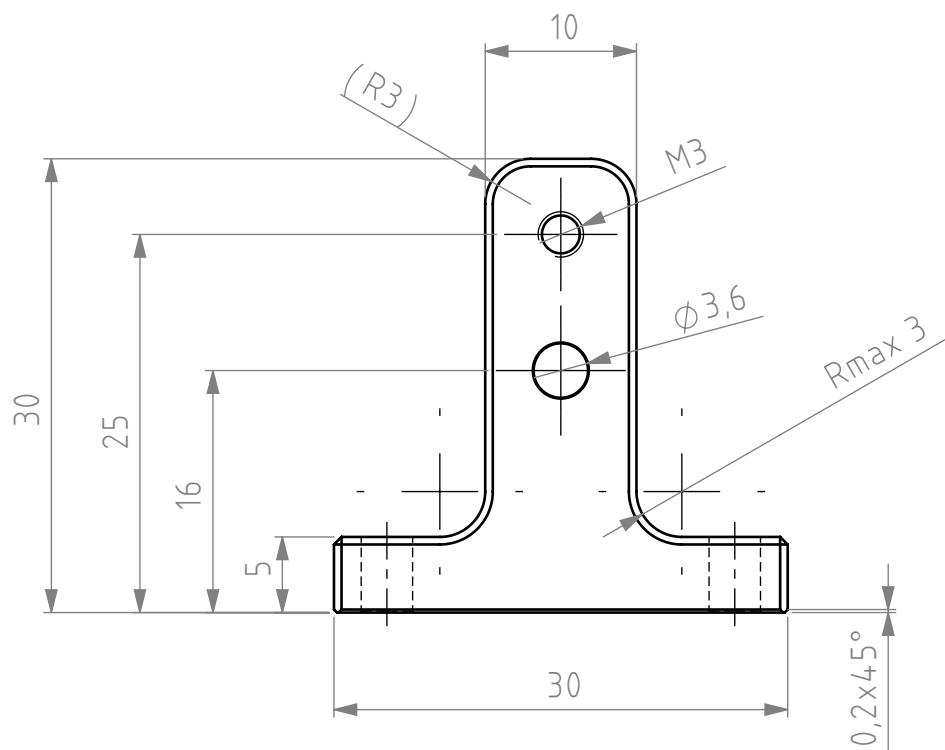
##### A.4 Prototype bistable





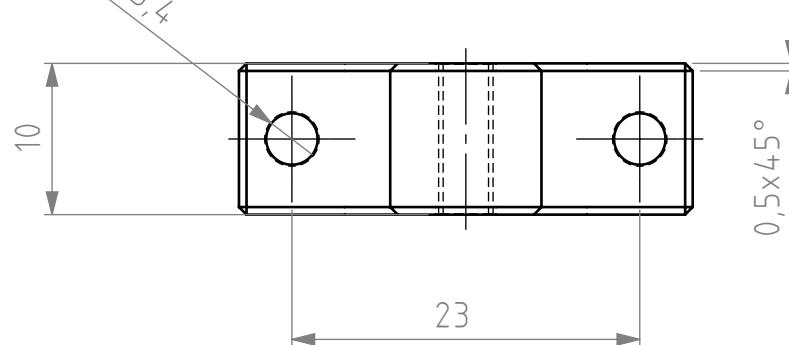


A

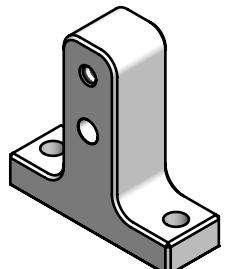


C

D



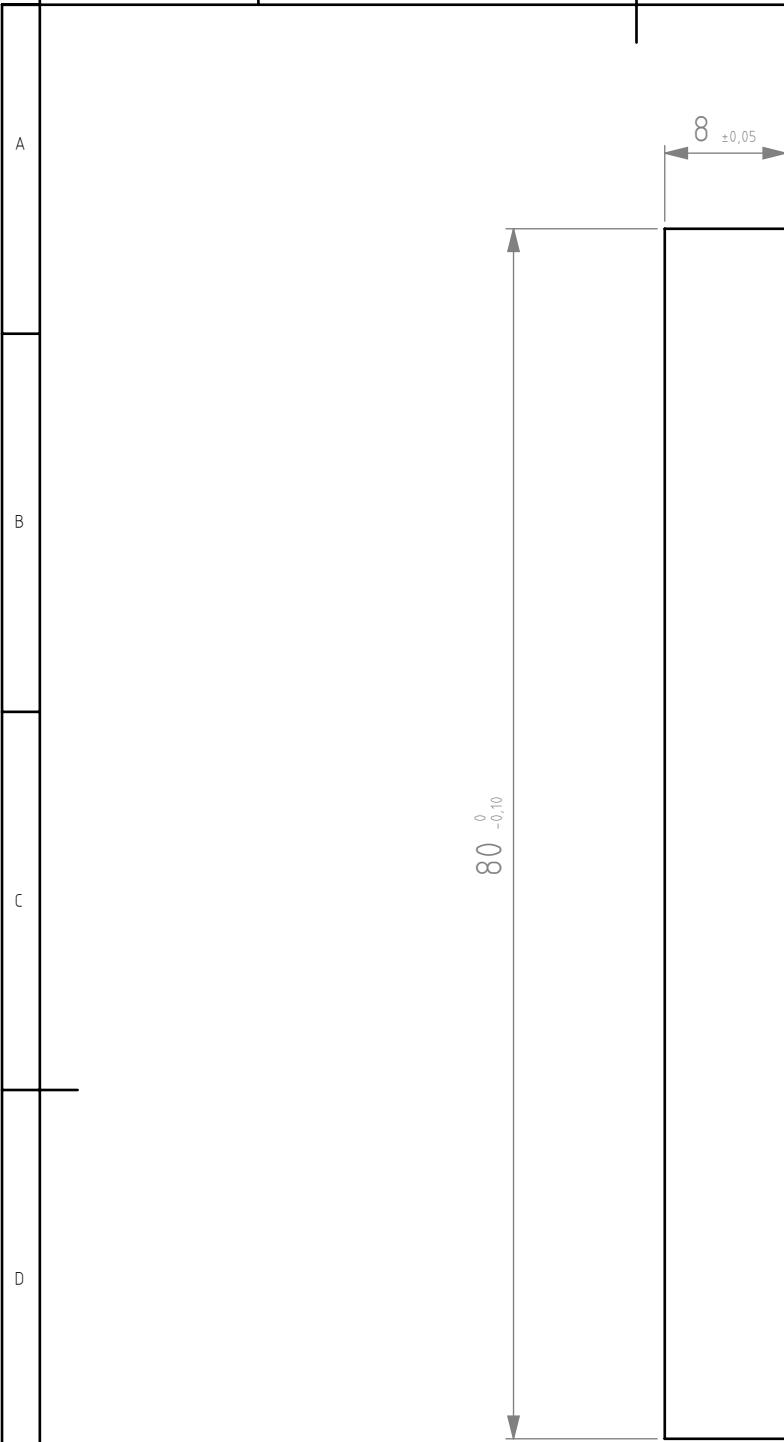
E



Ech. 1:1

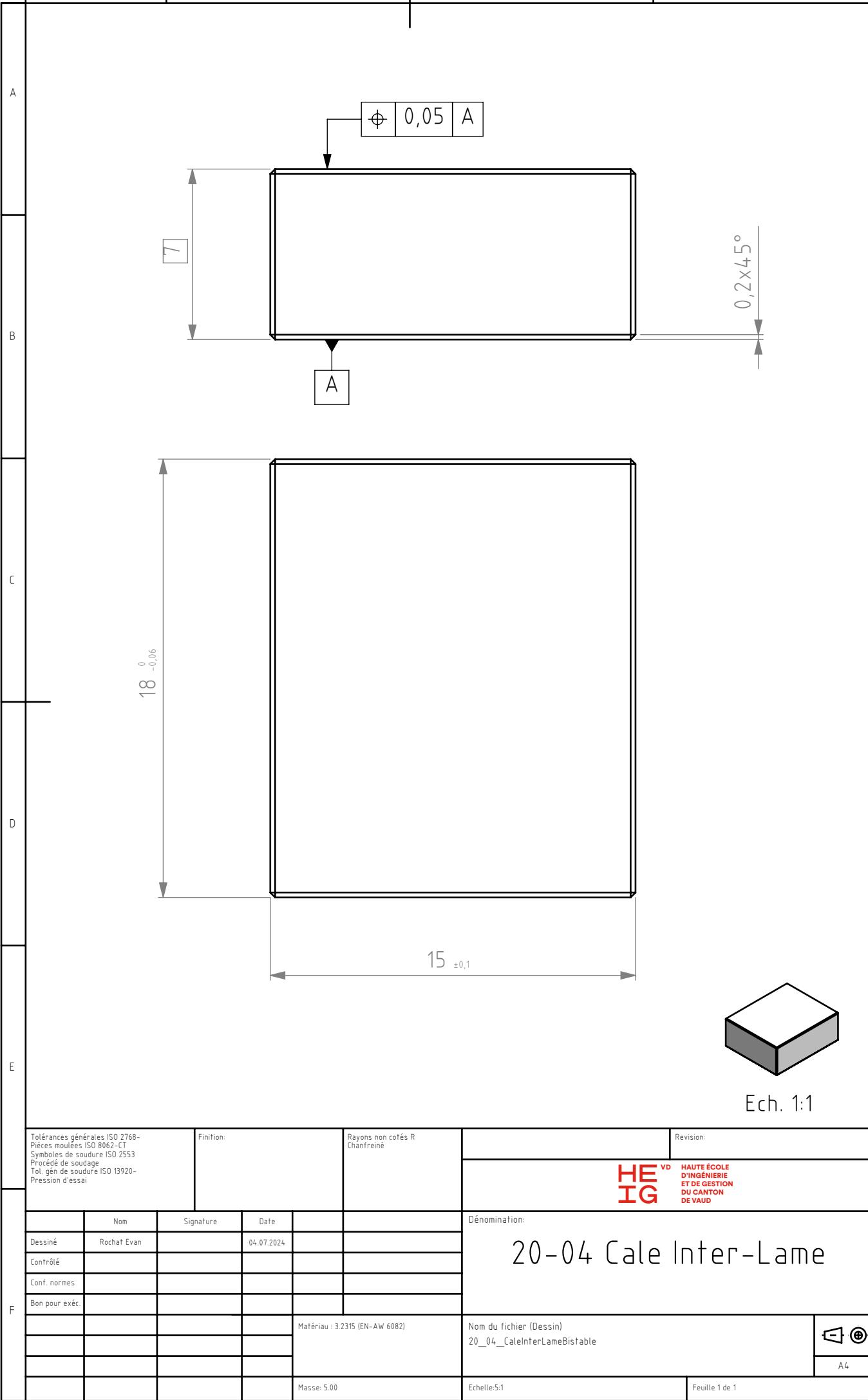
Tolérances générales ISO 2768- Pièces montées ISO 8062-C1 Goumades de soudure ISO 2553 Procédé de soudage Tol. gén de soudure ISO 13920- Pression d'essai		Finition:		Rayons non cotés R Chanfreine		Revision:
Dessiné	Rochat Evan		Date			
Contrôlé						
Conf. normes						
Bon pour exéc.						
				Matériau : 3.2315 (EN-AW 6082)	Dénomination:	
					20-02 Bloc Réglage Bistable	
				Masse: 9.89	Nom du fichier (Dessin) 20_02_BlocReglageBistable	
					Echelle: 2:1	Feuille 1 de 1
					A4	

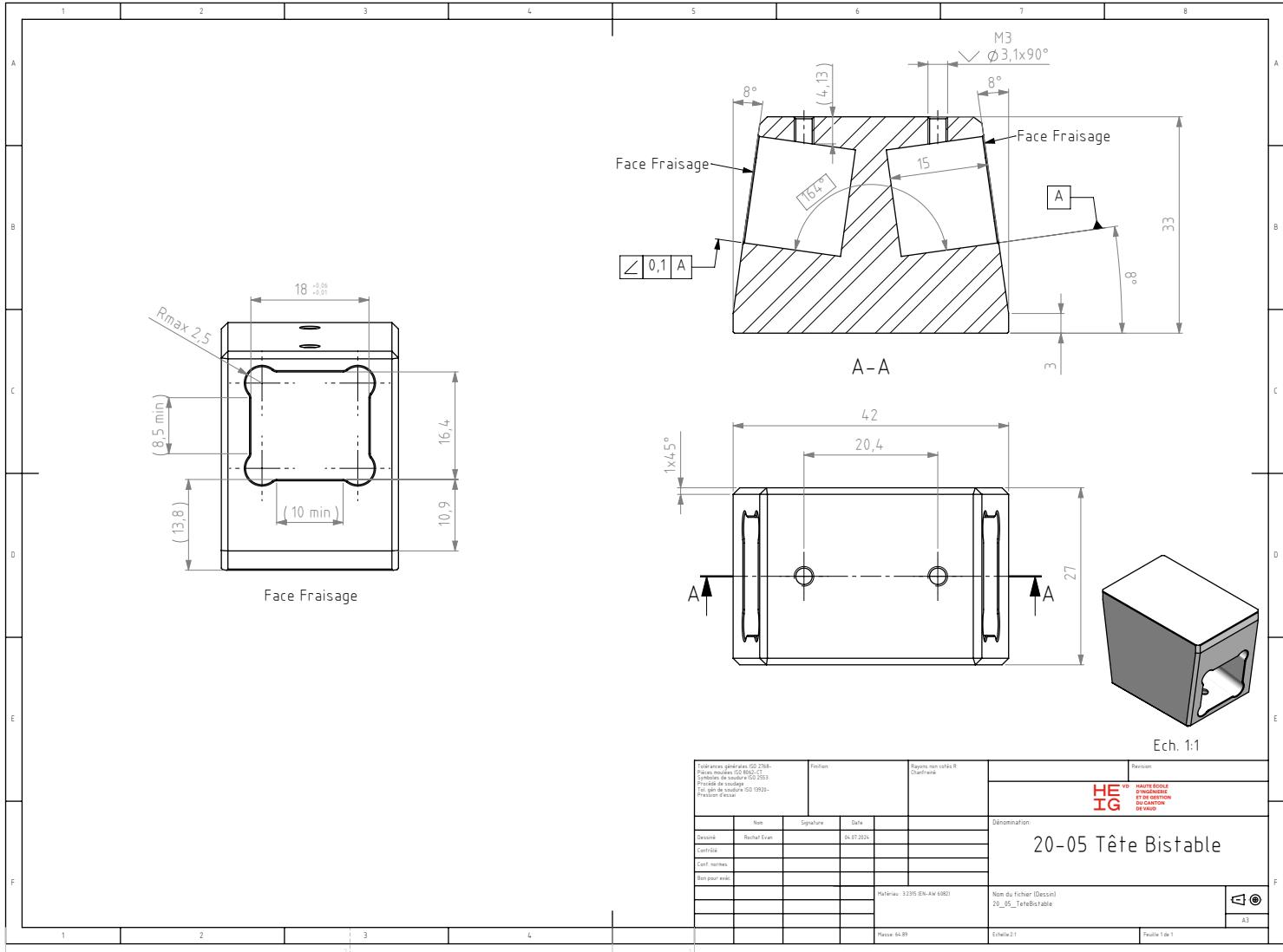
**HE** VD **HG** HAUTE ÉCOLE  
D'INGÉNIERIE  
ET DE GESTION  
DU CANTON  
DE VAUD

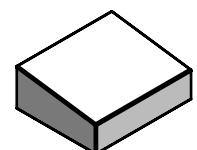
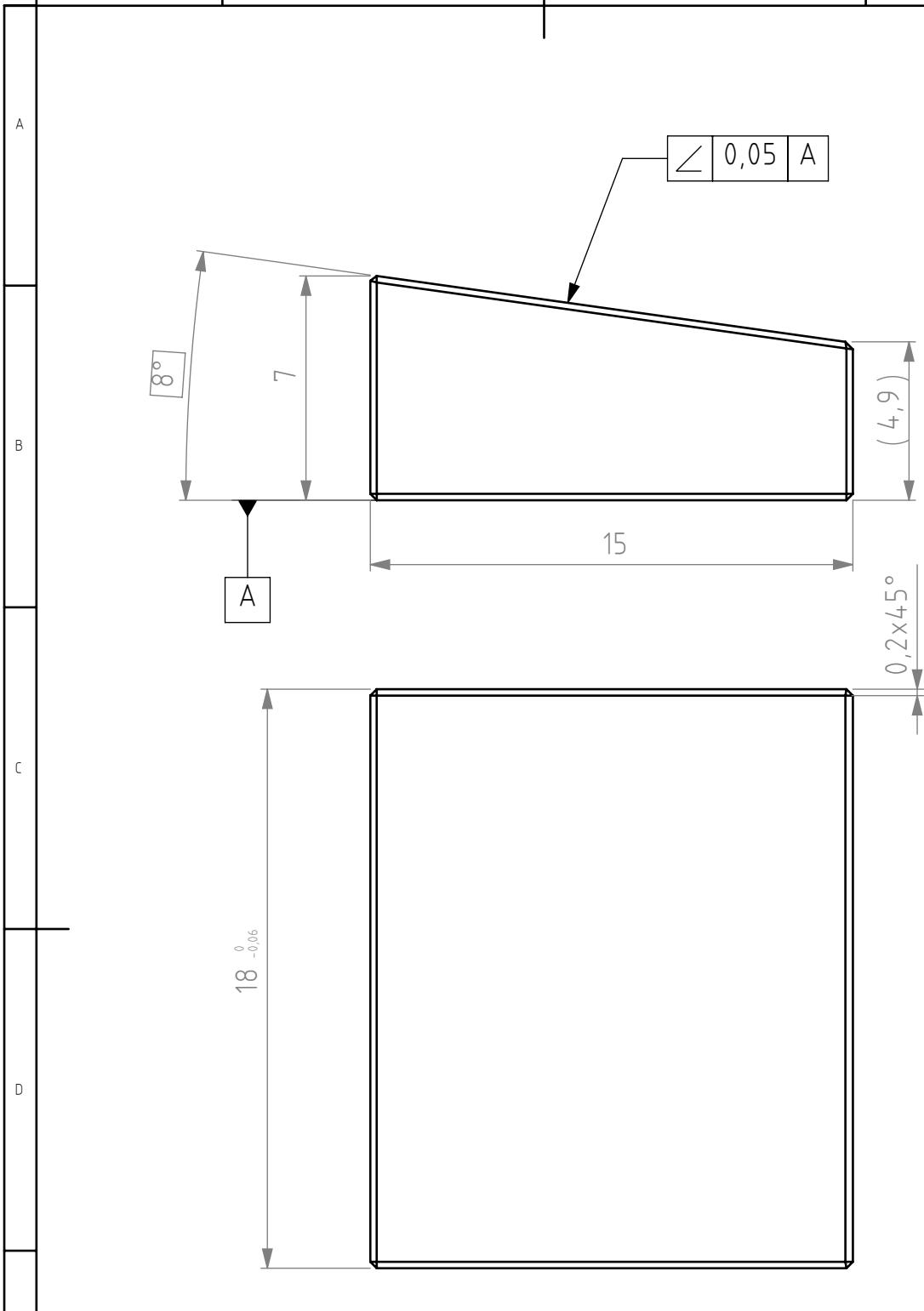

Epaisseur :  $0.20 \pm 0.015$ 

Ech. 1:1

Tolérances générales ISO 2768- Pièces mises en ISO 8062-C1 Goumades de soudure ISO 2553 Procédé de soudage Tol. gén de soudure ISO 13920- Pression d'essai			Finition:		Rayons non cotés R Chanfreine	Revision:
Dessiné	Nom	Signature	Date			<b>HE</b> <small>VD</small> <b>H</b> <small>HAUTE ÉCOLE</small> <b>HG</b> <small>INGÉNIERIE</small> <small>ET DE GESTION</small> <small>DU CANTON</small> <small>DE VAUD</small>
Contrôlé						
Conf. normes						
Bon pour exéc.						
				Matériau : CuBe2-Al1.25-HT (dur+durci)		Dénomination:  20-03 Lame Bistable
				Nom du fichier (Dessin) 20_03_LameBistable		
				Masse: 1.07	Echelle: 2:1	Feuille 1 de 1
						A4





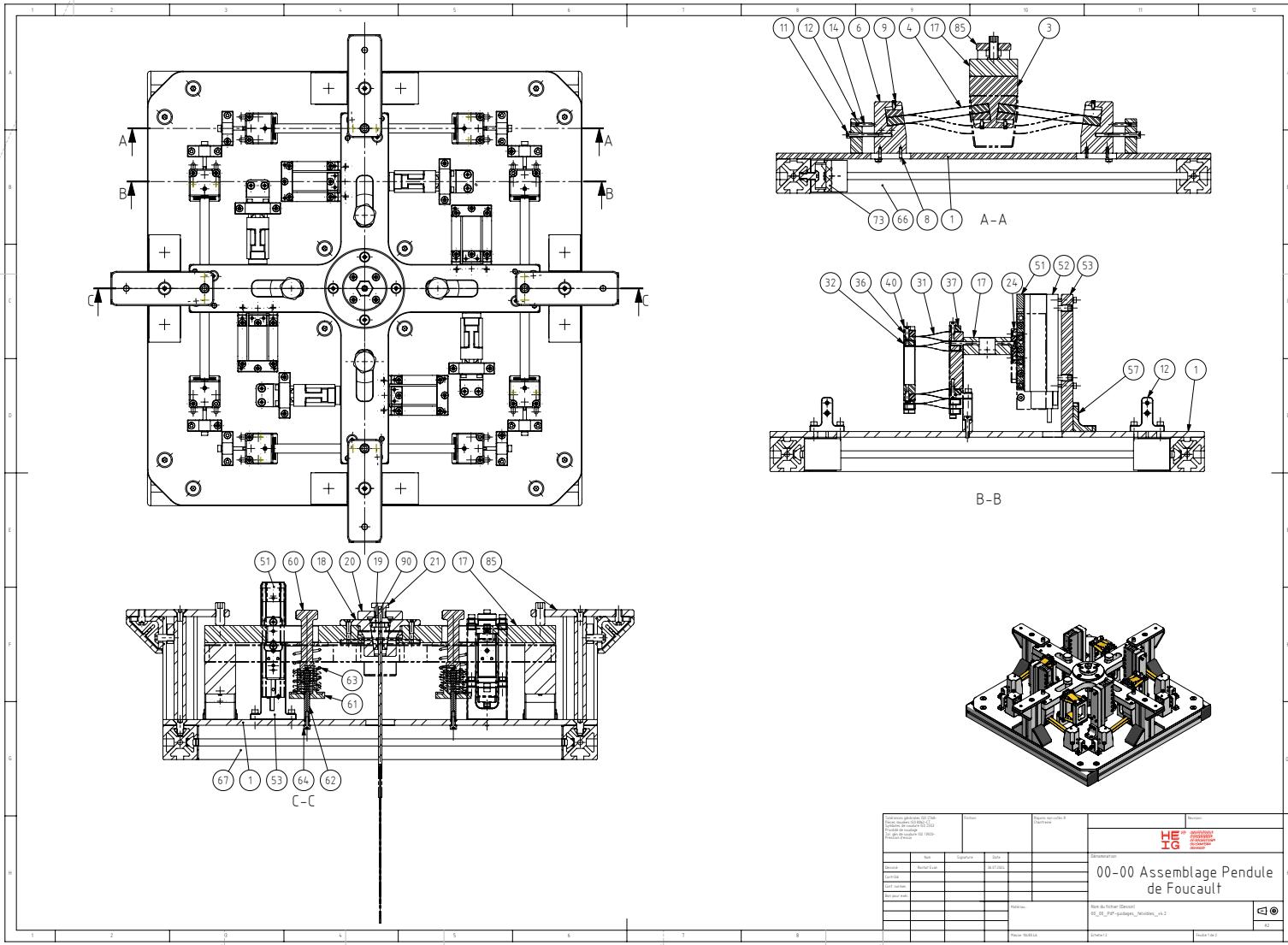


Ech. 1:1

Tolérances générales ISO 2768- Pièces montées ISO 8062-C1 Gambles de soudure ISO 2553 Procédé de soudage Tol. gén de soudure ISO 13920- Pression d'essai		Finition:		Rayons non cotés R Chanfreine		Revision:
						<b>HE</b> <small>VD</small> <b>HG</b> <small>HAUTE ÉCOLE D'INGÉNIERIE ET DE GESTION DU CANTON DE VAUD</small>
Dessiné	Rochat Evan		04.07.2024			Dénomination:
Contrôlé						20-06 Câle Trapézoïdale
Conf. normes						
Bon pour exéc.						
				Matériau : 3.2315 (EN-AW 6082)	Nom du fichier (Dessin) 20_06_CaleTrapezeBistable	
				Masse: 4.25	Echelle: 5:1	Feuille 1 de 1
						A4

*ANNEXE A. MISES EN PLAN*

*A.5 Implémentation finale*



Pos.	Dénomination	Caractéristiques	Matériau	Q.té
1	10-01 Plaque Base	5 x 50 x 250	3.2315 (EN-AW 6082)	1
2	20-00 Bistable			4
3	20-05 Tête Bistable		3.2315 (EN-AW 6082)	1
4	20-03 Lame Bistable	0.2 x 8 x 80	CuBe2-AlL25-HT (dur+durci)	4
5	20-04 Cale Inter-Lame	7 x 15 x 18	3.2315 (EN-AW 6082)	4
6	20-01 Base Bistable		3.2315 (EN-AW 6082)	2
7	20-06 Câle Trapézoïdale		3.2315 (EN-AW 6082)	4
8	Goupille cylindrique DIN EN 22338 - 2 m6 x 8 - St			4
9	Vis sans tête six pans creux ISO 4028 - M3 x 8			4
10	Rondelle ISO 7092 - 3			14
11	Vis tête cylindrique six pans creux ISO 4762 - M3 x 25			6
12	20-02 Bloc Réglage Bistable		3.2315 (EN-AW 6082)	2
13	Vis tête cylindrique six pans creux ISO 4762 - M3 x 10			4
14	Vis sans tête - M3 x 10			2
15	Écrou hexagonal ISO 4036 - M3			4
16	40-00 Base mobile			1
17	40-01 Base Monobloc		3.2315 (EN-AW 6082)	1
18	40-10 Cone Support Pince		3.2315 (EN-AW 6082)	1
19	Pince serrage	4,26E-01	1.4006 (X10Cr13)	1
20	40-11 Bague Cône		3.2315 (EN-AW 6082)	1
21	40-12 Vis Pince Serrage		3.2315 (EN-AW 6082)	1
22	Vis tête conique six pans creux ISO 10642 - M4 x 12			4
23	Vis tête cylindrique six pans creux ISO 4762 - M3 x 8			4
24	40-20 Plaque Fixation Moteur		3.2315 (EN-AW 6082)	4
25	Vis tête conique six pans creux ISO 10642 - M3 x 12			4
26	Goupille cylindrique DIN EN 22338 - 2 m6 x 12 - St			8
27	Vis tête conique six pans creux ISO 10642 - M4 x 12			8
28	Vis sans tête - M3 x 16			8
29	50-00 Table à 6 Lames			4
30	50-01 Bloc fixe		3.1355 (EN-AW 2024)	2
31	50-02 Lames		CuBe2-AlL25-HT (dur+durci)	2
32	50-03 Bloc intermédiaire		3.1355 (EN-AW 2024)	1
33	50-05 Plaque Fixe		3.1355 (EN-AW 2024)	4
34	50-04 Bloc Mobile		3.1355 (EN-AW 2024)	1
35	50-06 Plaque Mobile		3.1355 (EN-AW 2024)	2
36	50-07 Plaque Intermédiaire		3.1355 (EN-AW 2024)	2
37	Goupille cylindrique DIN EN 22338 - 2 m6 x 8 - St			11
38	Goupille cylindrique DIN EN 22338 - 2 m6 x 10 - St			1
39	Rondelle ISO 7092 - 3			14
40	Vis tête cylindrique six pans creux ISO 4762 - M3 x 8			11
41	Vis tête cylindrique six pans creux ISO 4762 - M3 x 10			3
42	50-08 Support Base		3.2315 (EN-AW 6082)	1
43	Vis tête conique six pans creux ISO 10642 - M3 x 16			4

44	Vis sans tête - M3 x 14		8	
45	Rondelle ISO 7092 - 3		16	
46	Vis tête cylindrique six pans creux ISO 4762 - M3 x 16		4	
47	Goupille cylindrique DIN EN 22338 - 2 m6 x 12 - St		8	
48	Moteur Linéaire	AUM1-TL84	4	
52	Moteur linéaire	AUM1-S4	1.5918 (17CrNi6-6)	4
53	60-01 Support Moteur		3.2315 (EN-AW 6082)	4
54	Vis sans tête six pans creux ISO 4028 - M6 x 12		8	
55	Rondelle ISO 7092 - 2.5		16	
56	Vis tête cylindrique six pans creux ISO 4762 - M2.5 x 16		16	
57	60-02 Equerre moteur		3.2315 (EN-AW 6082)	4
58	Vis tête cylindrique six pans creux ISO 4762 - M3 x 10		8	
59	Vis tête conique six pans creux ISO 10642 - M3 x 10		24	
60	70-01 Vis Réglage		3.2315 (EN-AW 6082)	4
61	70-02 Ecrou Réglage		3.2315 (EN-AW 6082)	4
62	70-03 Axe Réglage		1.0503 (C45)	4
63	70-04 Resort Réglage		1.4310 (X10CrNi18-8)	4
64	Vis tête cylindrique six pans creux ISO 4762 - M3 x 8		4	
65	Rondelle ISO 7093 - 12		4	
66	Profilé 30x30	374 mm	3.2315 (EN-AW 6082)	2
67	Profilé 30x30	318 mm	3.2315 (EN-AW 6082)	4
68	Profilé 30x30	90 mm	3.2315 (EN-AW 6082)	4
69	Equerre profilé	10250-063030		4
72	Ecrou profilé	07071-0606	3.2315 (EN-AW 6082)	2
74	Equerre profilé	10250-063030		4
77	Ecrou profilé	07071-0606	3.2315 (EN-AW 6082)	2
78	Equerre profilé	07071-0606		12
81	Ecrou profilé	07071-0606	3.2315 (EN-AW 6082)	1
83	Ecrou profilé	07071-0606	3.2315 (EN-AW 6082)	24
84	Vis tête conique six pans creux ISO 10642 - M6 x 12		16	
85	70-01 Plaque Butée		3.2315 (EN-AW 6082)	4
86	Vis tête cylindrique six pans creux ISO 7380 - M6 x 10		4	
87	Vis tête conique six pans creux ISO 10642 - M5 x 10		4	
88	Vis sans tête six pans creux ISO 4026 - M8 x 20		4	
89	Vis tête cylindrique six pans creux ISO 7380 - M6 x 16		8	
90	Cache 30x30	10300-06303011	PBT à usage général	4
91	90-00 Câble serti			1



## Annexe B

# Mesures

### B.1 Maquette en compression

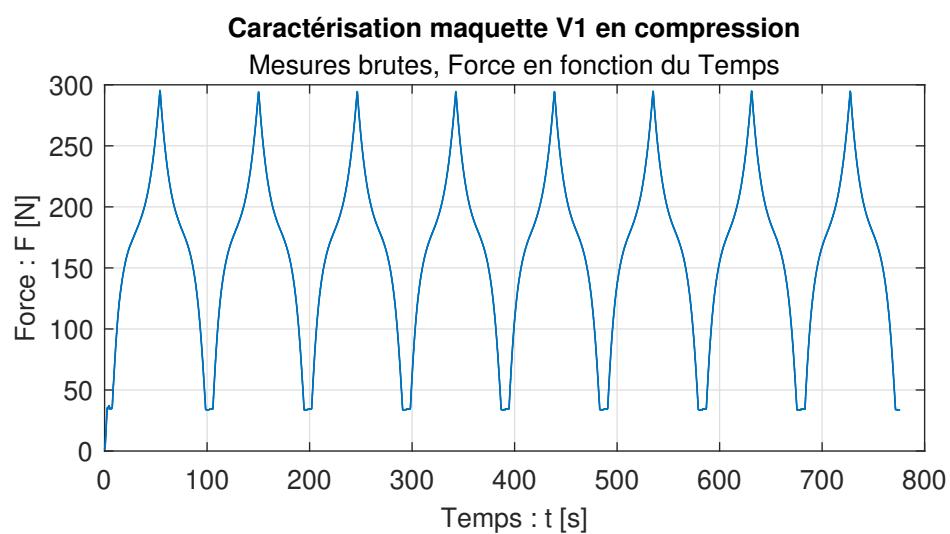


Figure B.1 – Test cyclique en compression de la maquette, Force en fonction du Temps

## ANNEXE B. MESURES

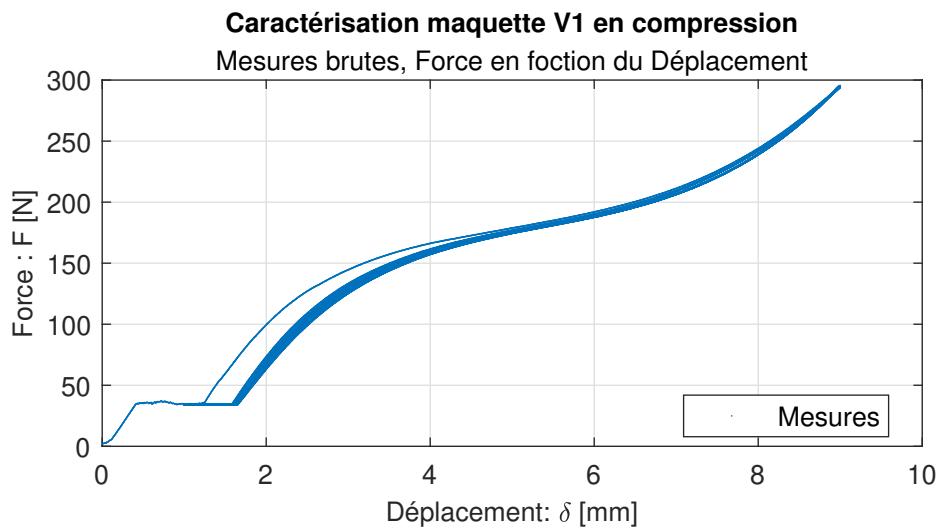


Figure B.2 – Test cyclique en compression de la maquette, Force en fonction de la Course

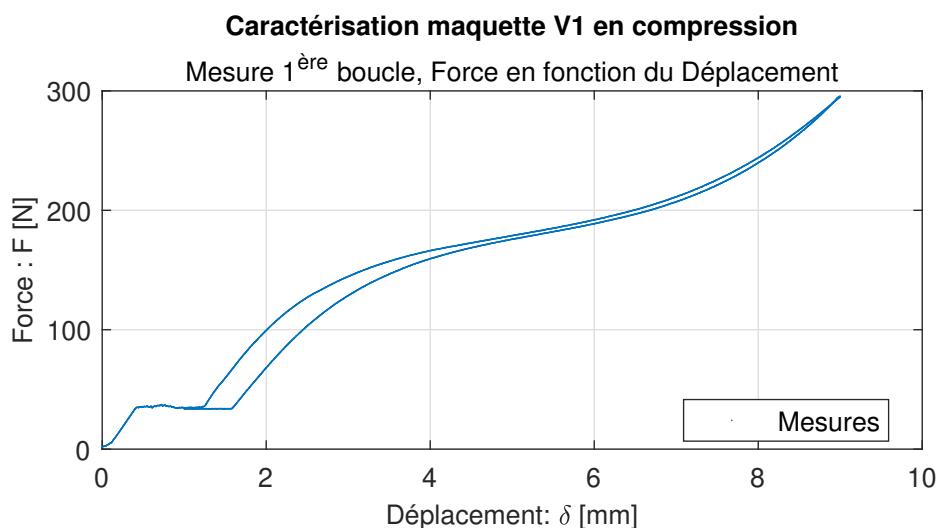
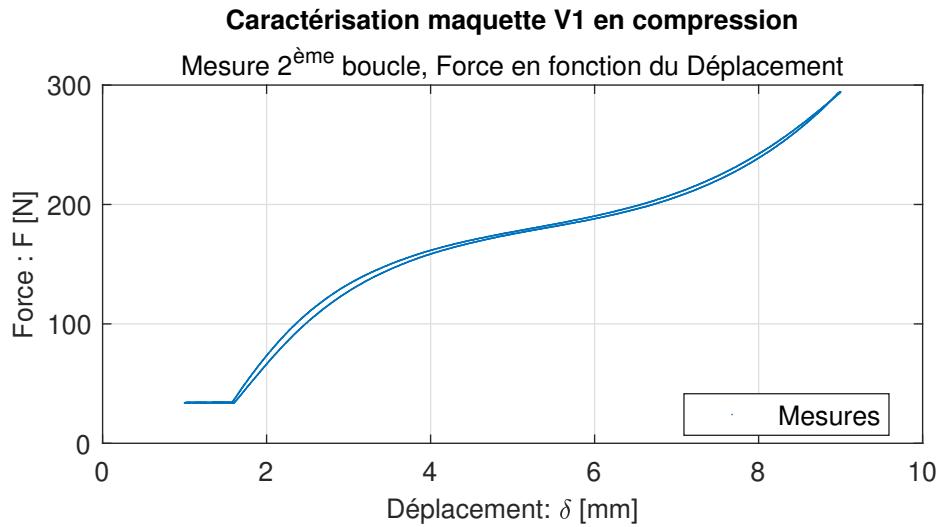
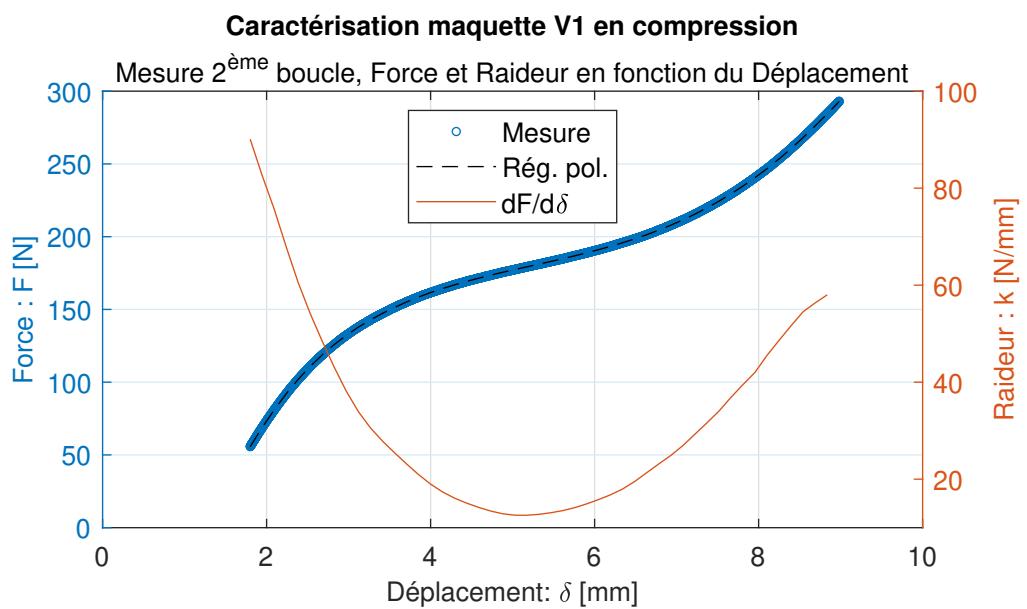


Figure B.3 – Test cyclique en compression de la maquette, Force en fonction du Temps, 1<sup>re</sup> boucle

### B.1. MAQUETTE EN COMPRESSION



**Figure B.4 – Test cyclique en compression de la maquette, Force en fonction du Temps, 2<sup>e</sup>boucle**



**Figure B.5 – Test cyclique en compression de la maquette, Force et Raideur en fonction du Temps, 2<sup>e</sup>boucle**

## B.2 Échantillons de sertissage

### B.2.1 Traction cyclique

#### Échantillon 4

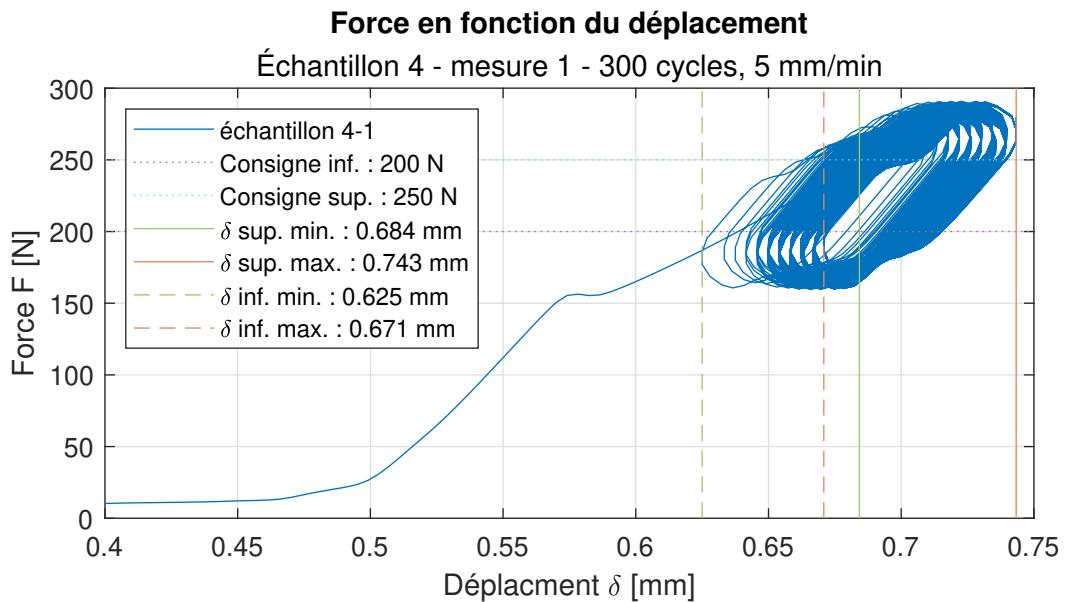


Figure B.6 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-1, Force en fonction du Déplacement

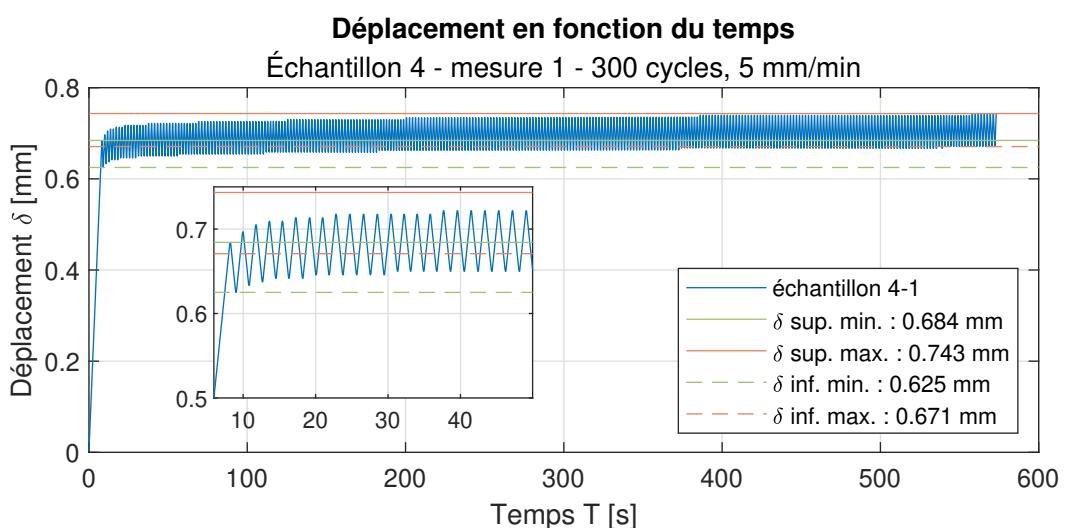
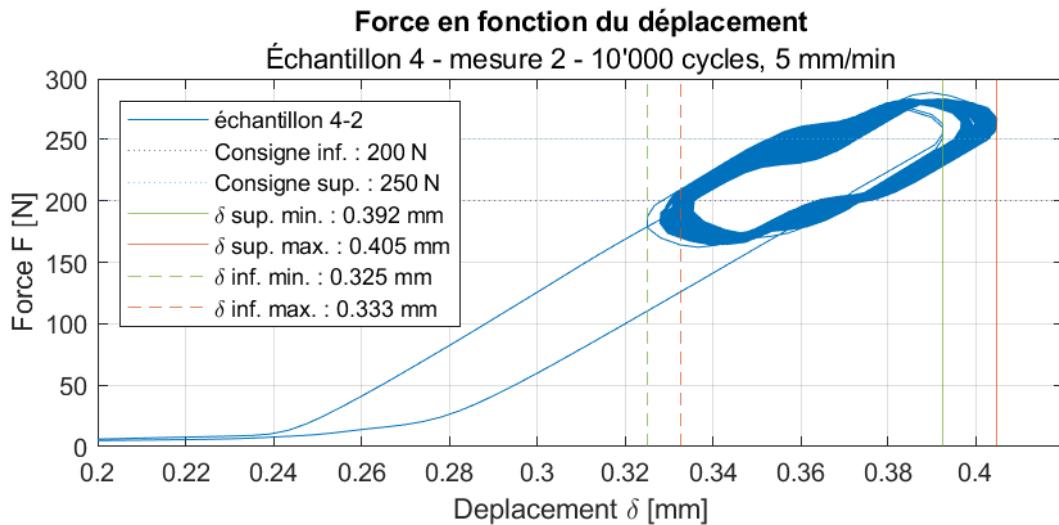
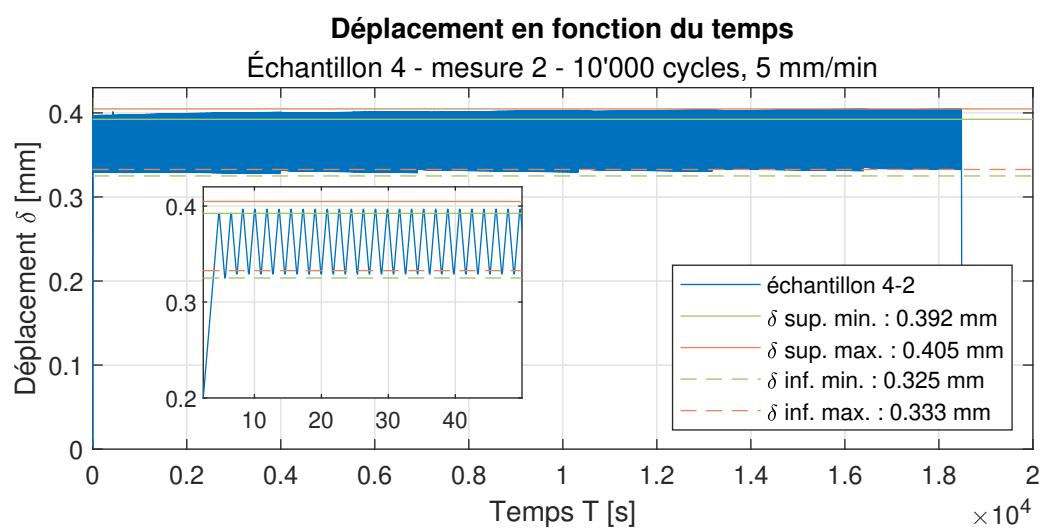


Figure B.7 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-1, Déplacement en fonction du Temps

## B.2. ÉCHANTILLONS DE SERTISSAGE

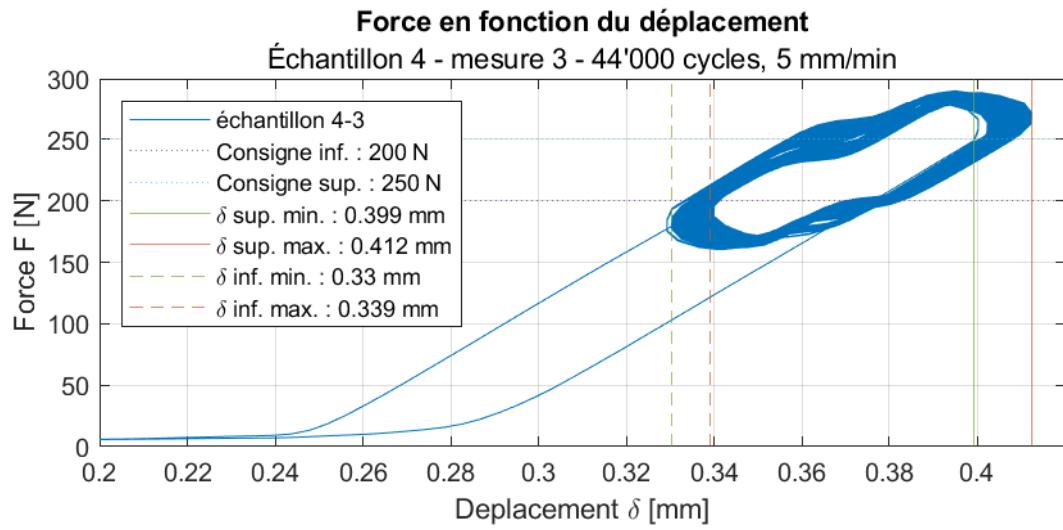


**Figure B.8 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-2, Force en fonction du Déplacement**

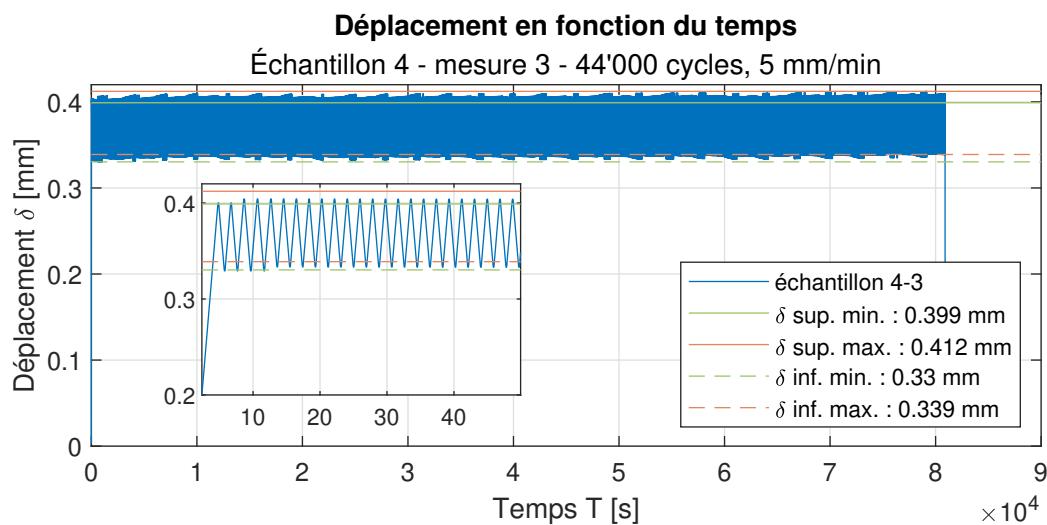


**Figure B.9 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-2, Déplacement en fonction du Temps**

## ANNEXE B. MESURES

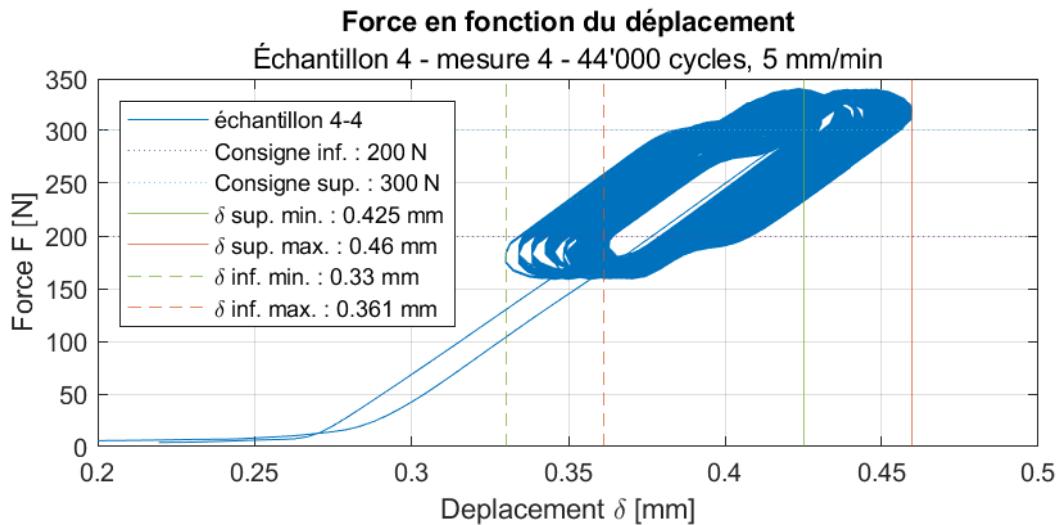


**Figure B.10 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-3, Force en fonction du Déplacement**

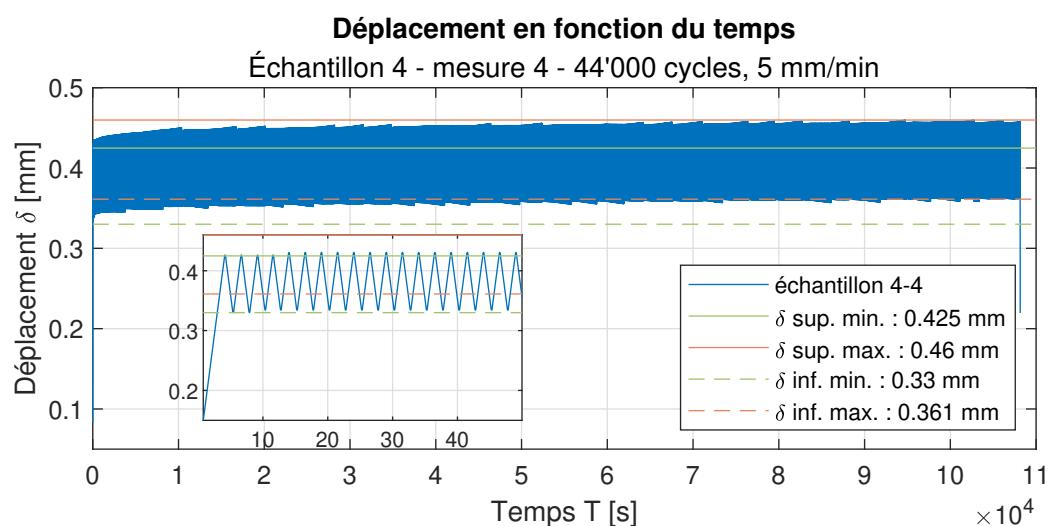


**Figure B.11 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-3, Déplacement en fonction du Temps**

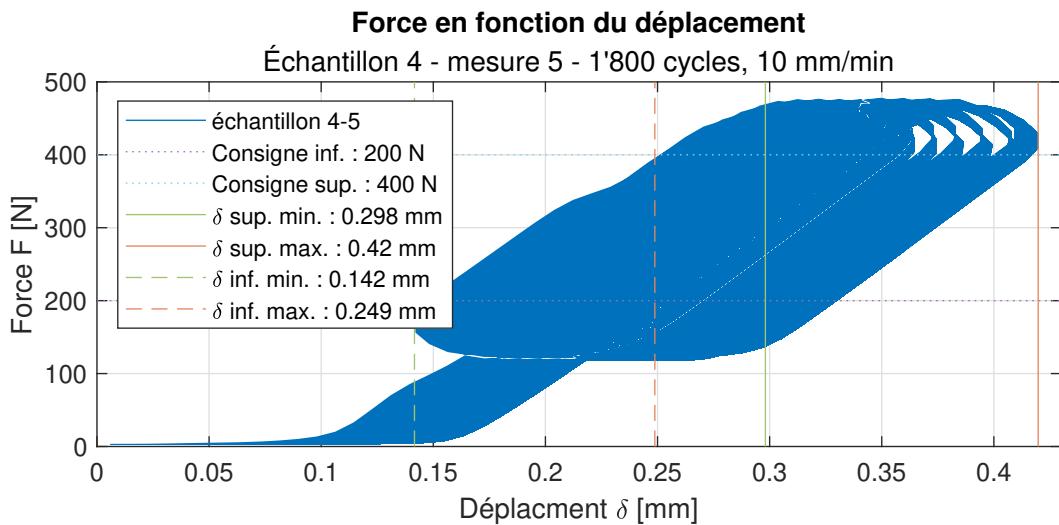
## B.2. ÉCHANTILLONS DE SERTISSAGE



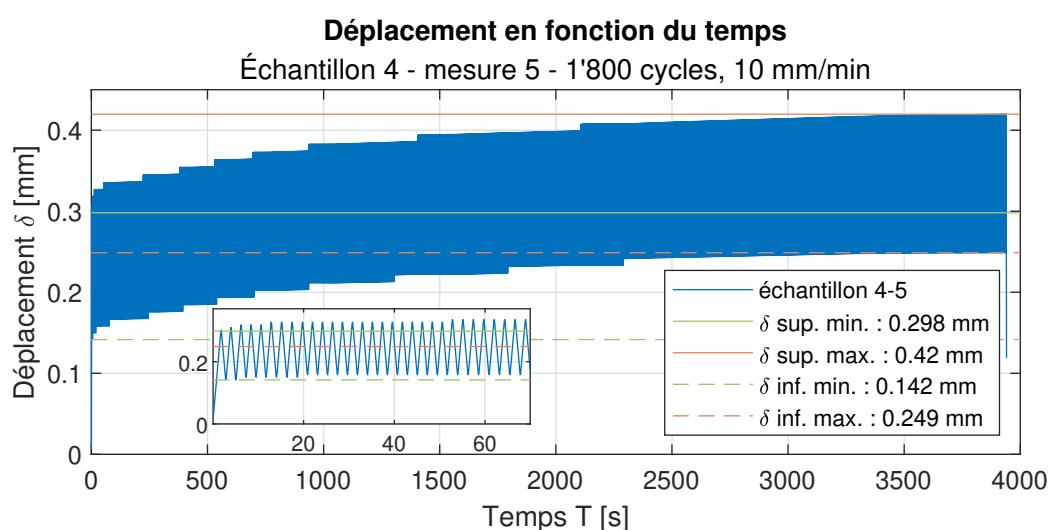
**Figure B.12 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-4, Force en fonction du Déplacement**



**Figure B.13 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-4, Déplacement en fonction du Temps**

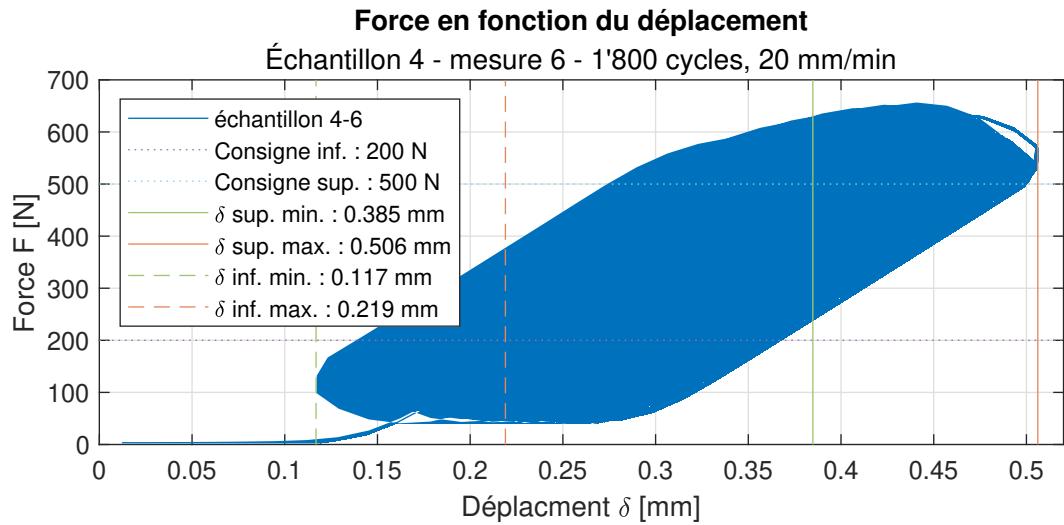


**Figure B.14 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-5, Force en fonction du Déplacement**

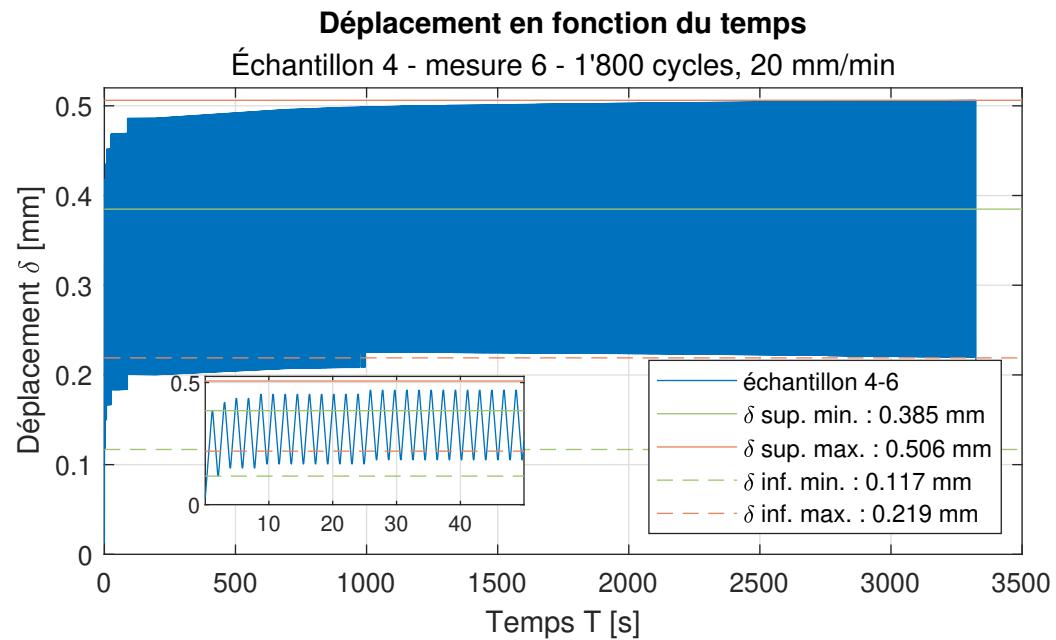


**Figure B.15 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-5, Déplacement en fonction du Temps**

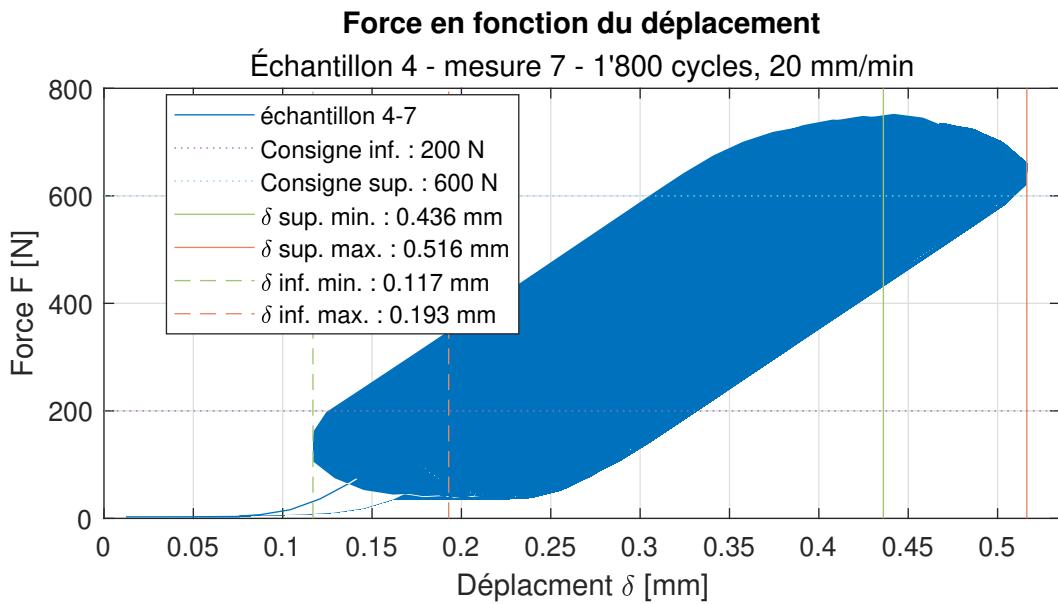
## B.2. ÉCHANTILLONS DE SERTISSAGE



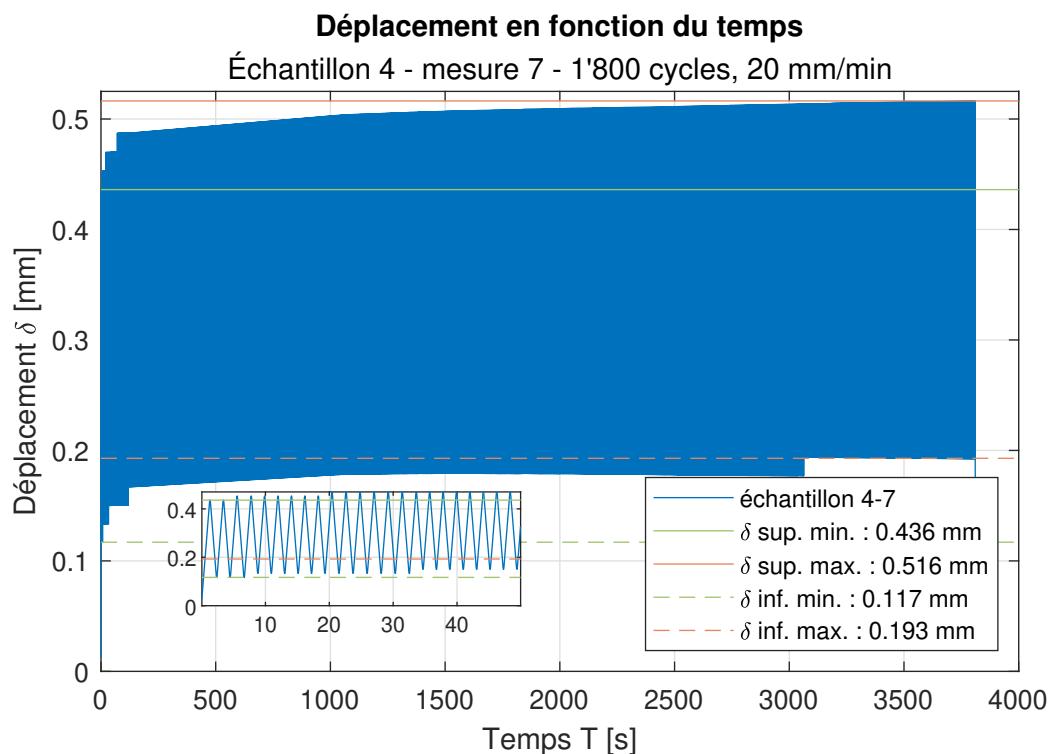
**Figure B.16 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-6, Force en fonction du Déplacement**



**Figure B.17 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-6, Déplacement en fonction du Temps**

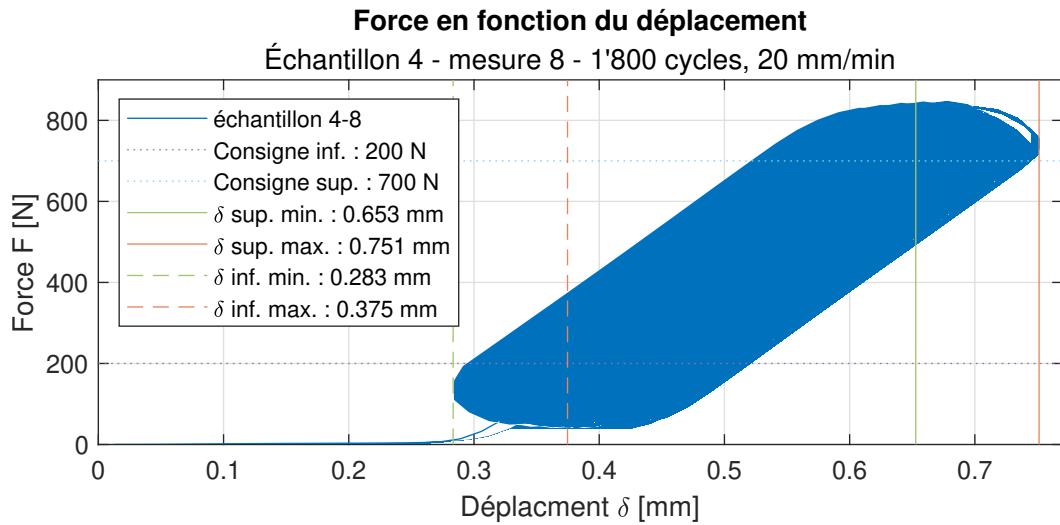


**Figure B.18 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-7, Force en fonction du Déplacement**

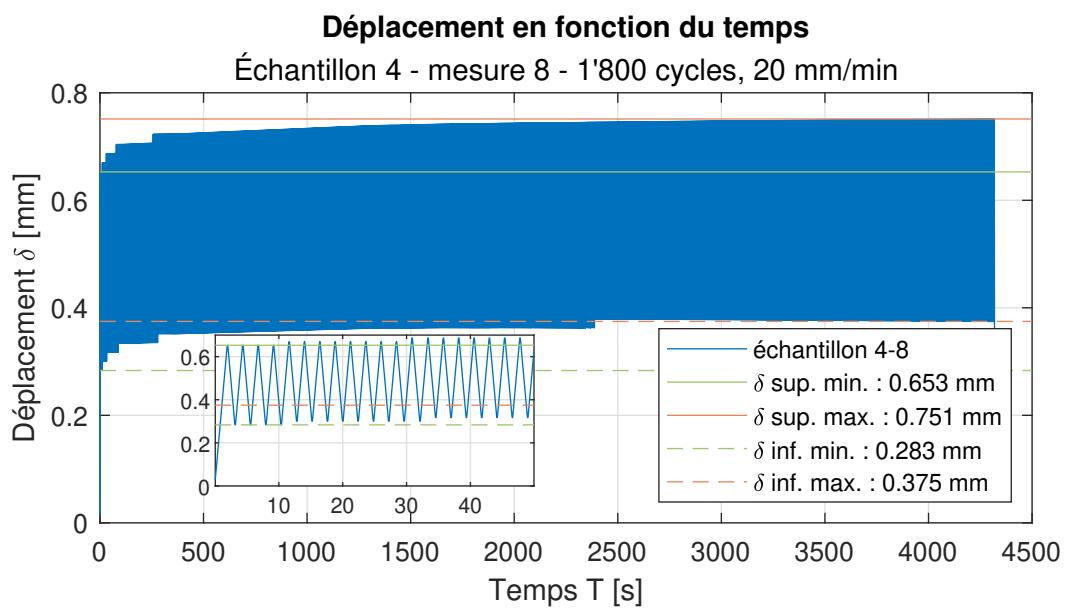


**Figure B.19 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-7, Déplacement en fonction du Temps**

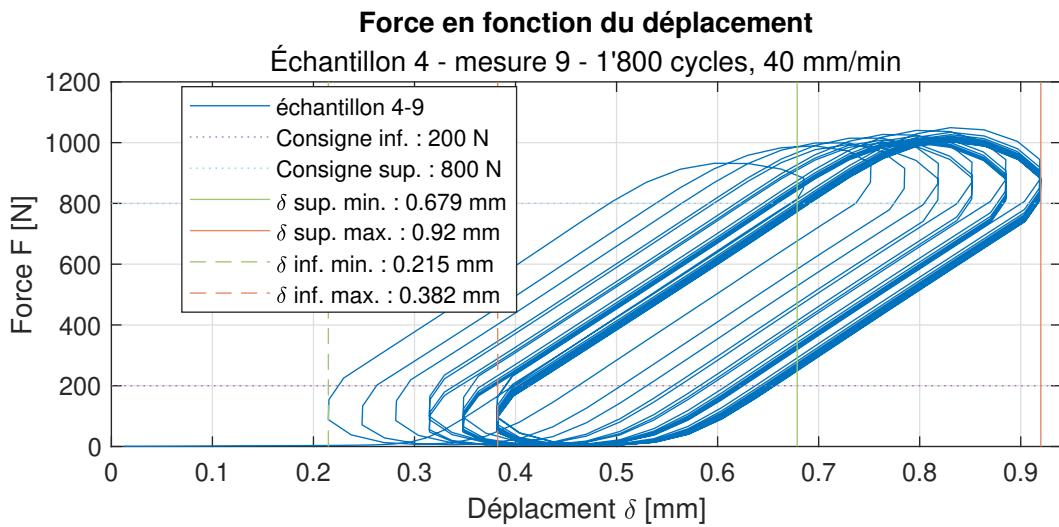
## B.2. ÉCHANTILLONS DE SERTISSAGE



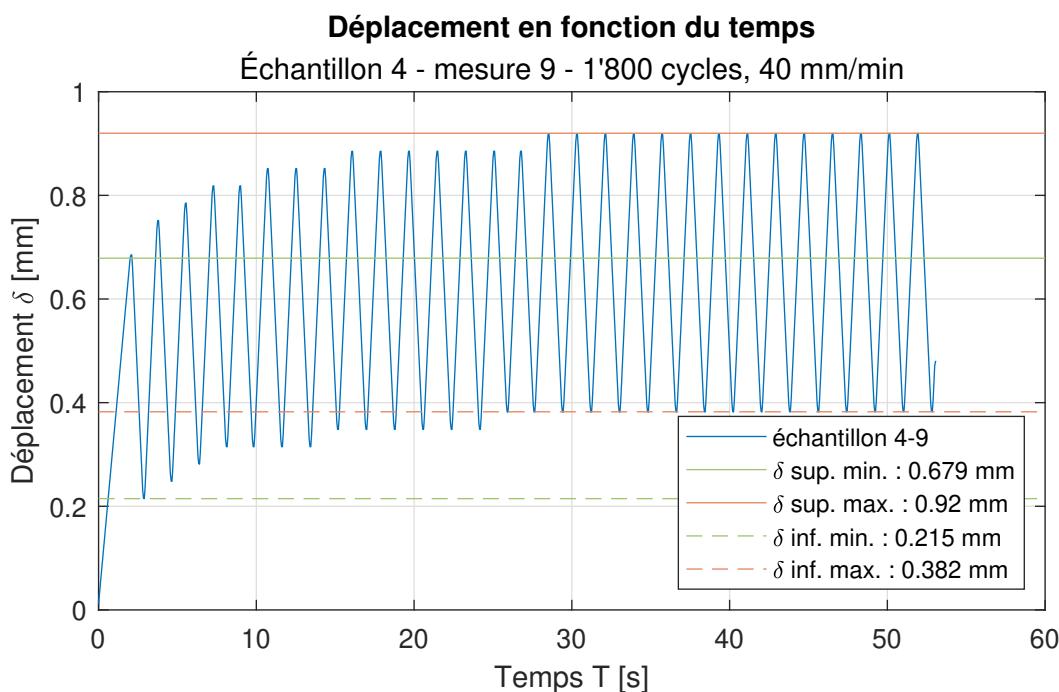
**Figure B.20 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-8, Force en fonction du Déplacement**



**Figure B.21 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-8, Déplacement en fonction du Temps**

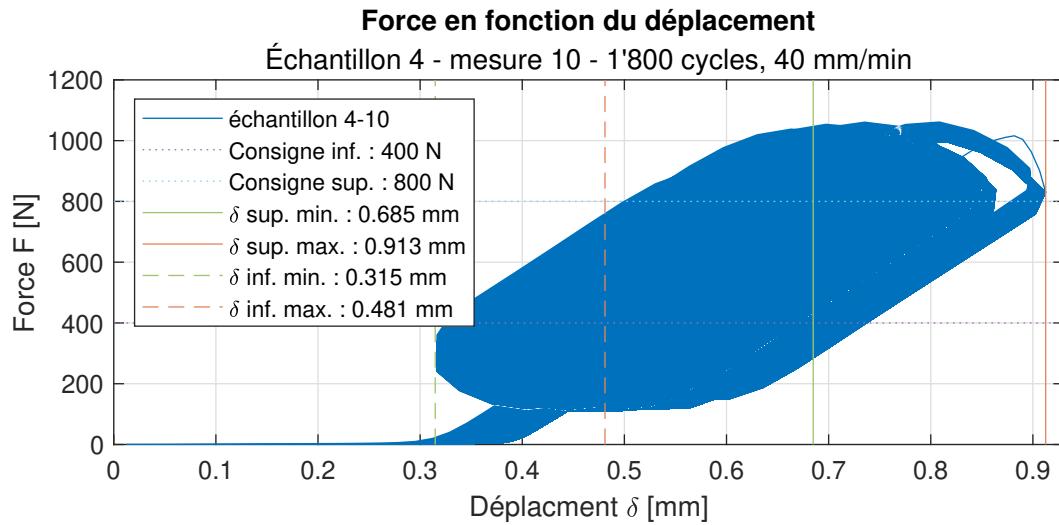


**Figure B.22 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-9, Force en fonction du Déplacement**

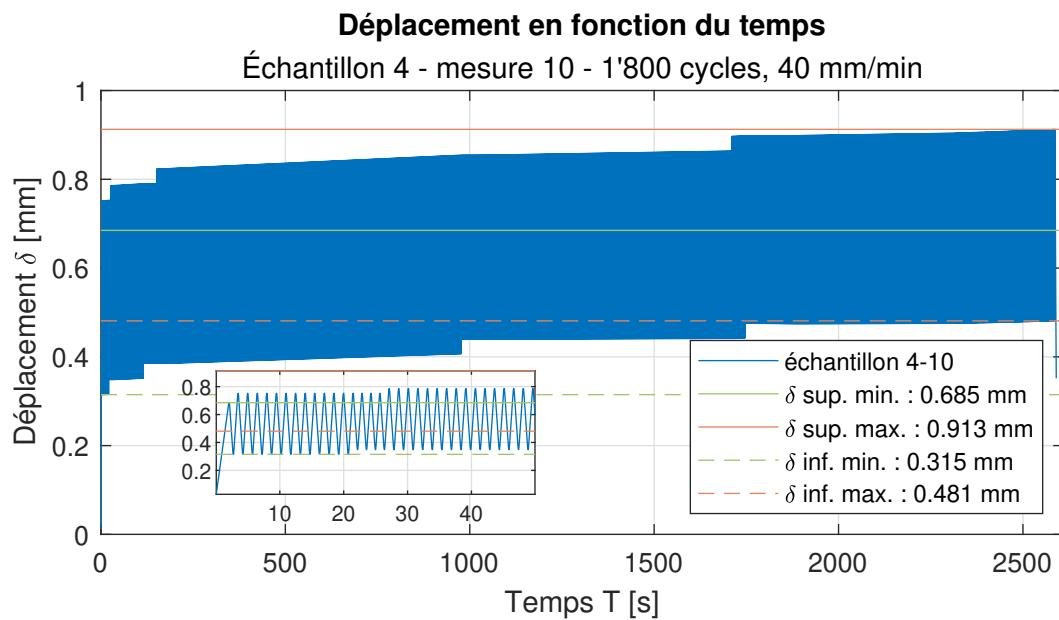


**Figure B.23 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-9, Déplacement en fonction du Temps**

## B.2. ÉCHANTILLONS DE SERTISSAGE

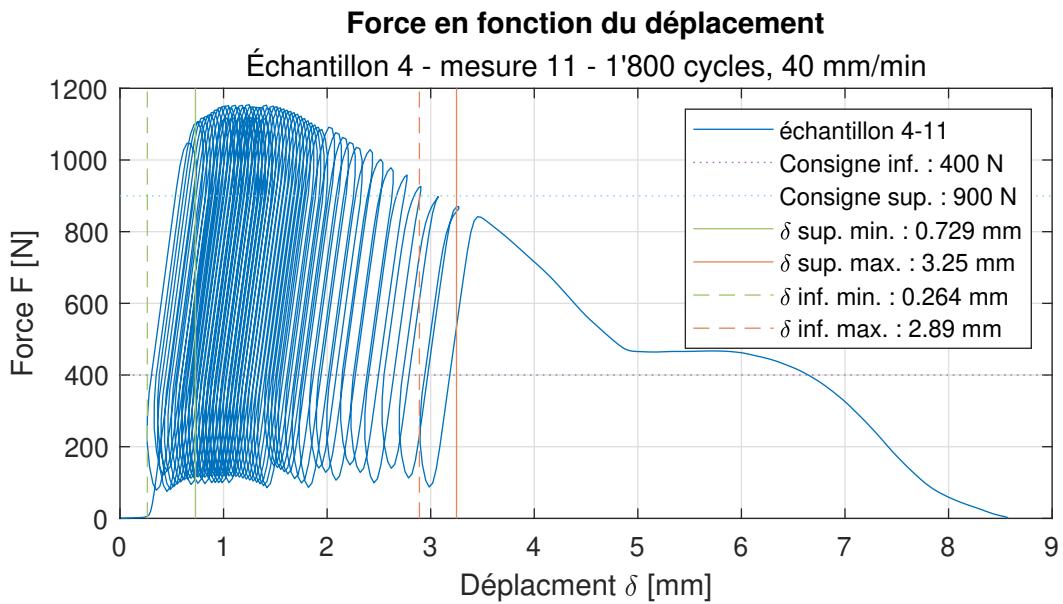


**Figure B.24 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-10, Force en fonction du Déplacement**

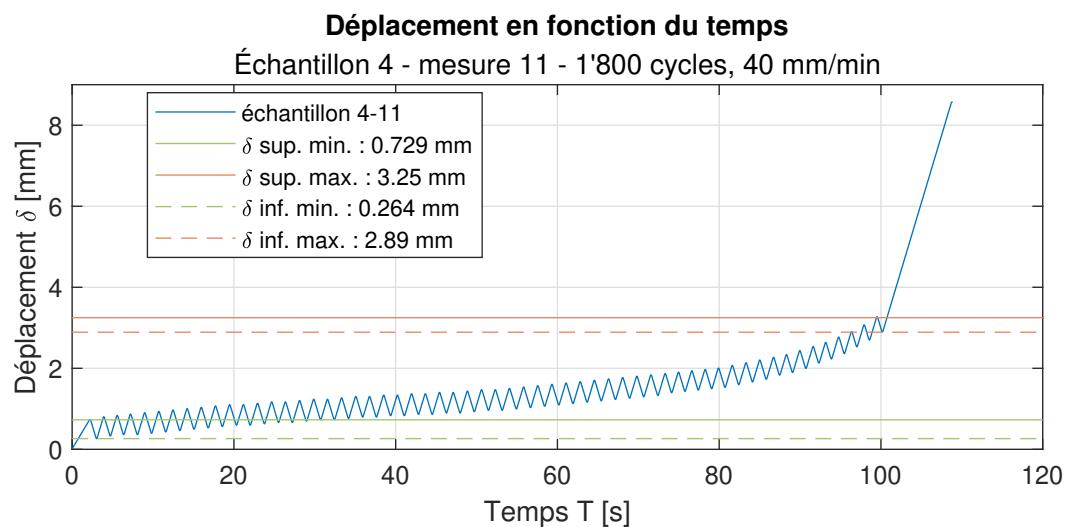


**Figure B.25 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-10, Déplacement en fonction du Temps**

## ANNEXE B. MESURES



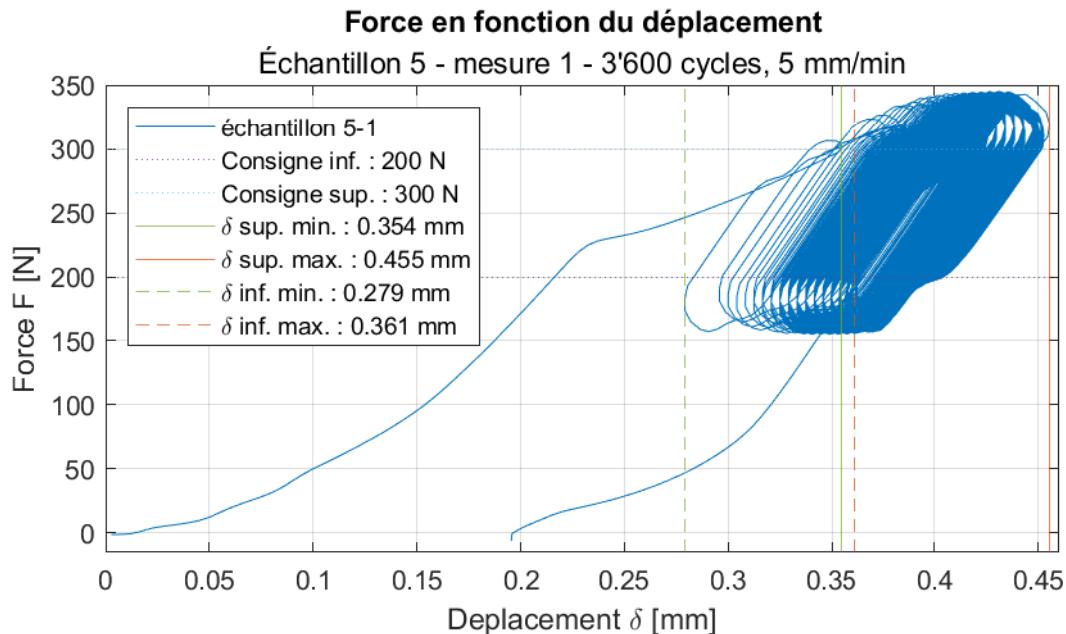
**Figure B.26 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-11, Force en fonction du Déplacement**



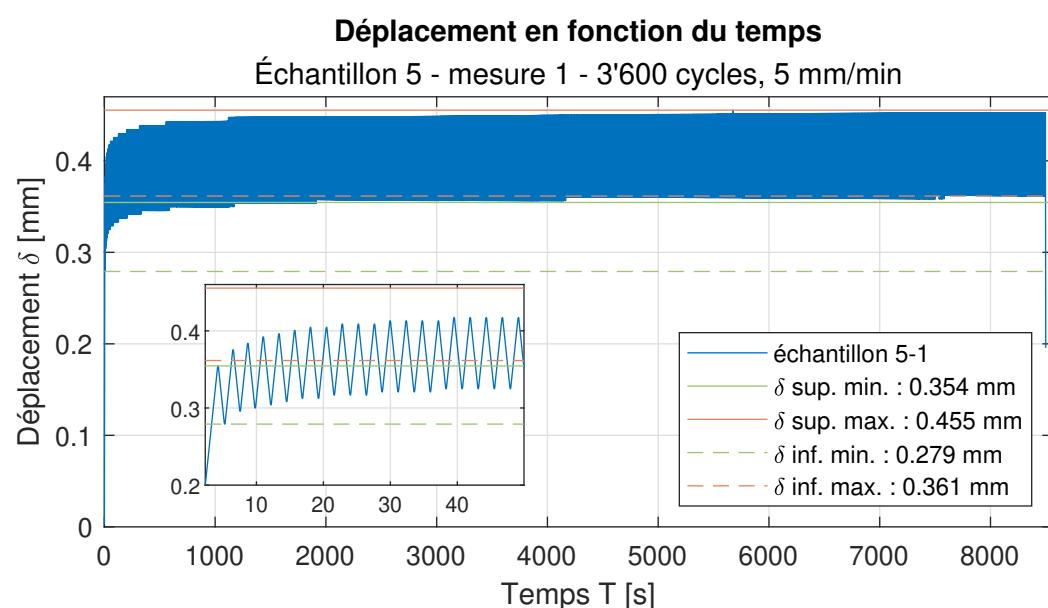
**Figure B.27 – Test cyclique en traction de l'échantillon 4-11, Déplacement en fonction du Temps**

## B.2. ÉCHANTILLONS DE SERTISSAGE

### Échantillon 5

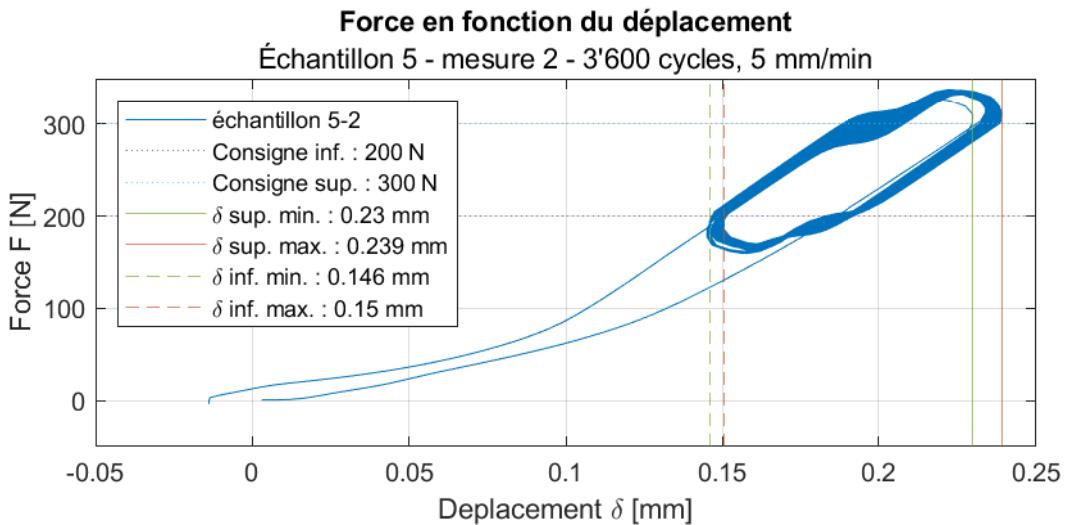


**Figure B.28 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-1, Force en fonction du Déplacement**

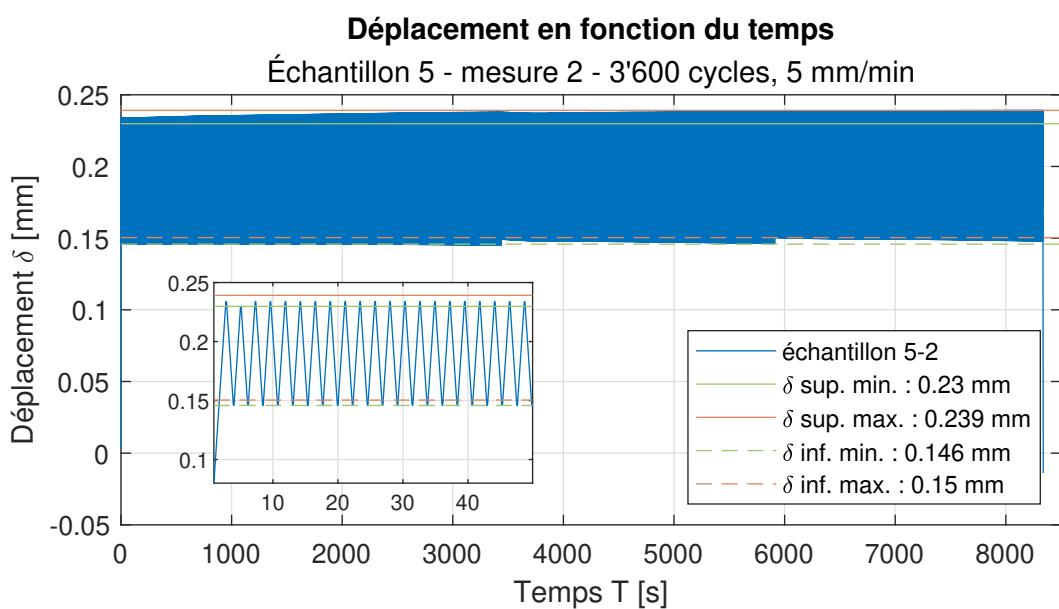


**Figure B.29 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-1, Déplacement en fonction du Temps**

## ANNEXE B. MESURES

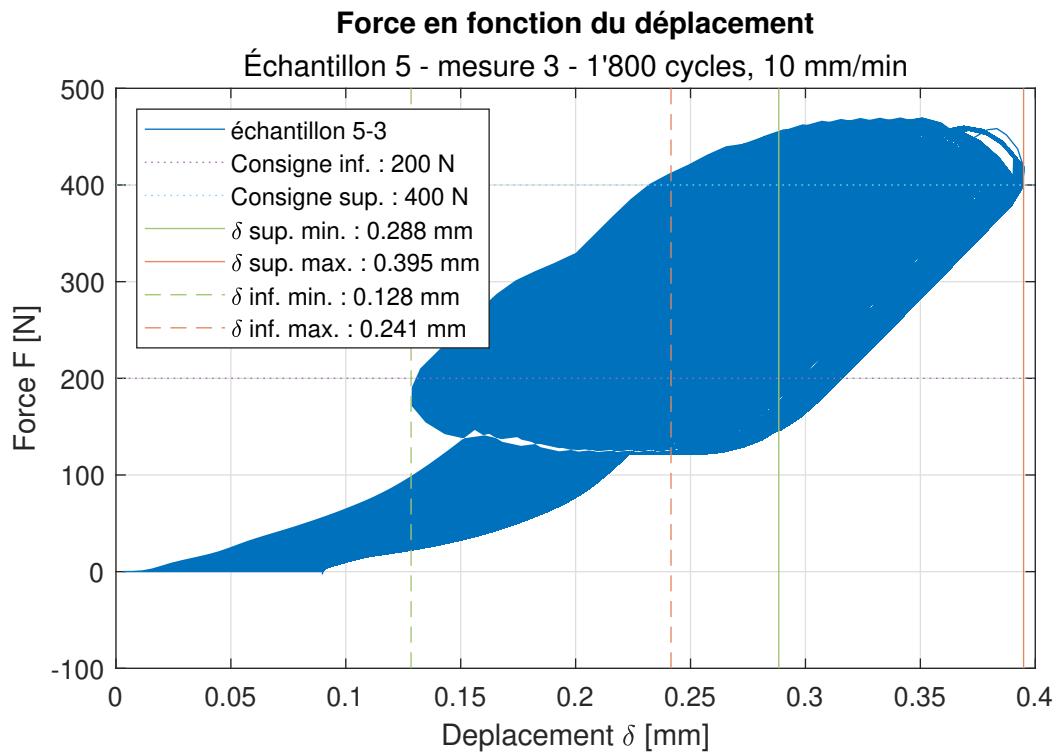


**Figure B.30 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-2, Force en fonction du Déplacement**

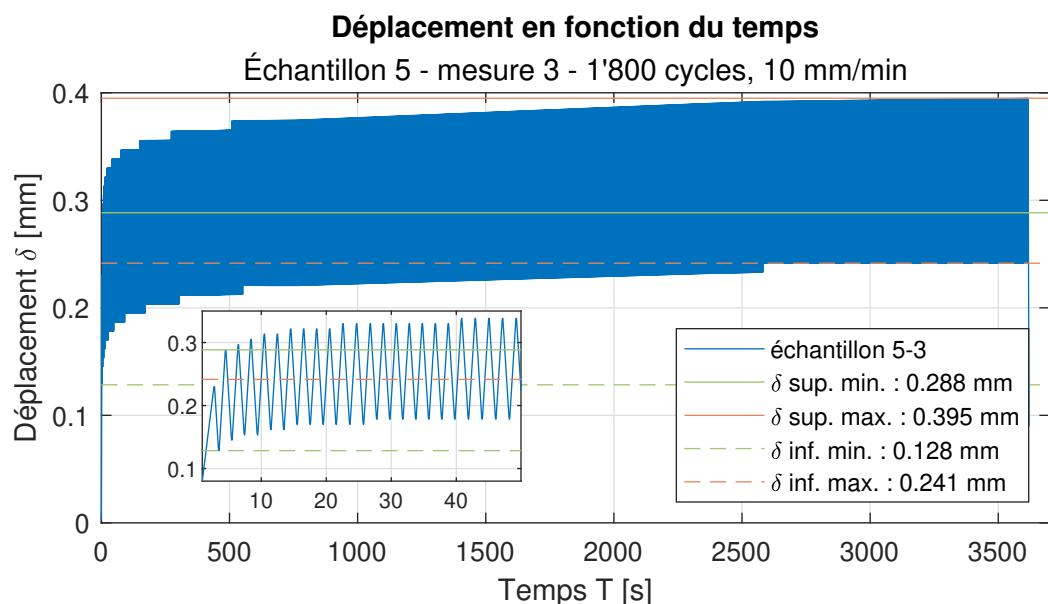


**Figure B.31 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-2, Déplacement en fonction du Temps**

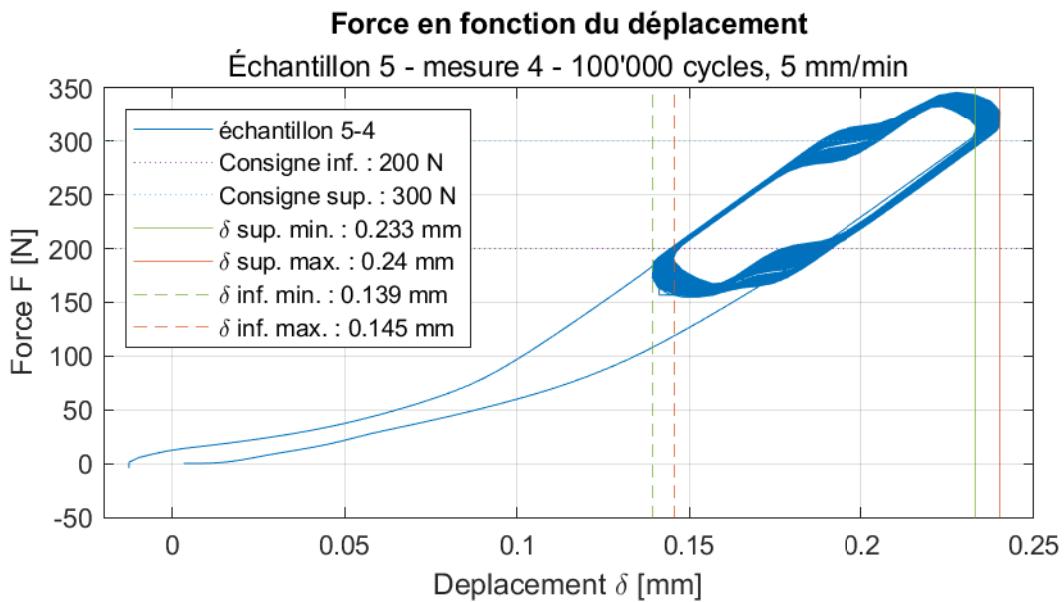
## B.2. ÉCHANTILLONS DE SERTISSAGE



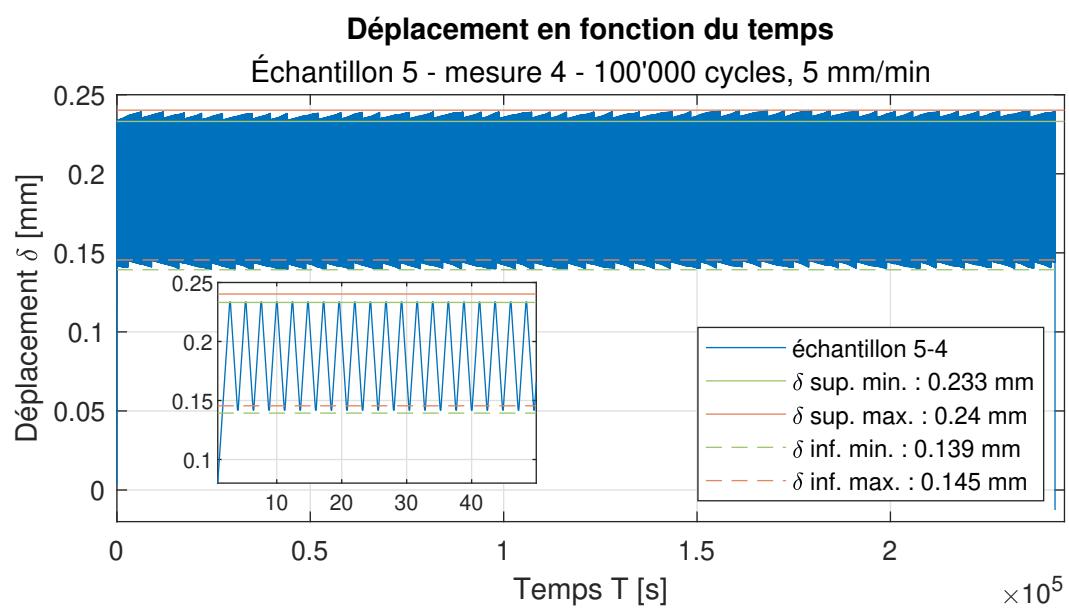
**Figure B.32 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-3, Force en fonction du Déplacement**



**Figure B.33 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-3, Déplacement en fonction du Temps**

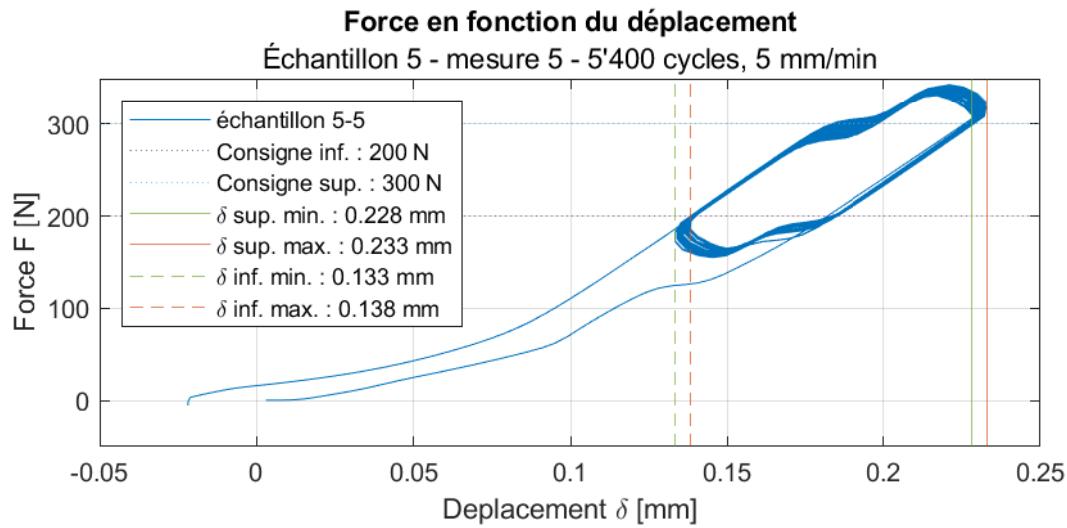


**Figure B.34 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-4, Force en fonction du Déplacement**

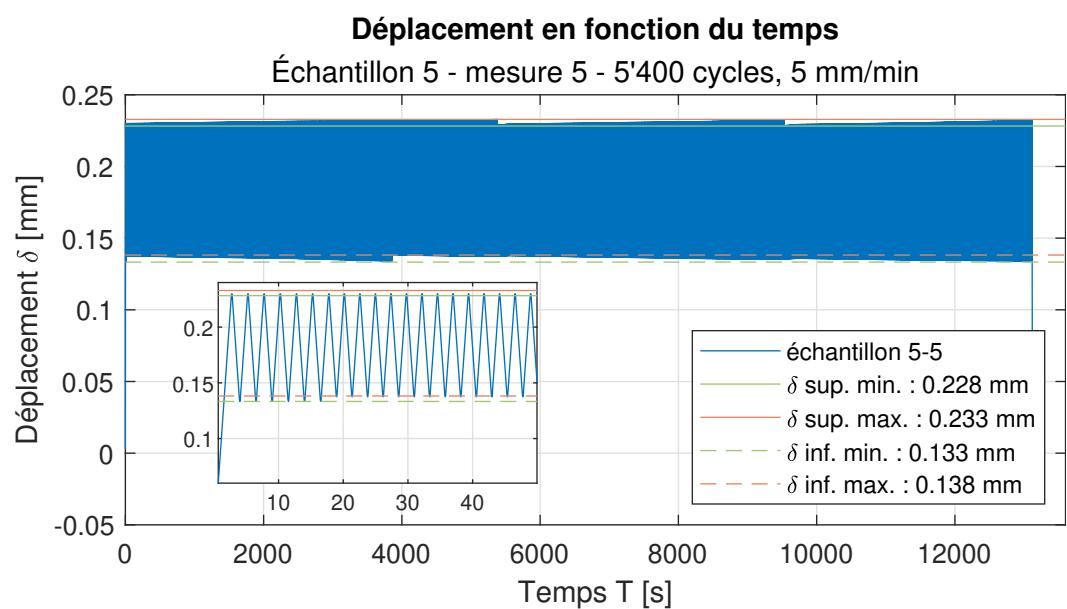


**Figure B.35 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-4, Déplacement en fonction du Temps**

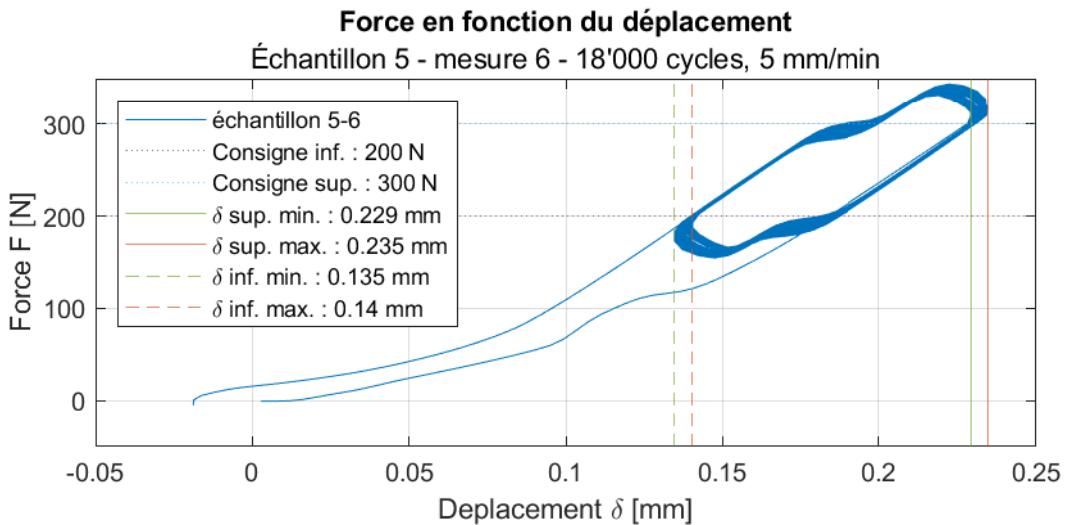
## B.2. ÉCHANTILLONS DE SERTISSAGE



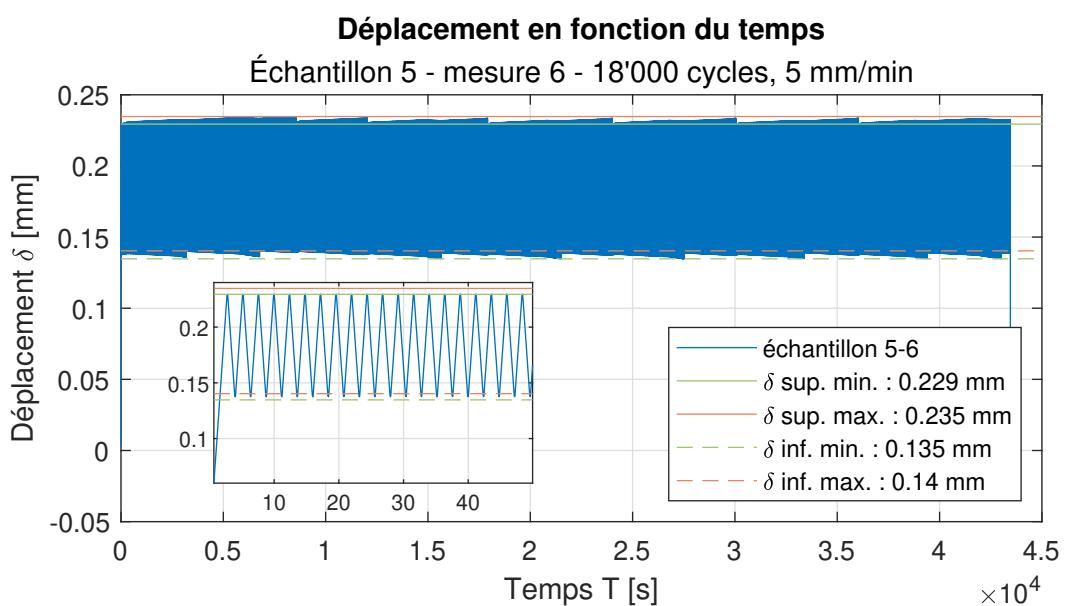
**Figure B.36 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-5, Force en fonction du Déplacement**



**Figure B.37 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-5, Déplacement en fonction du Temps**

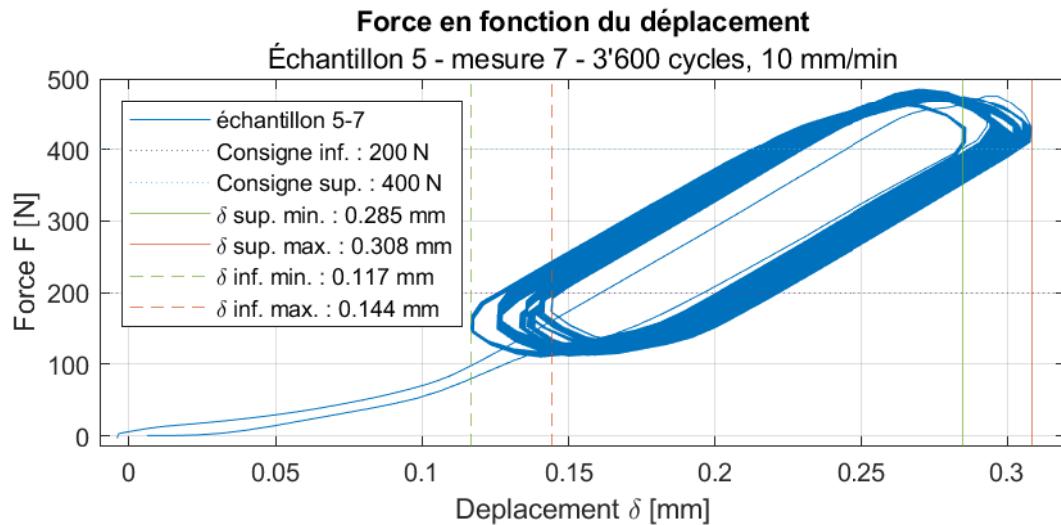


**Figure B.38 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-6, Force en fonction du Déplacement**

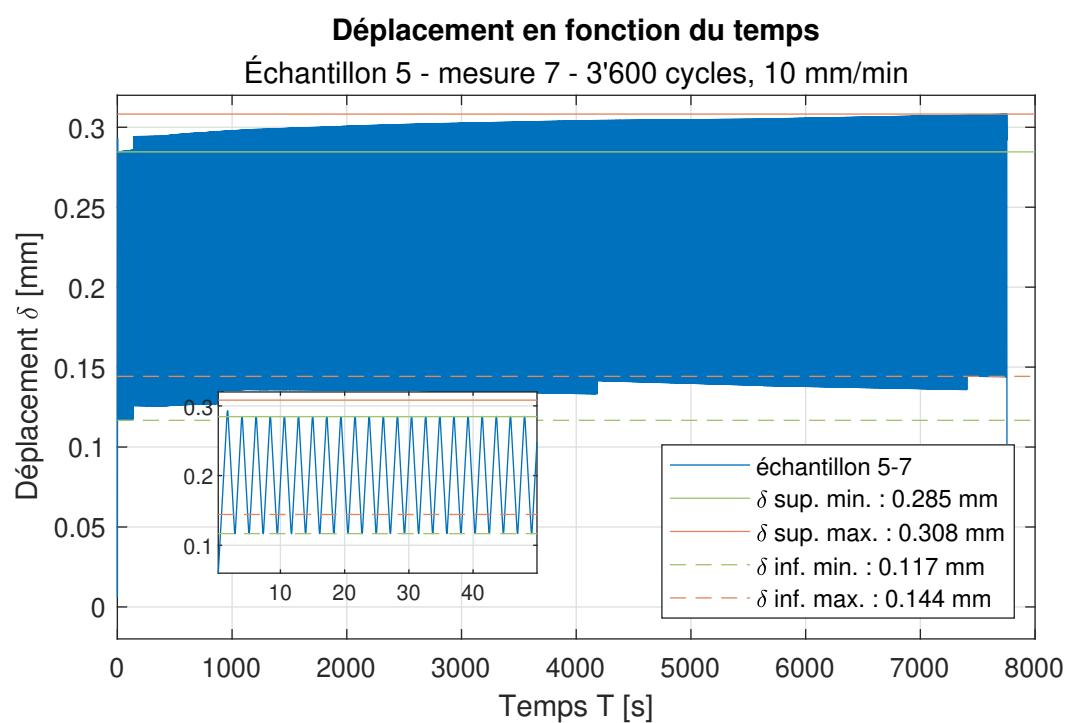


**Figure B.39 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-6, Déplacement en fonction du Temps**

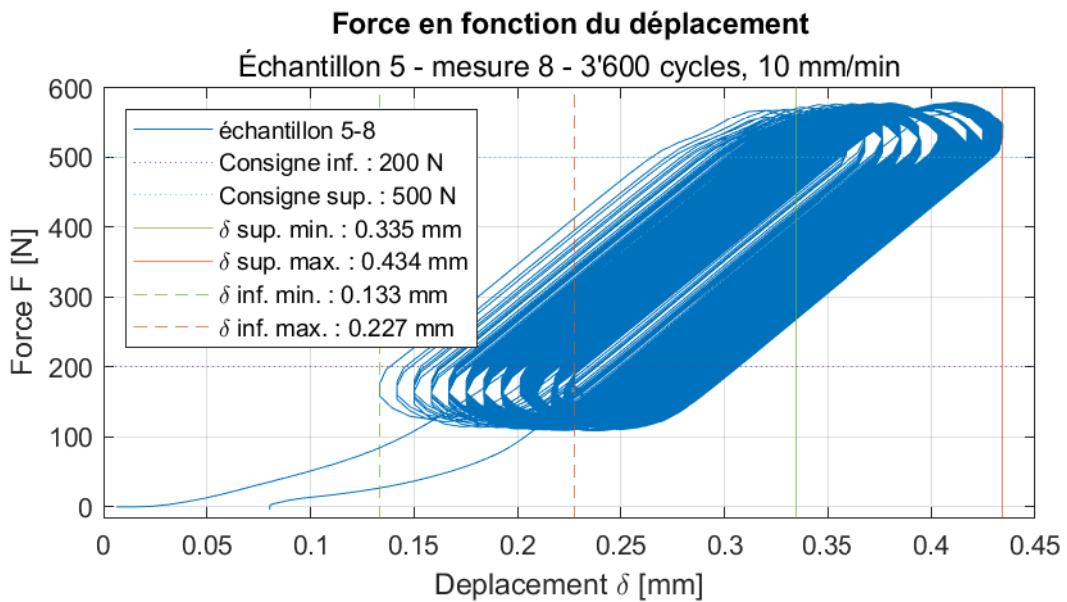
## B.2. ÉCHANTILLONS DE SERTISSAGE



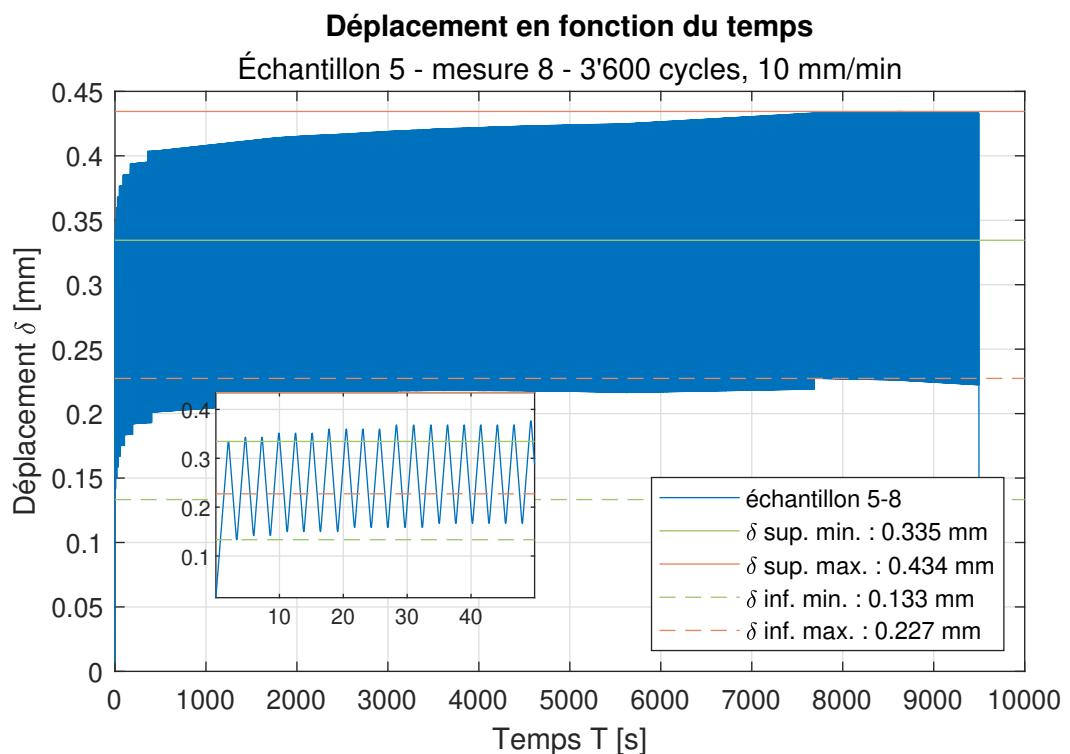
**Figure B.40 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-7, Force en fonction du Déplacement**



**Figure B.41 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-7, Déplacement en fonction du Temps**

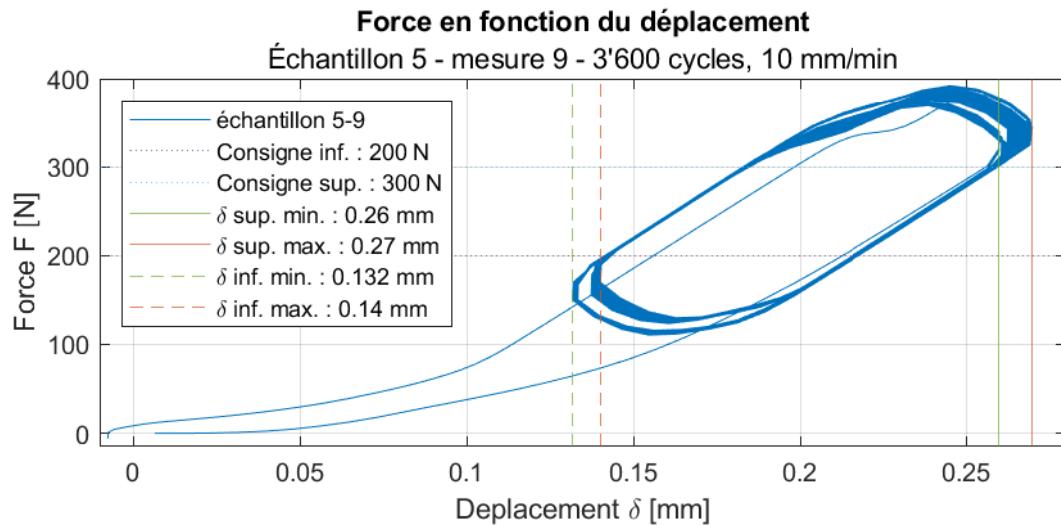


**Figure B.42 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-8, Force en fonction du Déplacement**

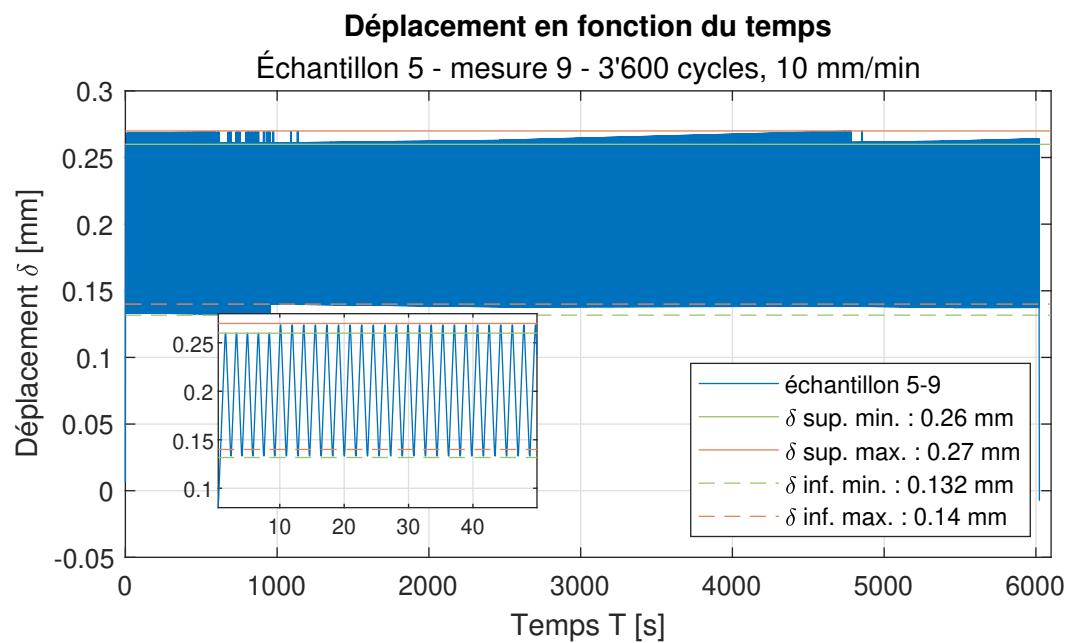


**Figure B.43 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-8, Déplacement en fonction du Temps**

## B.2. ÉCHANTILLONS DE SERTISSAGE

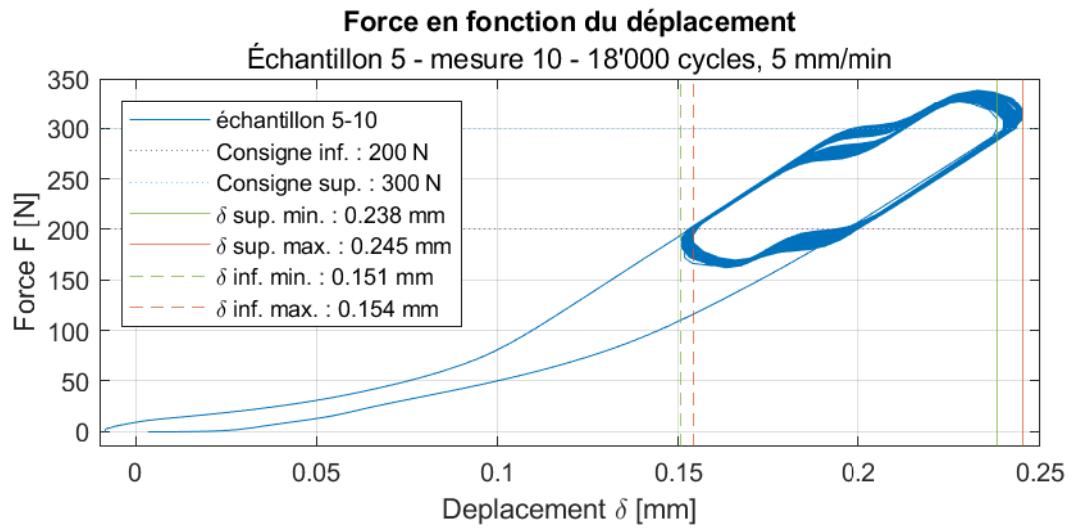


**Figure B.44 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-9, Force en fonction du Déplacement**

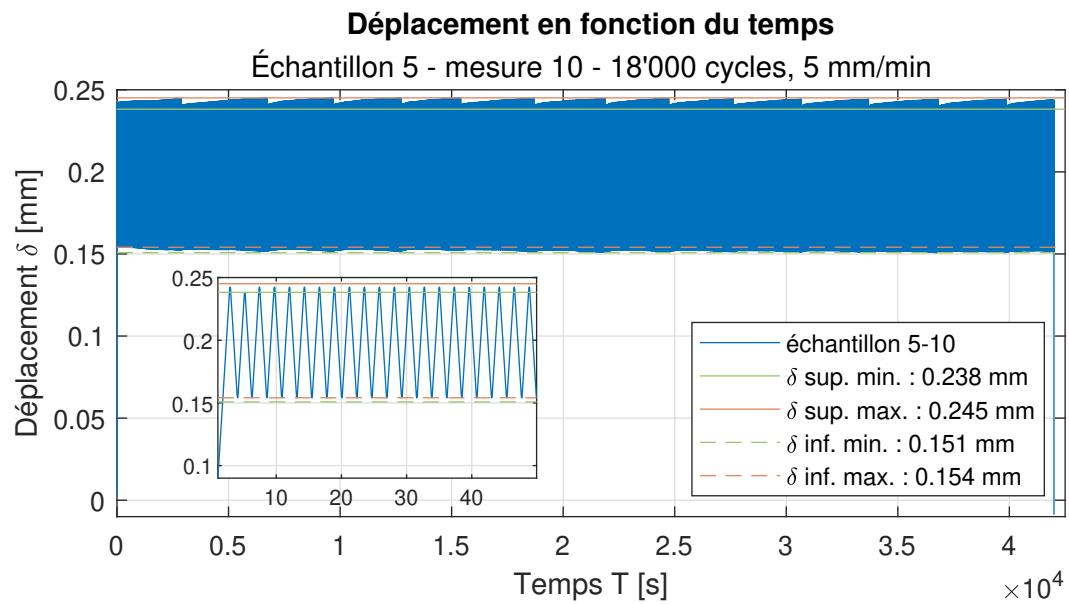


**Figure B.45 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-9, Déplacement en fonction du Temps**

## ANNEXE B. MESURES

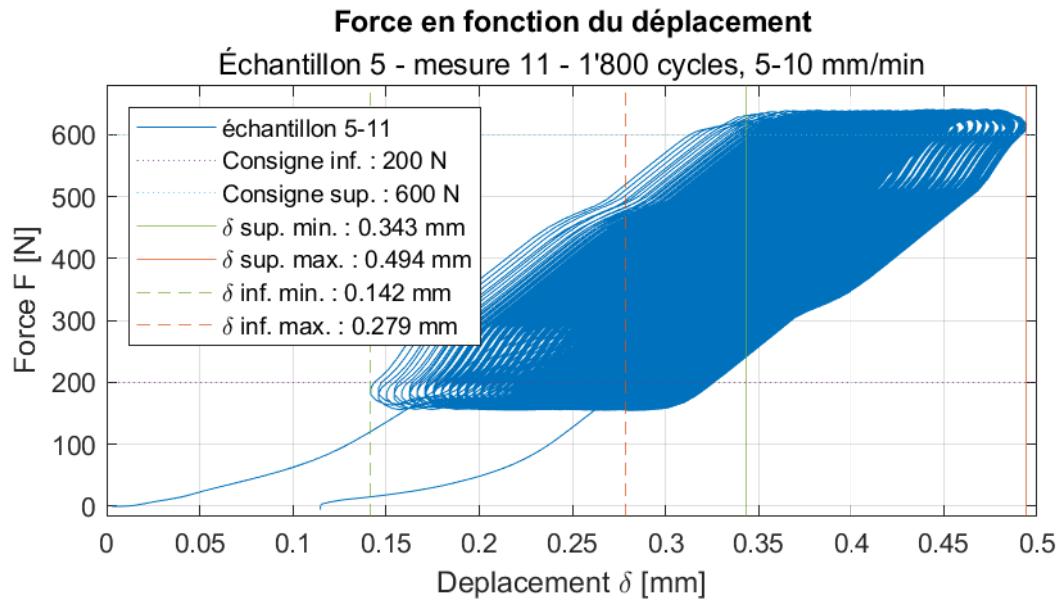


**Figure B.46 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-10, Force en fonction du Déplacement**

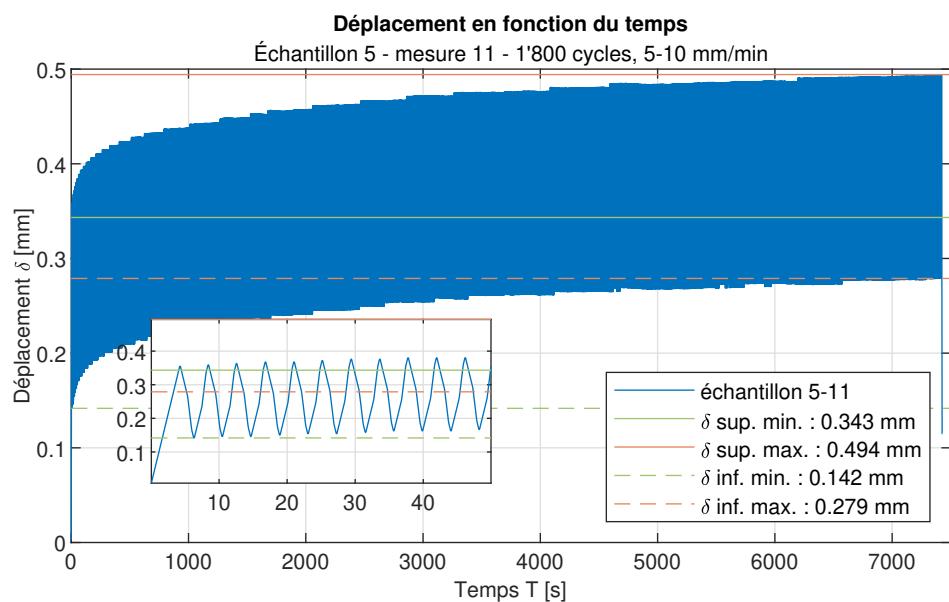


**Figure B.47 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-10, Déplacement en fonction du Temps**

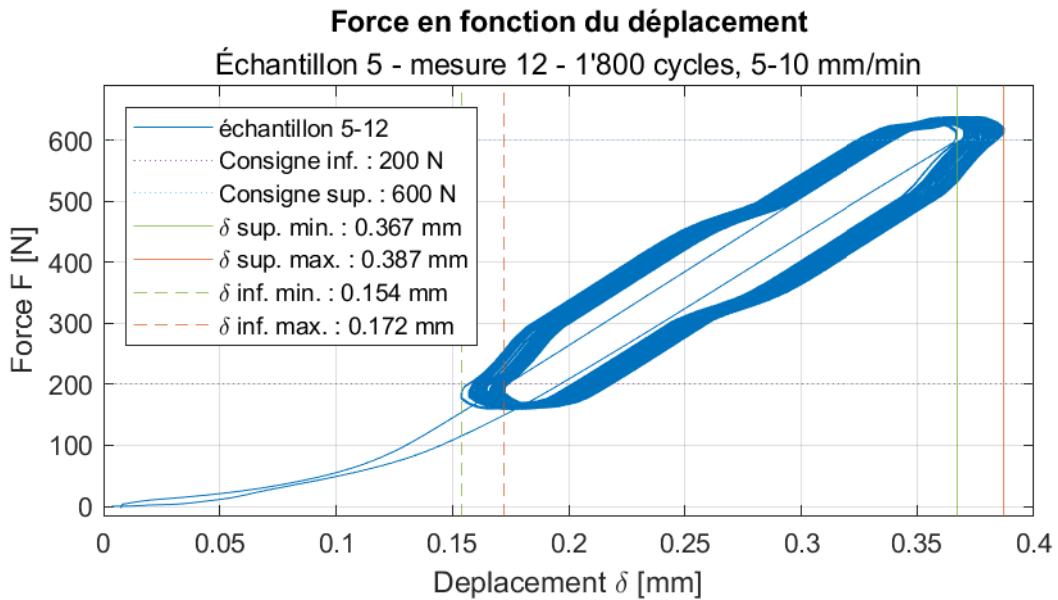
## B.2. ÉCHANTILLONS DE SERTISSAGE



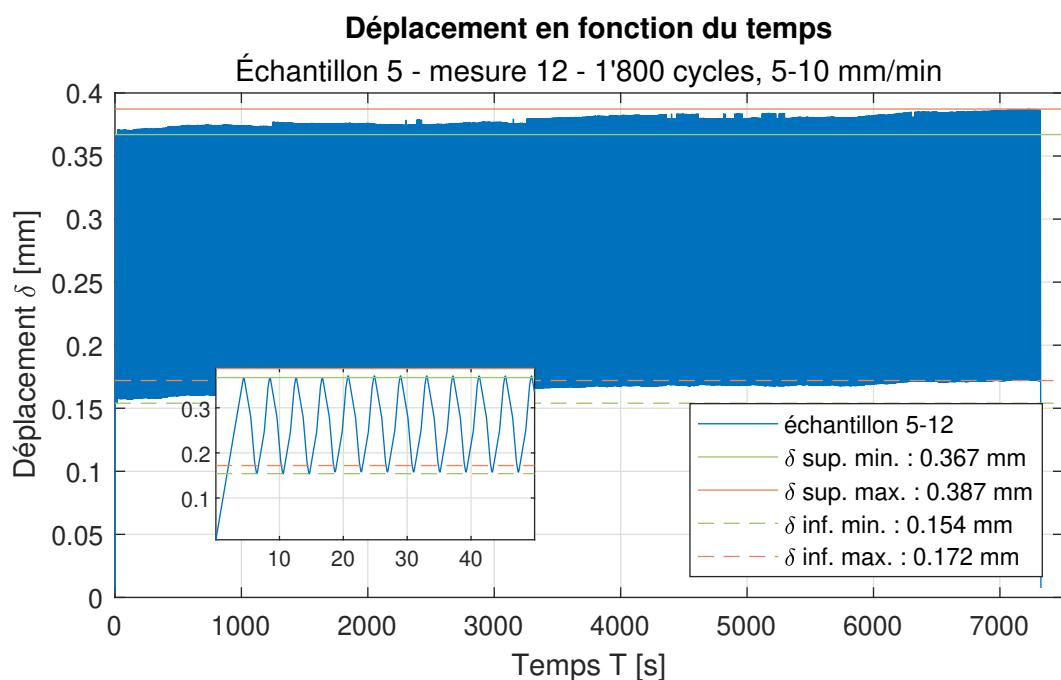
**Figure B.48 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-11, Force en fonction du Déplacement**



**Figure B.49 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-11, Déplacement en fonction du Temps**

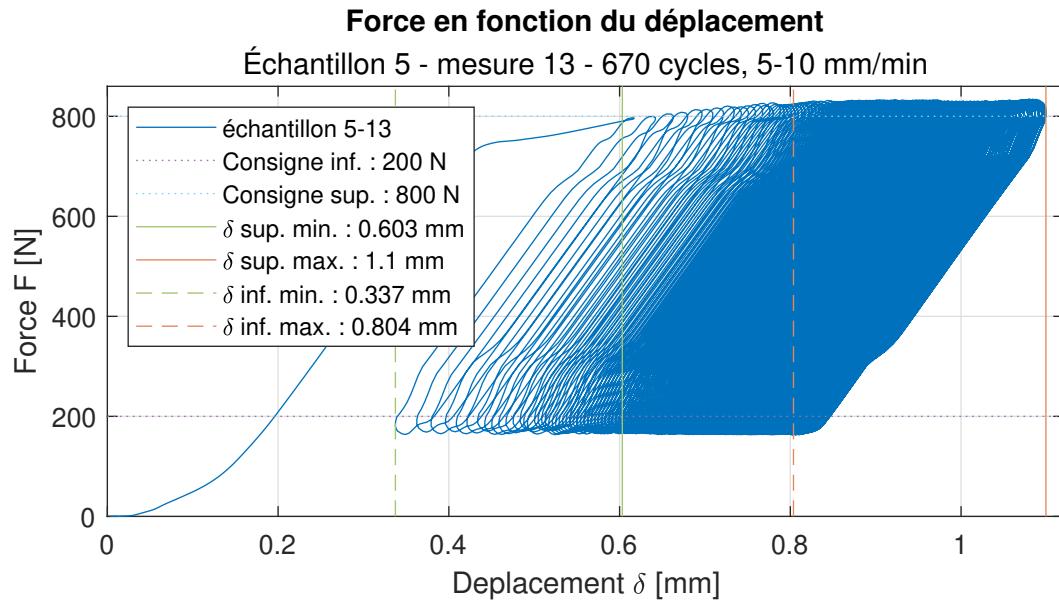


**Figure B.50 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-12, Force en fonction du Déplacement**

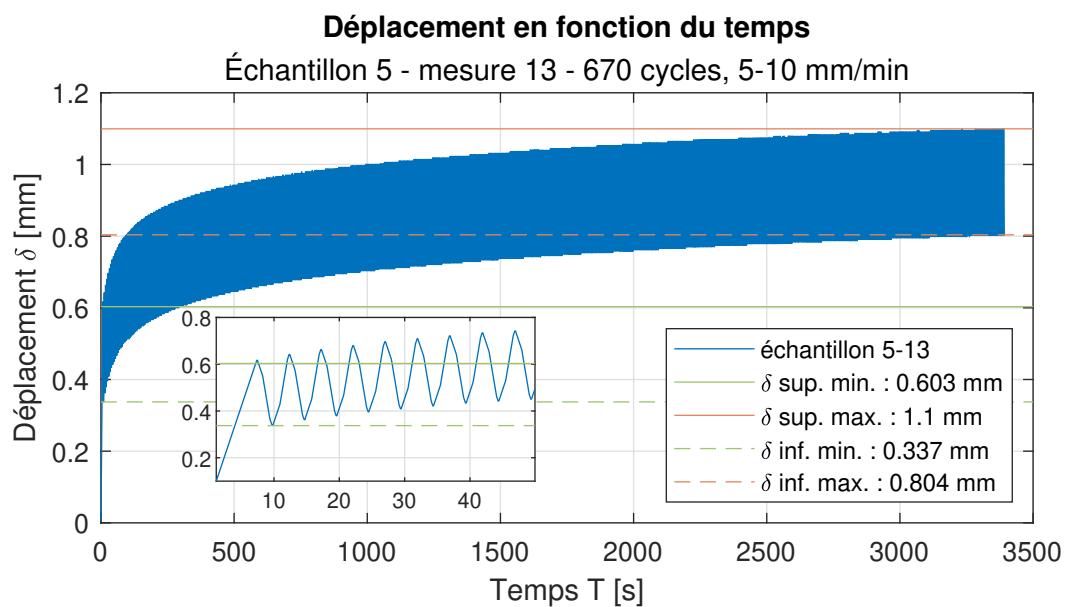


**Figure B.51 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-12, Déplacement en fonction du Temps**

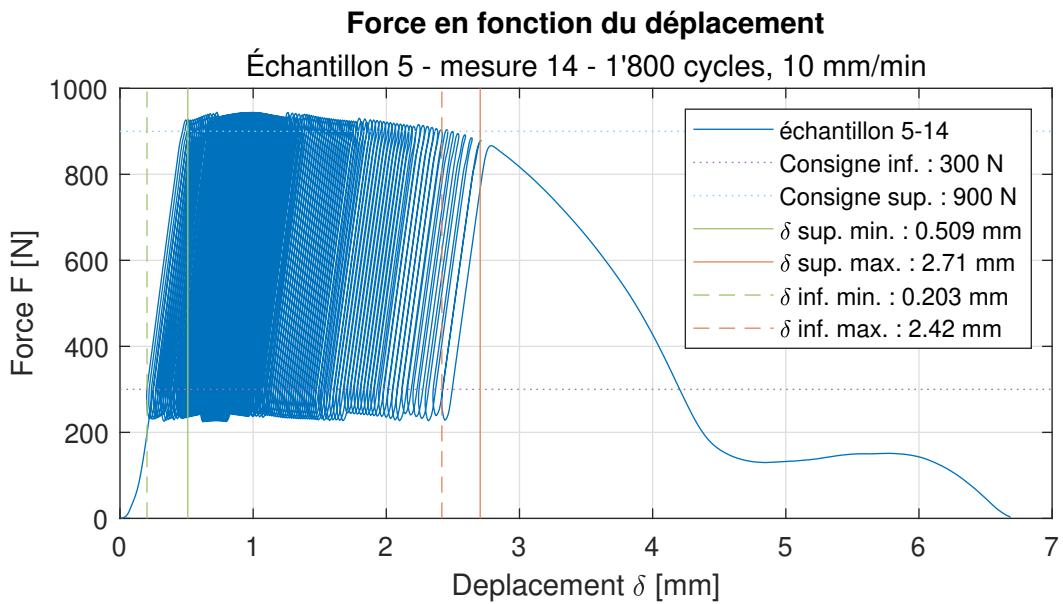
## B.2. ÉCHANTILLONS DE SERTISSAGE



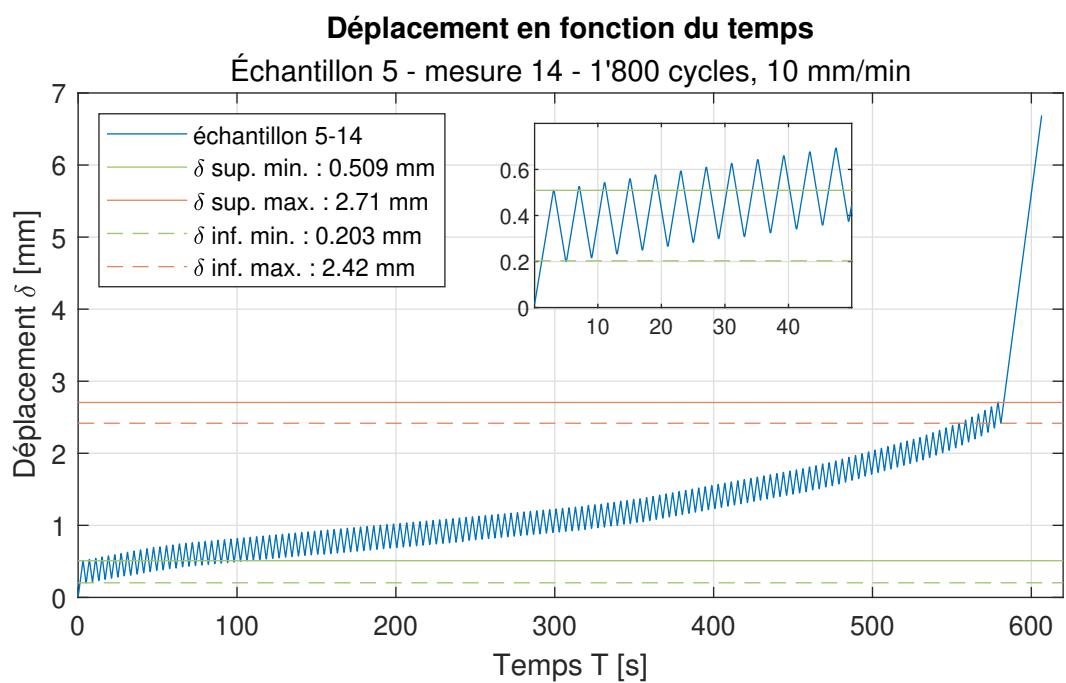
**Figure B.52 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-13, Force en fonction du Déplacement**



**Figure B.53 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-13, Déplacement en fonction du Temps**



**Figure B.54 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-14, Force en fonction du Déplacement**



**Figure B.55 – Test cyclique en traction de l'échantillon 5-14, Déplacement en fonction du Temps**

### B.3. MESURES DU PENDULE DE FOUCAULT

#### B.3 Mesures du Pendule de Foucault

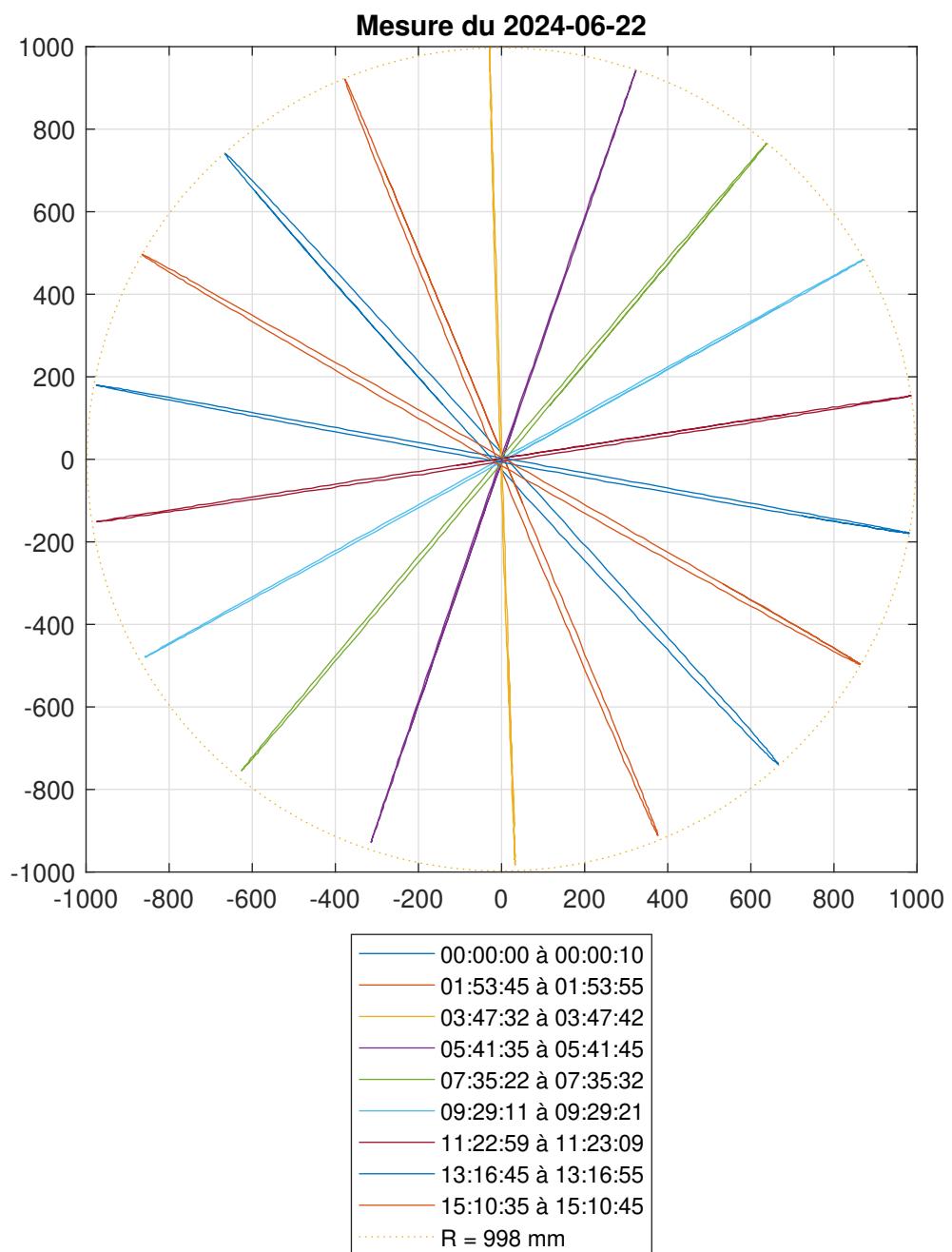
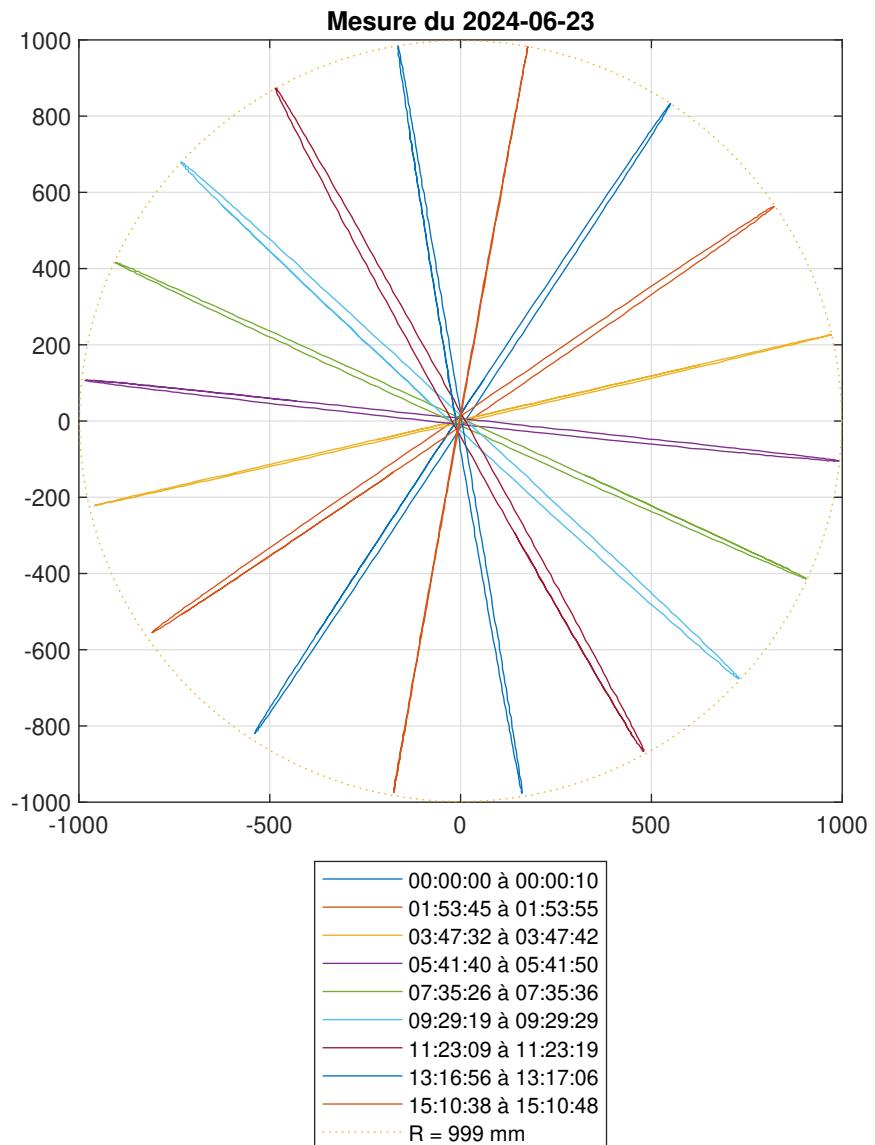
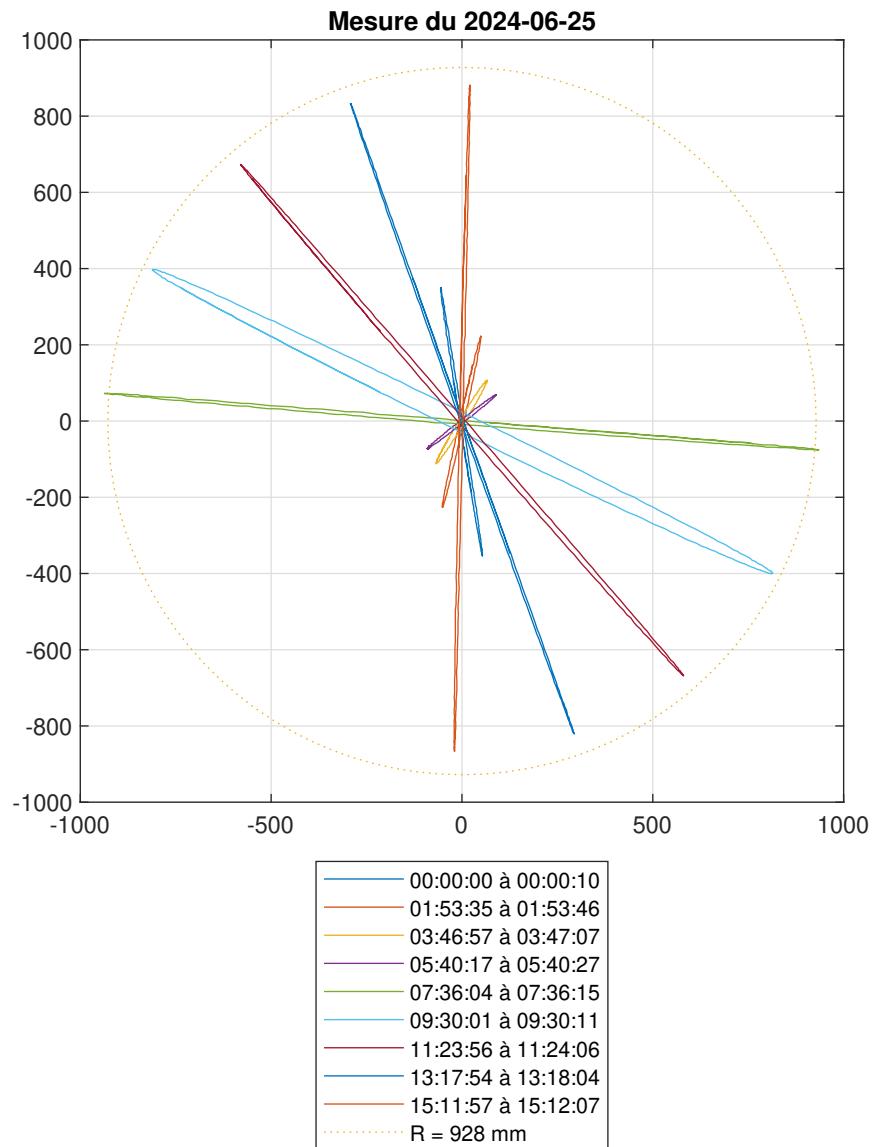


Figure B.56 – Mesure ancien système (22 juin 2024), Y en fonction de X

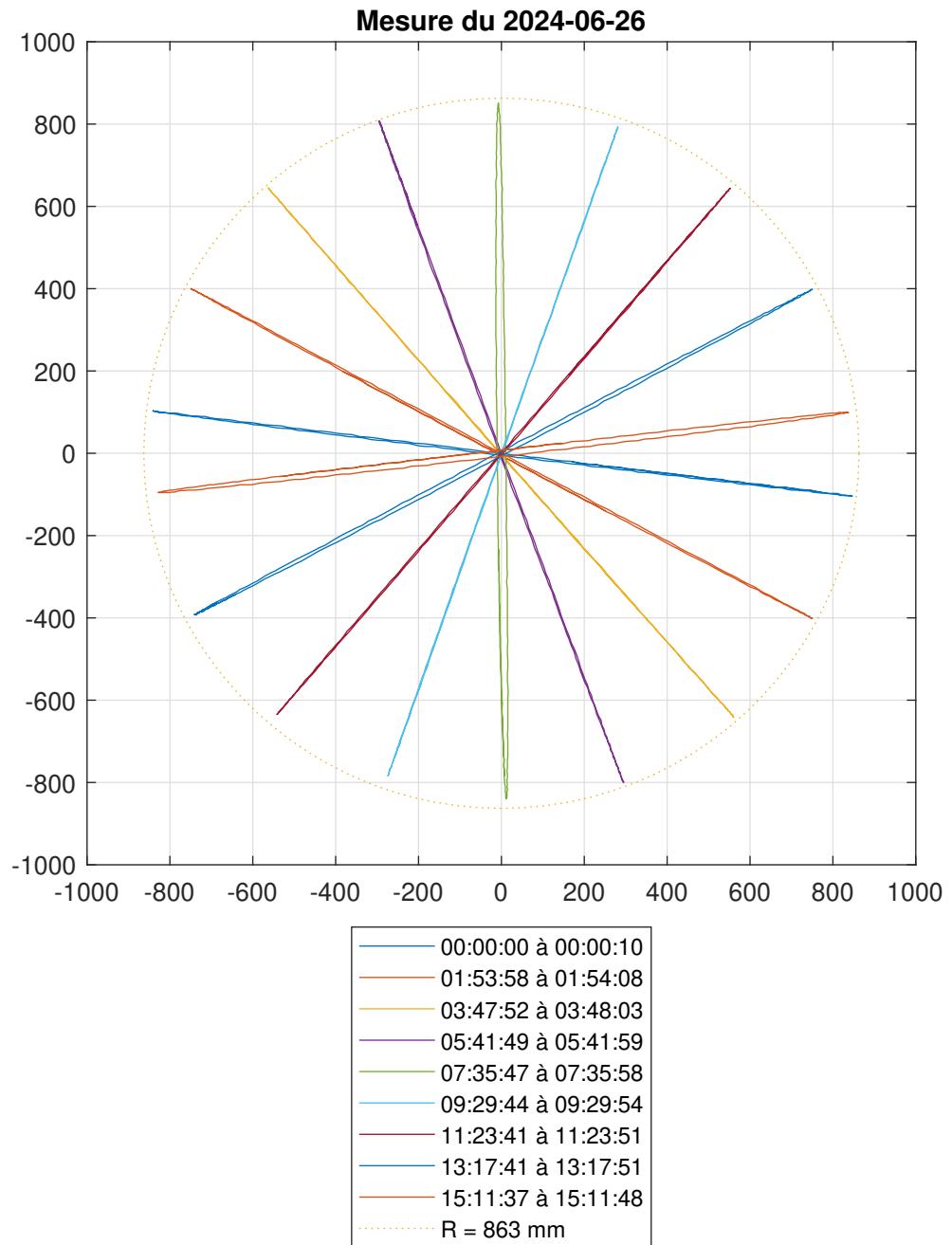


**Figure B.57 – Mesure ancien système (23 juin 2024), Y en fonction de X**

### B.3. MESURES DU PENDULE DE FOUCAULT

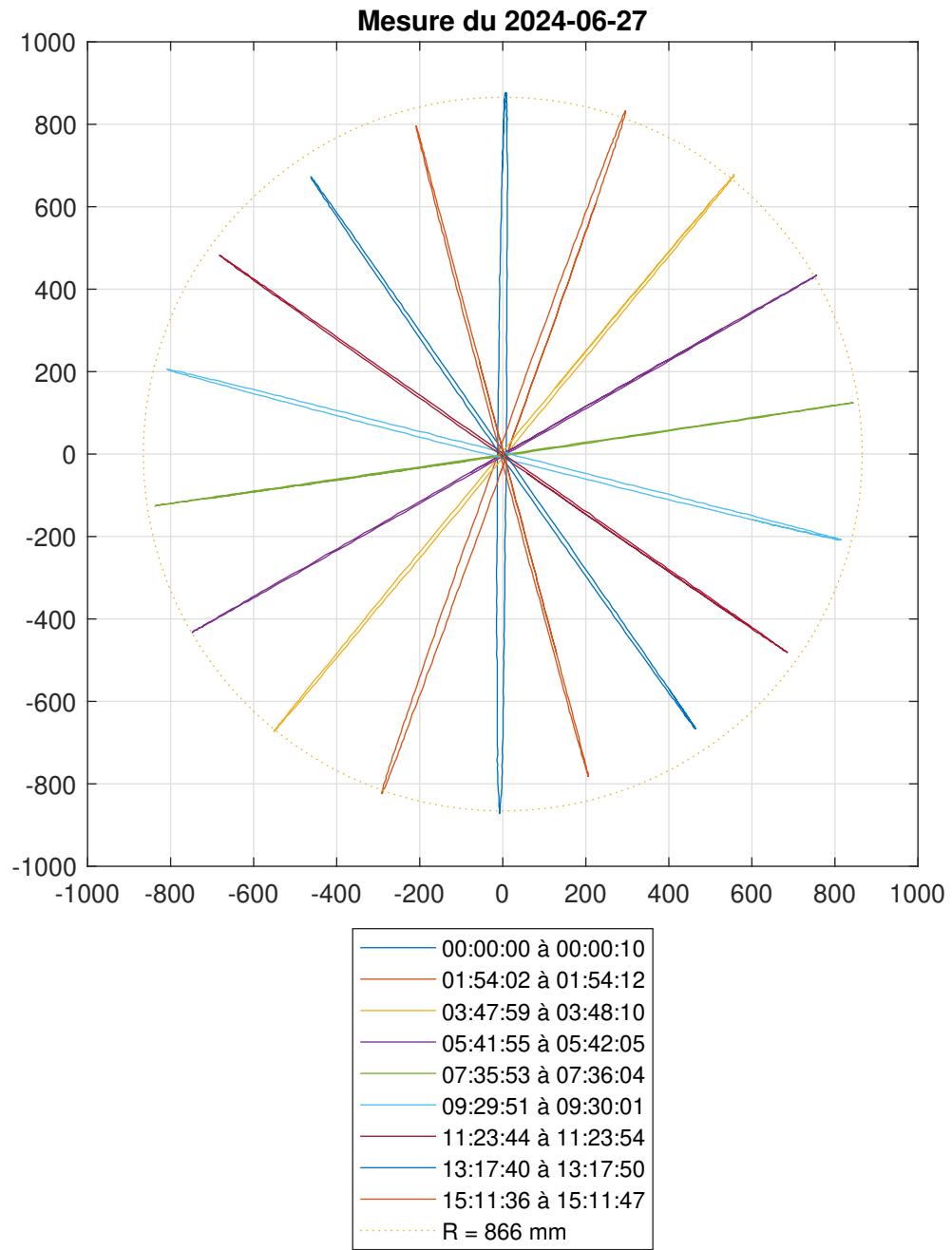


**Figure B.58 – Mesure nouveau système (25 juin 2024), Y en fonction de X**

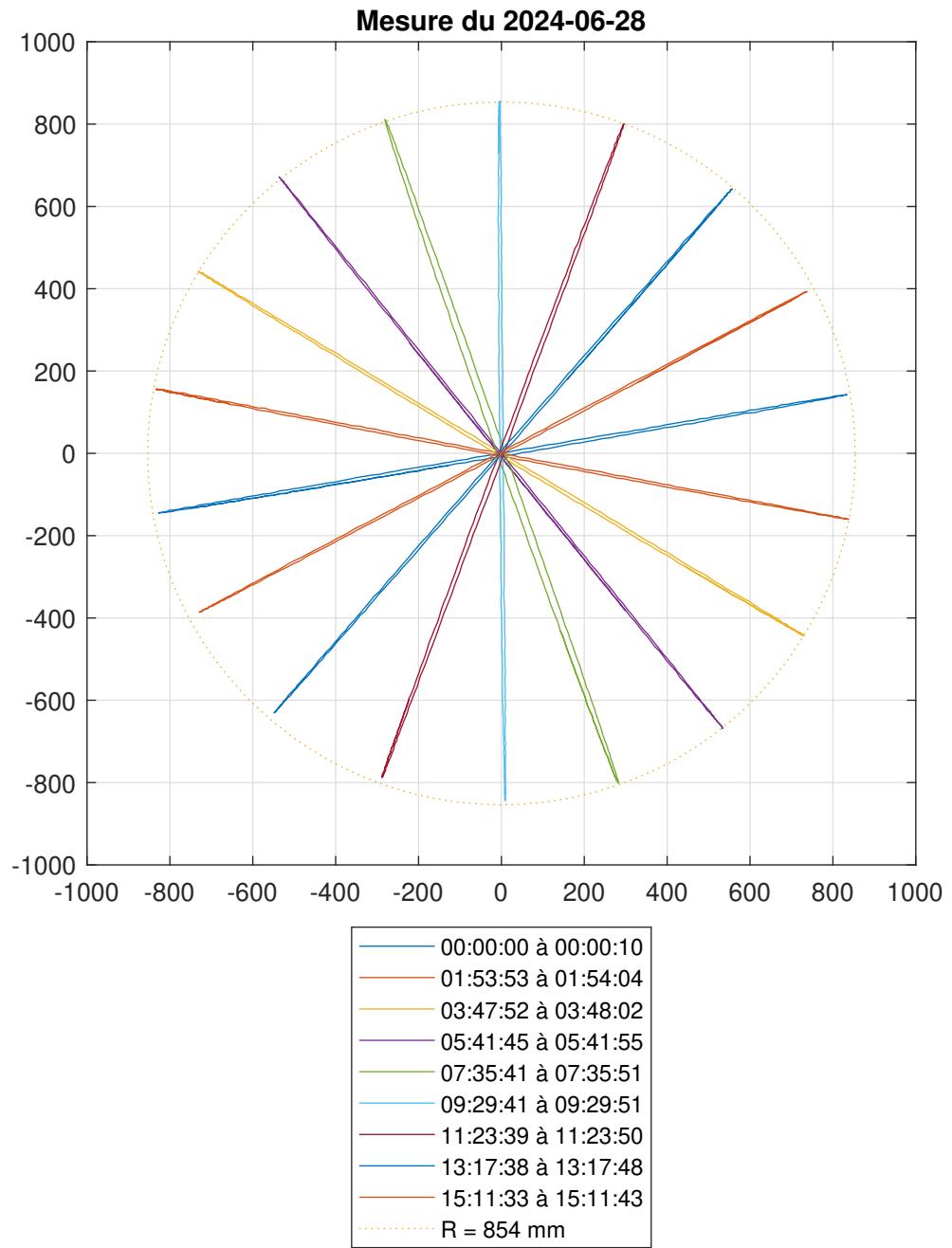


**Figure B.59 – Mesure nouveau système (26 juin 2024), Y en fonction de X**

### B.3. MESURES DU PENDULE DE FOUCAULT

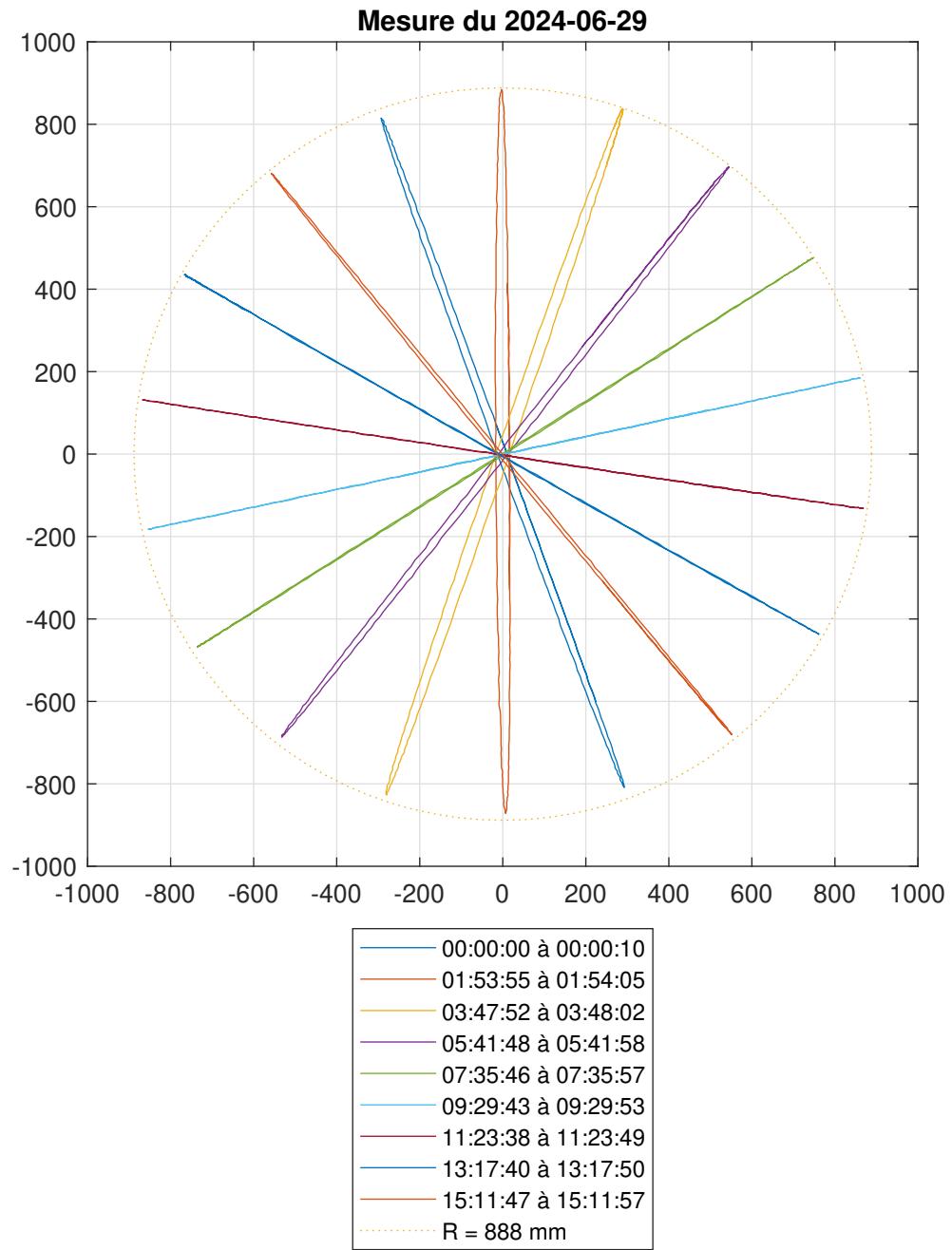


**Figure B.60 – Mesure nouveau système (27 juin 2024), Y en fonction de X**

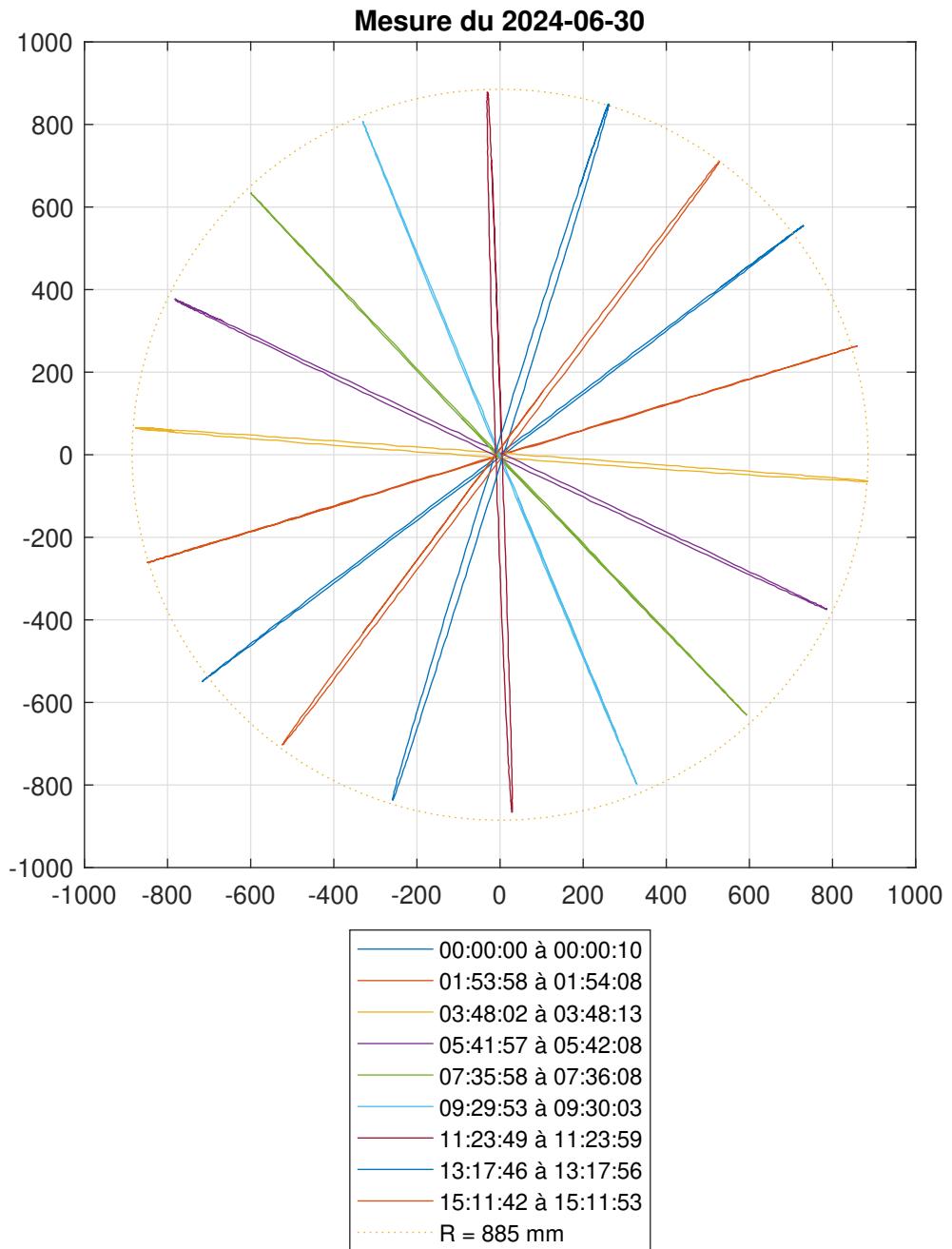


**Figure B.61 – Mesure nouveau système (28 juin 2024), Y en fonction de X**

### B.3. MESURES DU PENDULE DE FOUCault

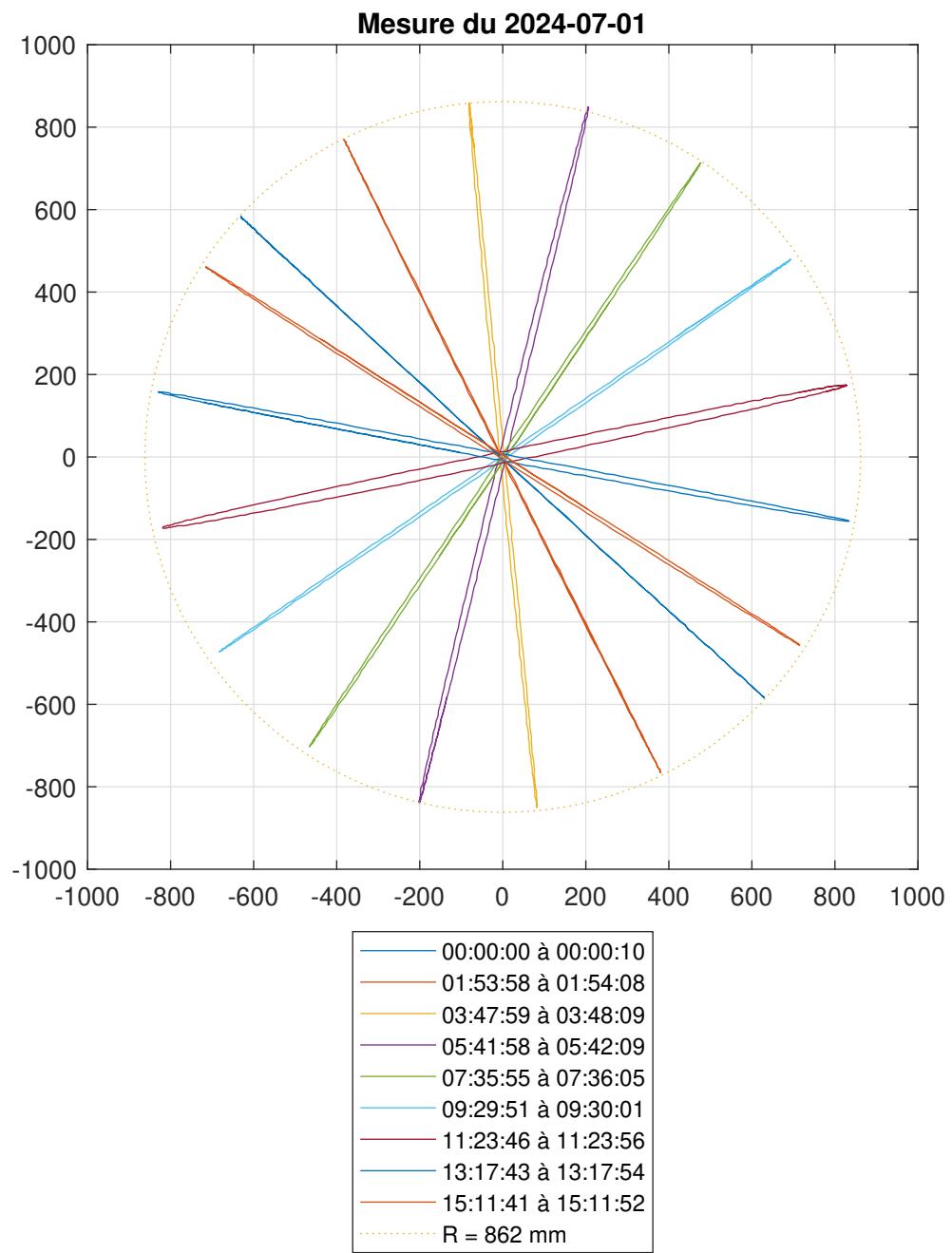


**Figure B.62 – Mesure nouveau système (29 juin 2024), Y en fonction de X**

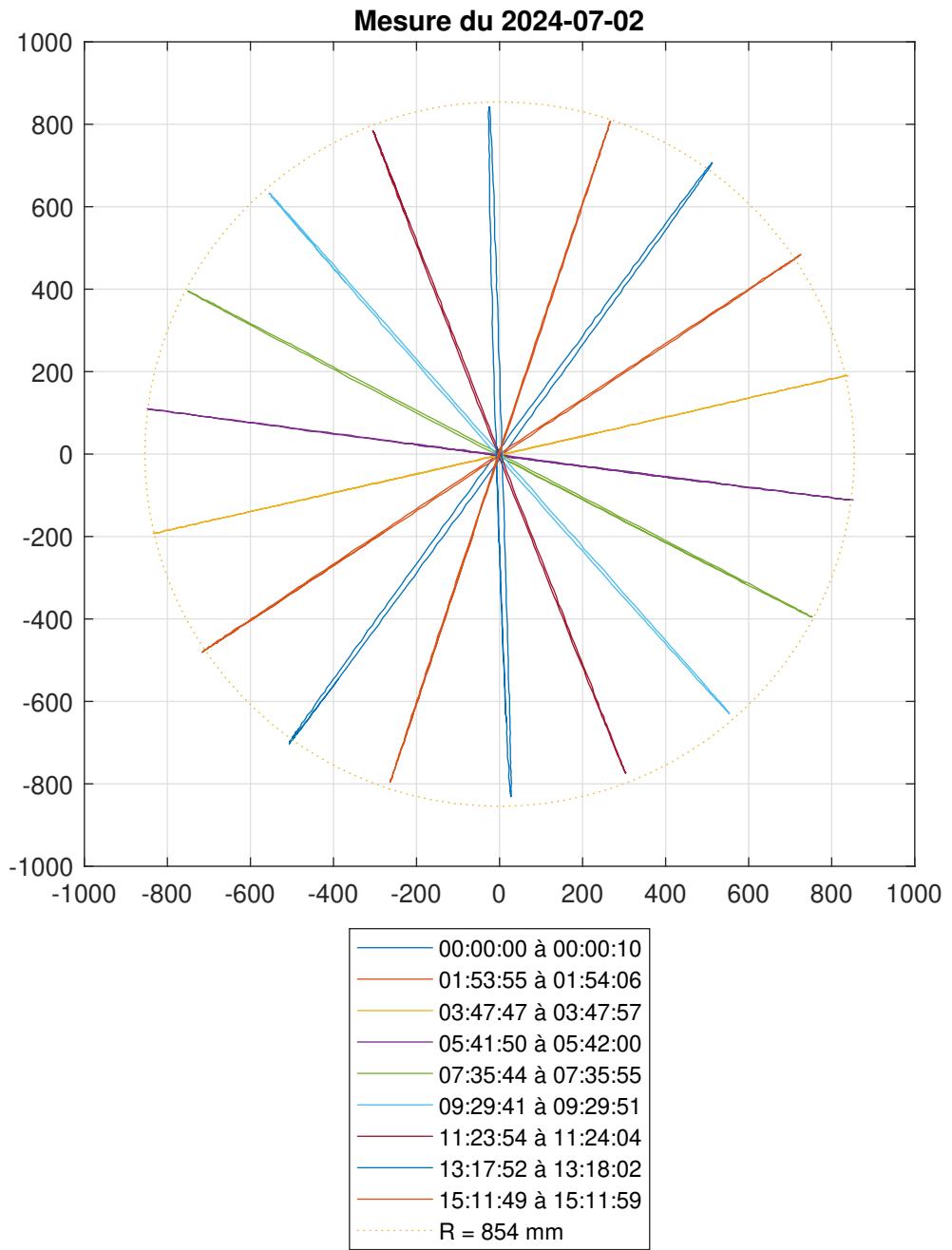


**Figure B.63 – Mesure nouveau système (30 juin 2024), Y en fonction de X**

### B.3. MESURES DU PENDULE DE FOUCAULT

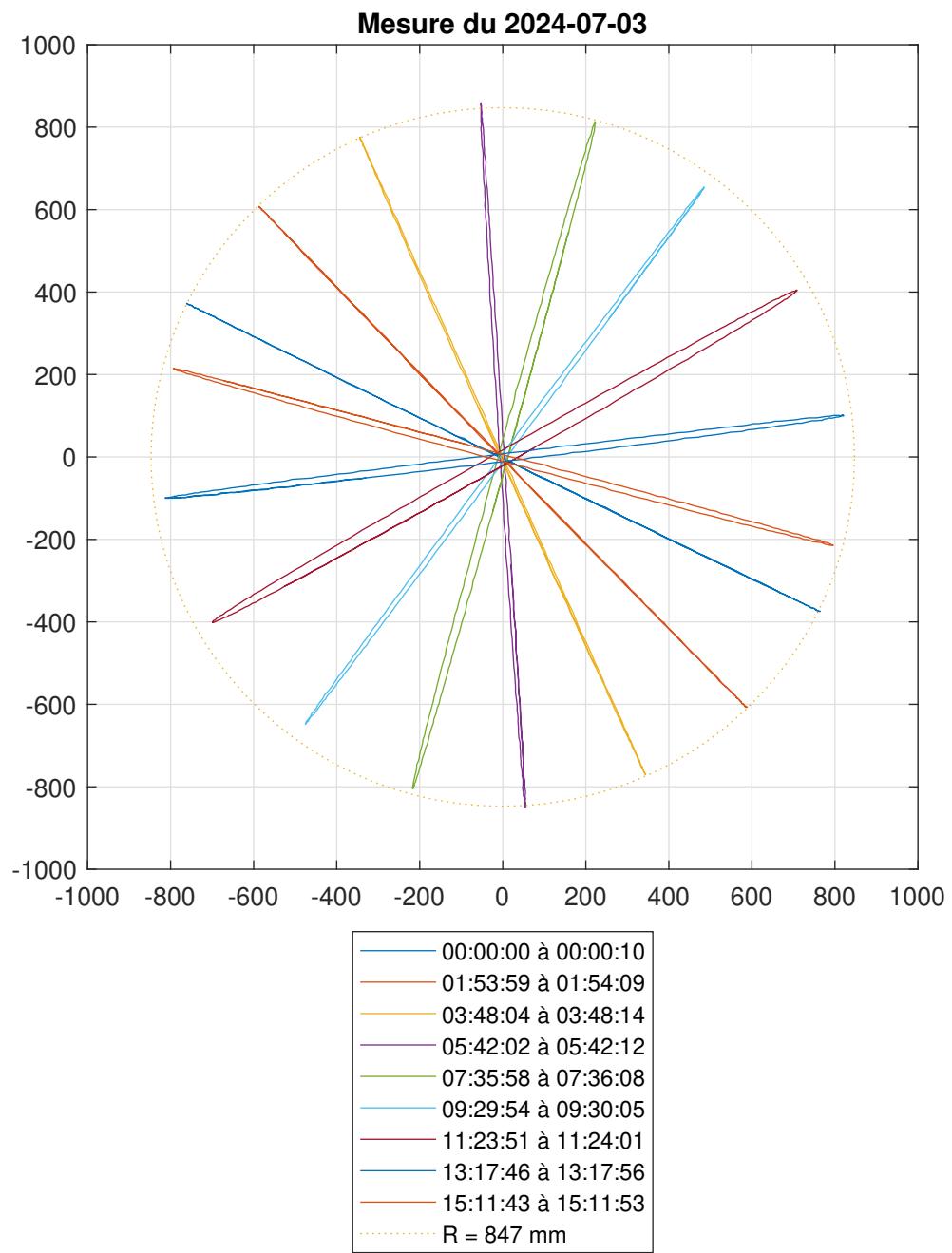


**Figure B.64 – Mesure nouveau système (01 juillet 2024), Y en fonction de X**

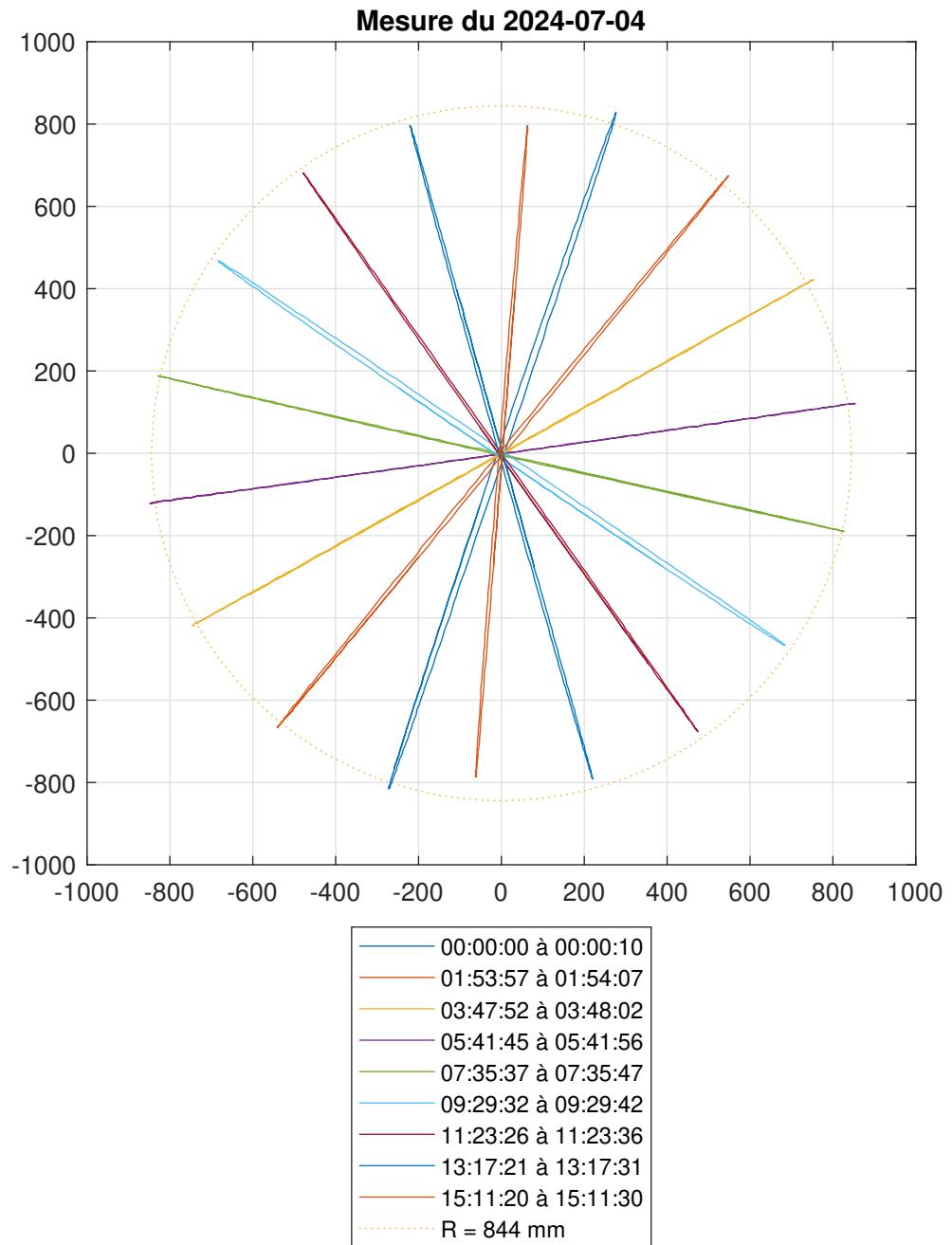


**Figure B.65 – Mesure nouveau système (02 juillet 2024), Y en fonction de X**

### B.3. MESURES DU PENDULE DE FOUCAULT

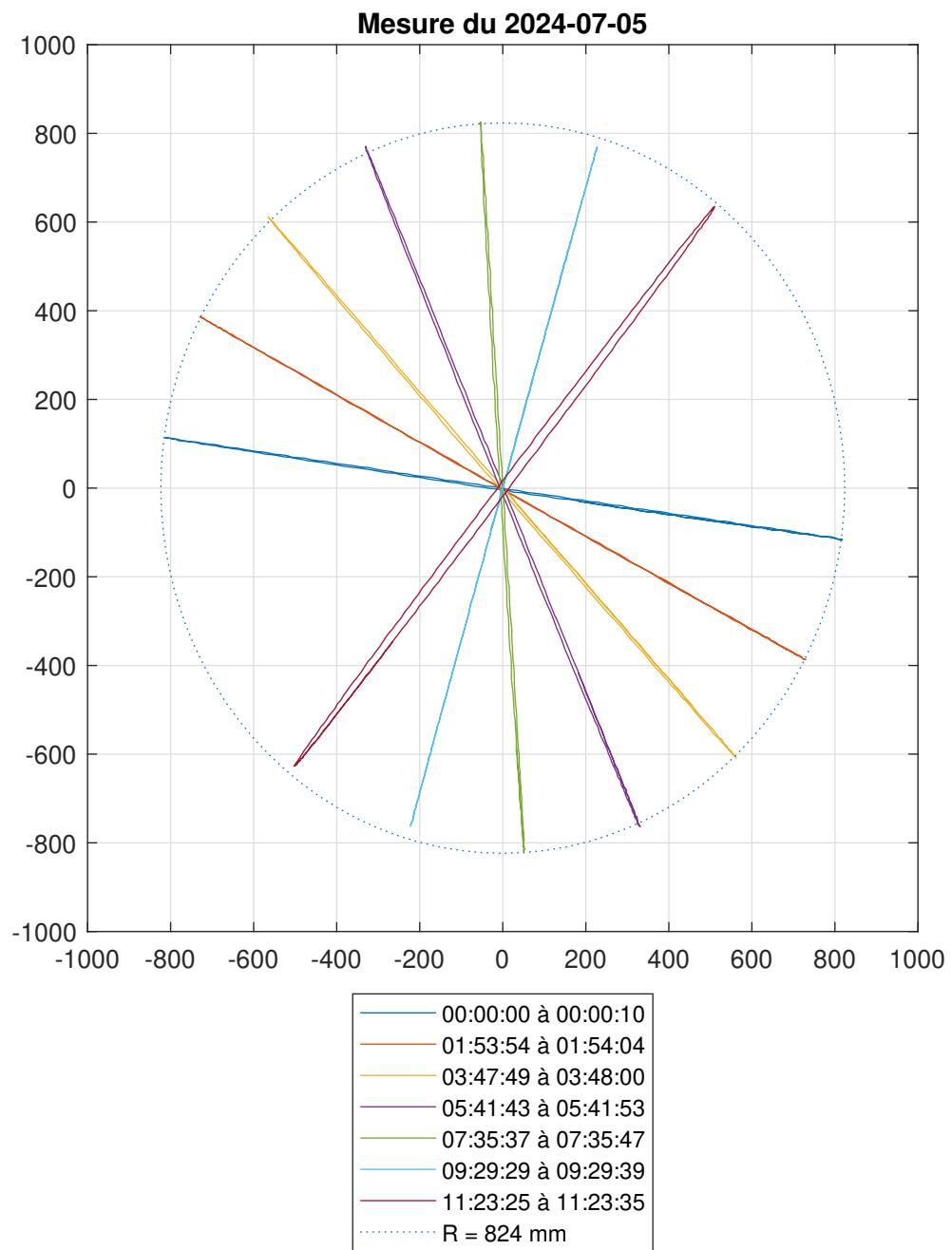


**Figure B.66 – Mesure nouveau système (03 juillet 2024), Y en fonction de X**



**Figure B.67 – Mesure nouveau système (04 juillet 2024), Y en fonction de X**

### B.3. MESURES DU PENDULE DE FOUCAULT



**Figure B.68 – Mesure nouveau système (05 juillet 2024), *Y* en fonction de *X***

### B.3.1 Ellipticité

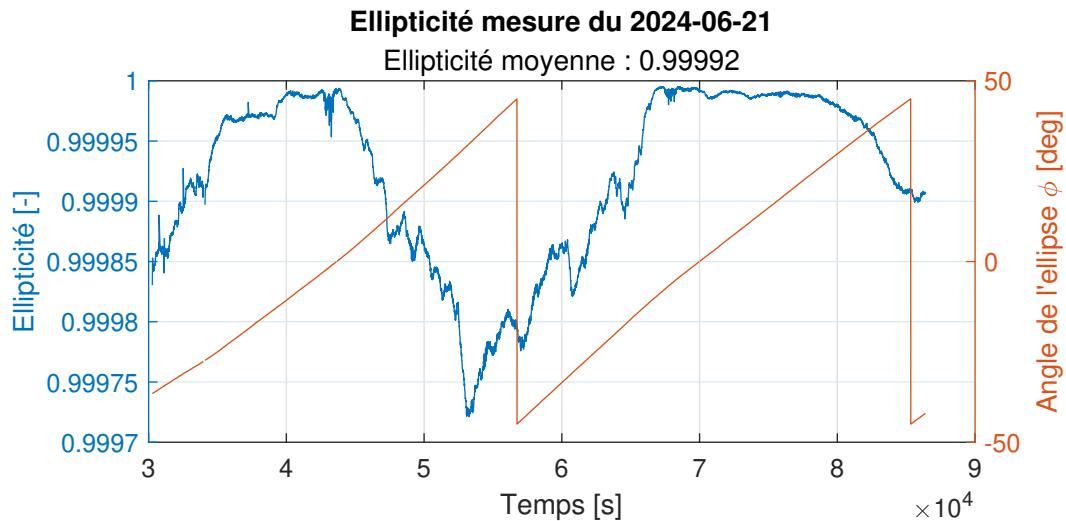


Figure B.69 – Ellipticité (21 juin 2024), ancien système

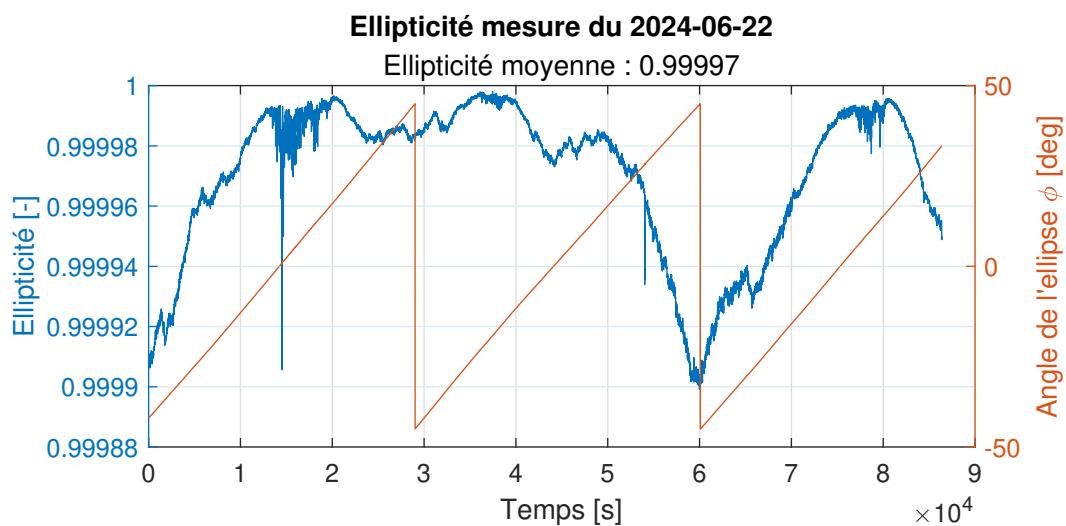


Figure B.70 – Ellipticité (22 juin 2024), ancien système

### B.3. MESURES DU PENDULE DE FOUCAULT

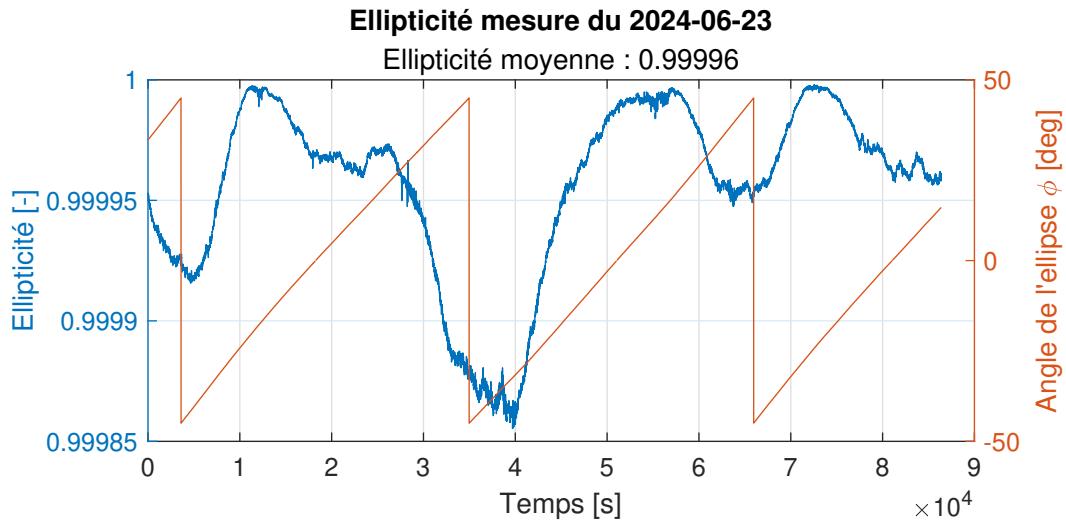


Figure B.71 – Ellipticité (23 juin 2024), ancien système

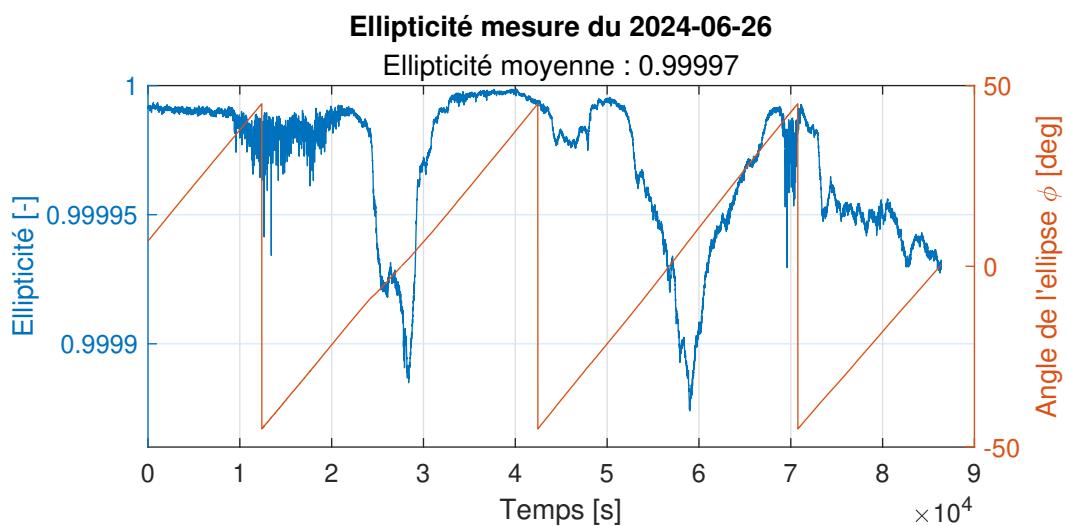
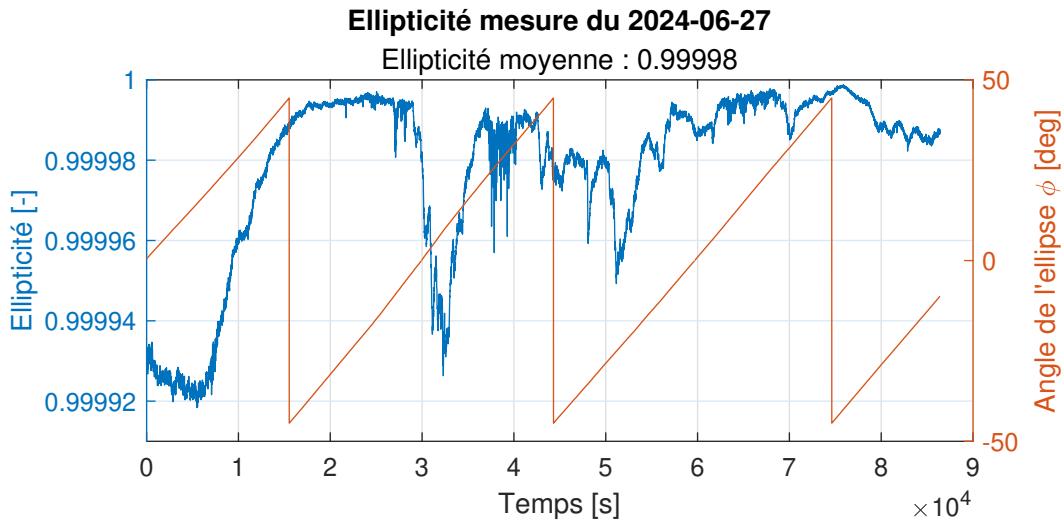
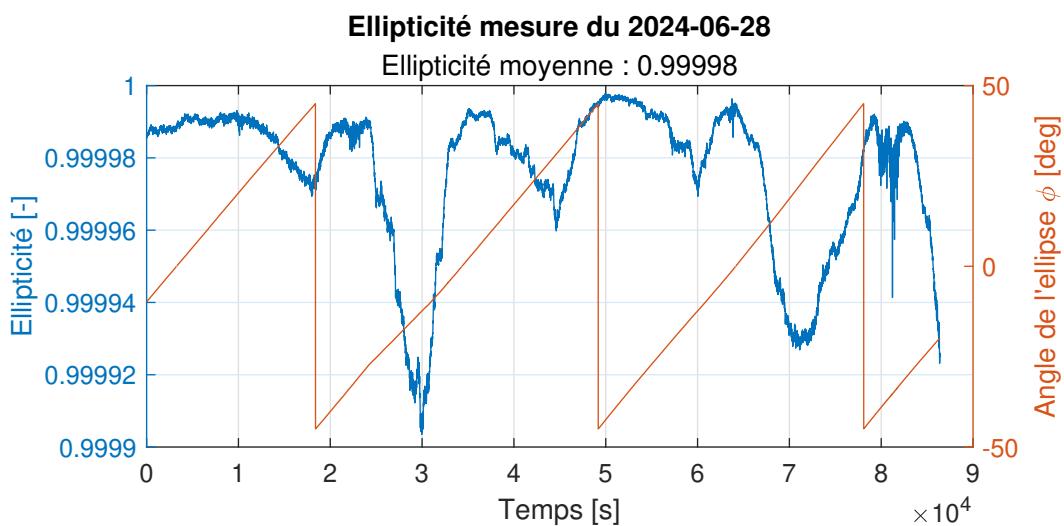


Figure B.72 – Ellipticité (26 juin 2024), nouveau système

## ANNEXE B. MESURES



**Figure B.73 – Ellipticité (27 juin 2024), nouveau système**



**Figure B.74 – Ellipticité (28 juin 2024), nouveau système**

### B.3. MESURES DU PENDULE DE FOUCault

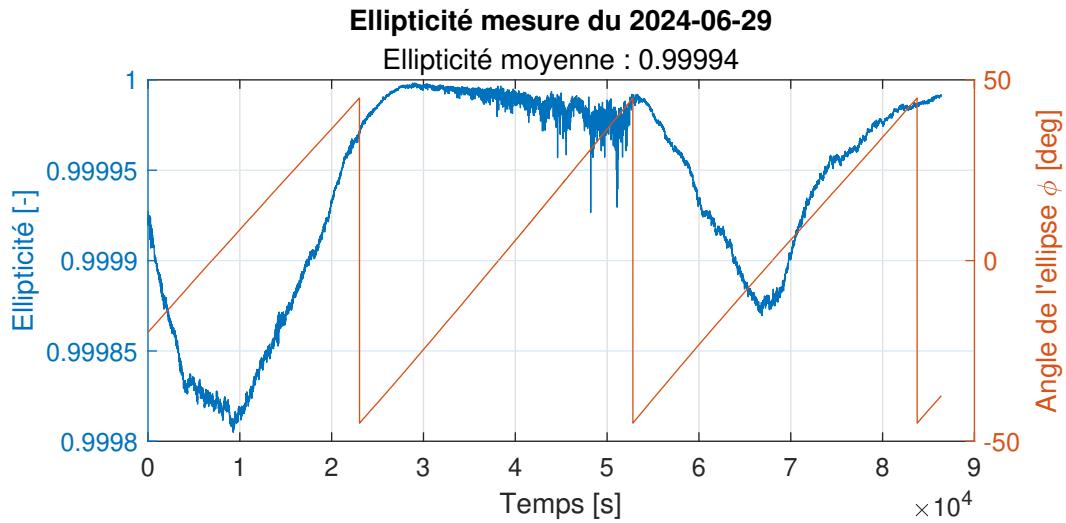


Figure B.75 – Ellipticité (29 juin 2024), nouveau système

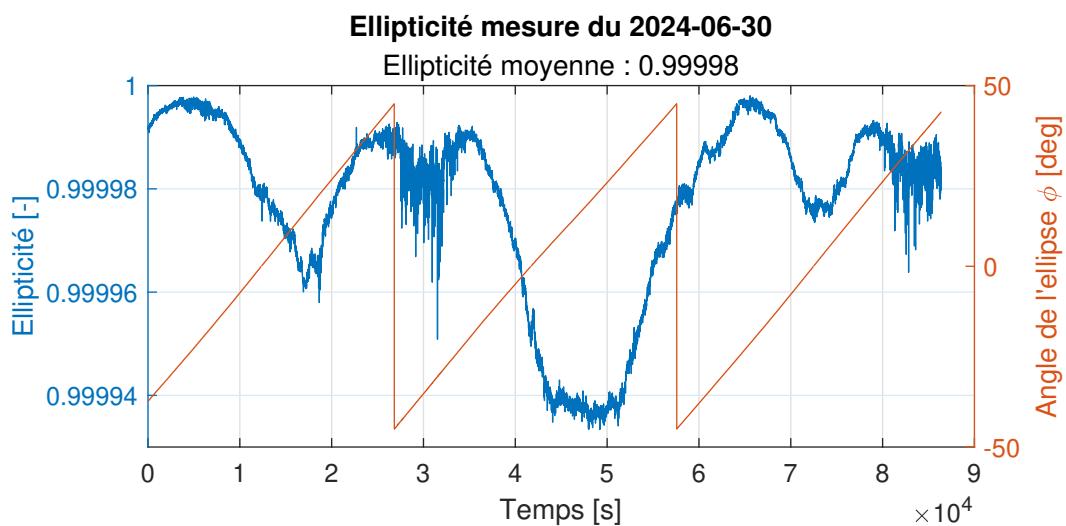
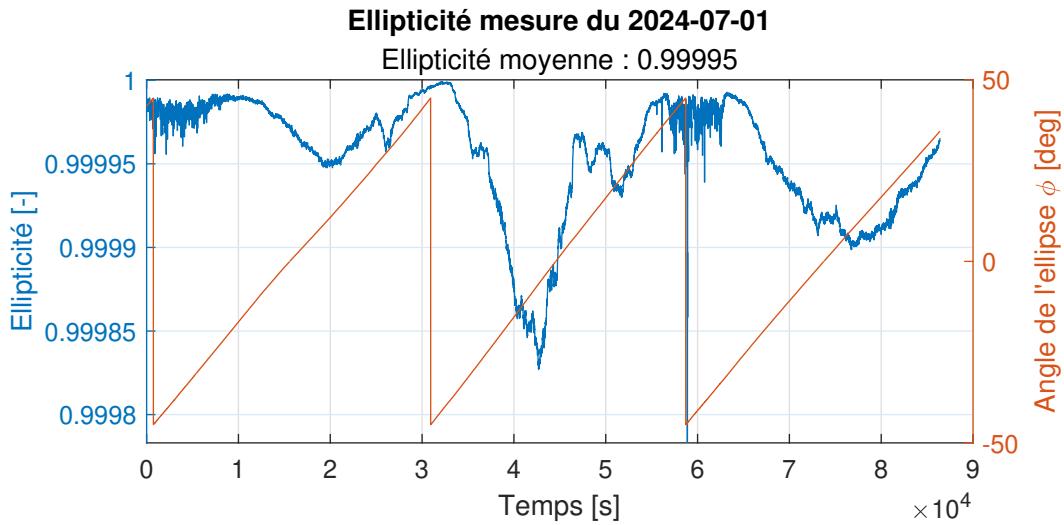
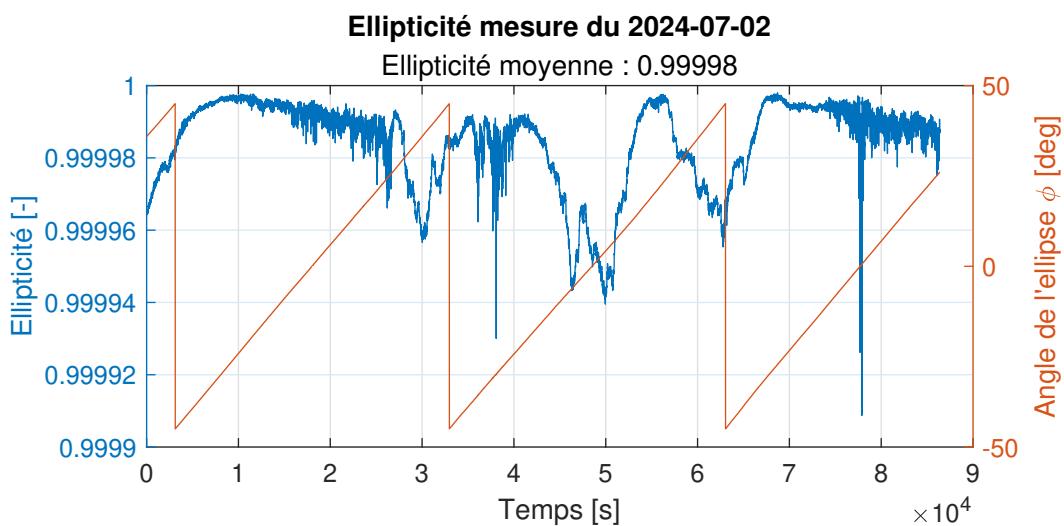


Figure B.76 – Ellipticité (30 juin 2024), nouveau système

*ANNEXE B. MESURES*



**Figure B.77 – Ellipticité (01 juillet 2024), nouveau système**



**Figure B.78 – Ellipticité (02 juillet 2024), nouveau système**

### B.3. MESURES DU PENDULE DE FOUCAULT

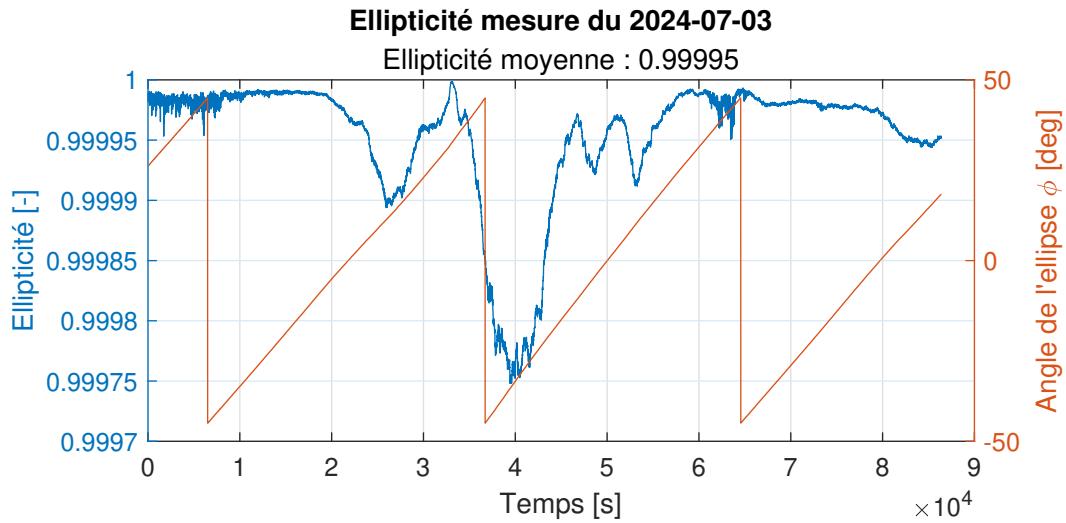


Figure B.79 – Ellipticité (03 juillet 2024), nouveau système

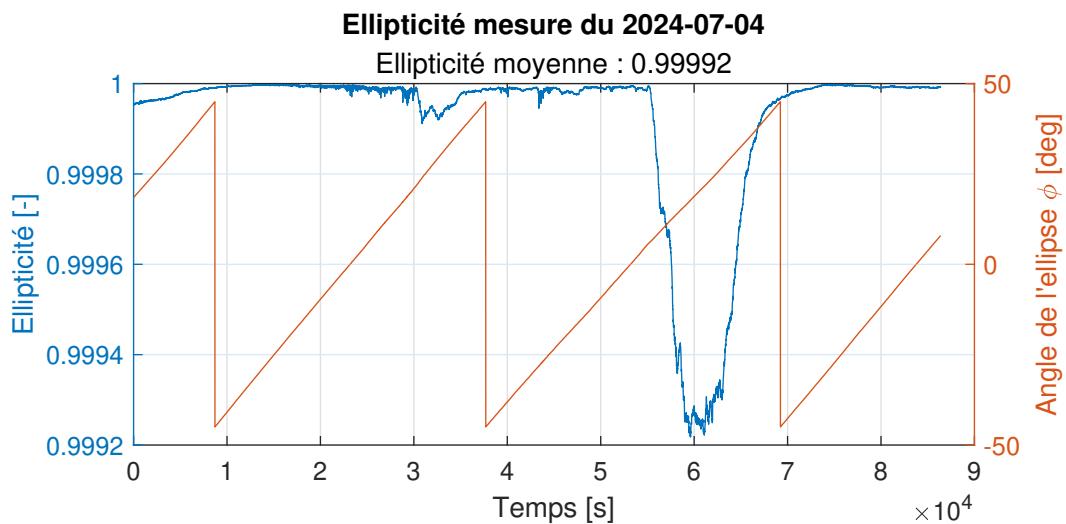
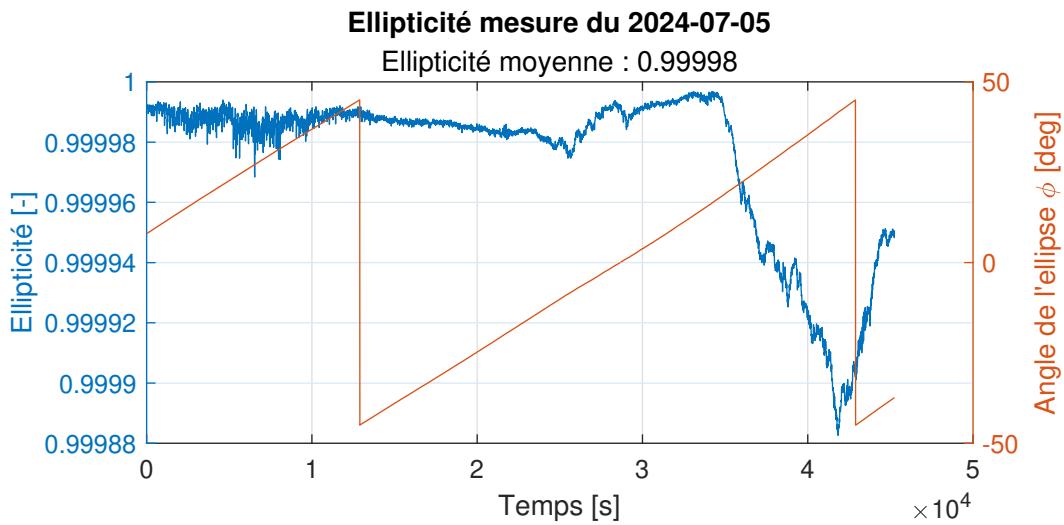
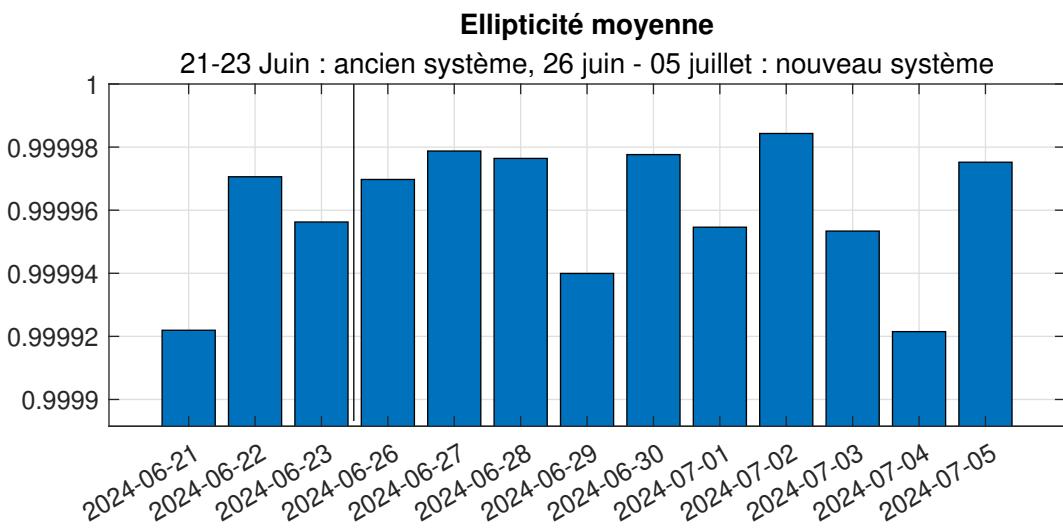


Figure B.80 – Ellipticité (04 juillet 2024), nouveau système

## ANNEXE B. MESURES



**Figure B.81 – Ellipticité (05 juillet 2024), nouveau système**



**Figure B.82 – Ellipticité moyenne**

## **Annexe C**

### **Divers**

#### *C.1 Fiche fournisseur CuBe2*

Désignation	CuBe2	DIN	EN Nr.	UNS (ASTM)	AISI	LMSA
		2.1247	CW101C	C17200	-	<b>A100</b>

## Composition chimique

Cu*	Be	Co + Ni	Co + Ni + Fe	Pb
Reste	1.80 - 2.00	0.20 min.	0.60 max.	0.02 max.

Valeurs (% poids). Dans l'intérêt de l'homogénéité ainsi que de la constance des propriétés du matériau, les tolérances de fabrication sont plus étroites que celles mentionnées ici.

\*Cuivre plus éléments d'addition > 99.5%

## Propriétés technologiques

L'alliage 25 atteint une résistance mécanique et une dureté après durcissement la plus élevée des alliages cuivreux sur le marché et est couramment utilisé. Il présente une excellente aptitude au pliage dans les états "mis en solution": A (TB00), "mis en solution et légèrement écroui":  $\frac{1}{4}$  H (TD01) et  $\frac{1}{2}$  H (TD02). Dans les états durcis après mise en forme, il peut atteindre des résistances mécaniques dépassant 1400N/mm<sup>2</sup>. L'alliage 25 se distingue par sa haute résistance à la fatigue, par son excellente tenue à la relaxation thermique et par une combinaison unique de résistance mécanique et de conductivité.

## Exemples d'utilisation

Contacts ressorts pour la fabrication de connecteurs, lames d'interrupteur, soufflets, membranes, diaphragmes, nombreuses pièces pour l'horlogerie : aiguilles, roues, clinquants, etc.

## Produits usuels

		Épaisseur (mm)	Largeur (mm)	Longueur (mm)
<b>Laminés</b>	Rubans [1]	0.005 - 2.000	1.5 - 200.0	-
	Bandes redressées [1]	0.015 - 1.500	10.0 - 200.0	100 - 3000

[1] Toutes nos possibilités de fabrication ne figurent pas ici, d'autres dimensions sont disponibles sur demande. Certaines combinaisons d'épaisseurs et de largeurs ne sont pas possibles.

## Propriétés mécaniques des bandes

État				Traitement thermique	R <sub>p0.2</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	R <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	A <sub>50mm</sub> (%)	Dureté HV	R/t (90°) T / L [2]
A	TB00	R410	Recuit mou	-	190 - 380	410 - 540	35 - 60	90 - 150	0 / 0
A <sup>[1]</sup>	-	R430	glacé sur mou	-	210 - 380	430 - 560	35 - 60	100 - 150	0 / 0
$\frac{1}{4}$ H	TD01	R510	$\frac{1}{4}$ dur	-	420 - 560	510 - 610	15 - 35	120 - 180	0 / 0
$\frac{1}{2}$ H	TD02	R580	$\frac{1}{2}$ dur	-	530 - 660	580 - 690	8 - 25	180 - 215	0.5 / 1.0
H	TD04	R680	dur	-	650 - 800	680 - 830	2 - 8	215 - 250	1.0 / 2.9
H+	-	R800	Ressort	-	750 min.	800 min.	-	240 min.	-

Après durcissement (chez le client)

AT	TF00	R410	Recuit mou +durci	3h à 315°C	960-1210	1130-1350	3 10	350 - 410	-
$\frac{1}{4}$ HT	TH01	R430	$\frac{1}{4}$ dur + durci	2h à 315°C	1050-1300	1190-1420	3 - 6	360 - 430	-
$\frac{1}{2}$ HT	TH02	R510	$\frac{1}{2}$ dur + durci	2h à 315°C	1100-1350	1270-1490	1 - 5	370 - 440	-
HT	TH04	R580	dur + durci	2h à 315°C	1150-1420	1310-1520	1 - 3	380 - 450	-

[1] L'état glacé sur mou ne figure pas dans la norme EN, il correspond à l'état recuit mou avec une très légère passe de laminage très favorable à la qualité de la surface.

[2] Aptitude minimale au pliage à 90°. R=rayon de courbure, t = épaisseur de la bande, T = "Good way", perpendiculaire à l'axe de laminage, et L = "Bad way", parallèle à l'axe de laminage.

## Propriétés physiques

Module d'élasticité	kN/mm <sup>2</sup>	125, 131 <sup>[1]</sup>
Coefficient de Poisson		0.285
masse volumique (poids spécifique)	g/cm <sup>3</sup>	8.25, 8.36 <sup>[1]</sup>
Point de fusion / intervalle de solidification	°C	875 - 985
Coefficient de dilatation linéaire	10 <sup>-6</sup> / °C	17 de 20 à 200°C
Conductivité thermique 20°C	W/m °K	110
Résistance électrique spécifique	μΩcm	9 - 11, 8 - 6 <sup>[1]</sup>
Conductivité électrique typique	MS/m	9 - 11, 13 - 16 <sup>[1]</sup>
Conductivité électrique typique	% IACS	15 - 19, 22 - 28 <sup>[1]</sup>
Propriété magnétique		Amagnétique (très faiblement paramagnétique)
Perméabilité		μ = 1.0006

[1] Valeurs avant ou après durcissement, respectivement.

## Tolérances dimensionnelles des bandes

Épaisseur	Épaisseur (mm)		Normes EN		Lamineries MATTHEY		
	≥	<	10140 Précision	10258 Précision	LMSA Standard	LMSA Précision	LMSA Extrême
-	0.025	-	-	-	-	-	± 0.001
0.025	0.050	-	-	± 0.003	± 0.002	± 0.002	± 0.0015
0.050	0.065	-	± 0.003	± 0.003	± 0.0025	± 0.0025	± 0.002
0.065	0.100	-	± 0.004	± 0.004	± 0.0035	± 0.0035	± 0.003
0.100	0.125	± 0.005	± 0.006	± 0.005	± 0.004	± 0.004	± 0.003
0.125	0.150	± 0.005	± 0.006	± 0.005	± 0.005	± 0.005	± 0.004
0.150	0.250	± 0.010	± 0.008	± 0.008	± 0.006	± 0.006	± 0.004
0.250	0.300	± 0.010	± 0.009	± 0.009	± 0.007	± 0.007	± 0.005
0.300	0.400	± 0.010	± 0.010	± 0.010	± 0.007	± 0.007	± 0.005
0.400	0.500	± 0.015	± 0.012	± 0.012	± 0.008	± 0.008	± 0.006
0.500	0.600	± 0.015	± 0.014	± 0.014	± 0.010	± 0.010	± 0.007
0.600	0.800	± 0.015	± 0.015	± 0.015	± 0.010	± 0.010	± 0.007
0.800	1.000	± 0.015	± 0.018	± 0.018	± 0.012	± 0.012	± 0.009
1.000	1.200	± 0.020	± 0.020	± 0.020	± 0.015	± 0.015	± 0.012
1.200	1.250	± 0.020	± 0.020	± 0.020	± 0.015	± 0.015	± 0.012
Largeur	Nos tolérances "Standard" sur la largeur des bandes cisaillées est de +0.2, -0.0 (ou ± 0.1 mm sur demande) pour toutes les largeurs < 125 mm et des épaisseurs inférieures à 1.00 mm. D'autres tolérances sont possibles sur demande.						
Lame de sabre	Largeur (mm)		Lame de sabre maximal (mm/m)		LMSA Extrême		
	>	≤	≤ 0.5 mm	> 0.5 mm	≤ 0.5 mm	> 0.5 mm	
Nos tolérances "Standard"	3	6	12	-	6	-	
respectent les exigences de la norme EN	6	10	8	10	4	5	
1654 (longueur de référence 1000mm).	10	20	4	6	2	3	
Nos tolérances "Extrême" sont	20	250	2	3	1	1.5	
disponibles sur demande.							
Surface	Qualité de surface spécifique sur demande						
Planéité	Exigences de planéité spécifiques sur demande						

Les indications dans ce document sont à titre d'information uniquement. Elles ne constituent en aucun cas un engagement contractuel de notre part.

## C.2 Journal de Travail

\*\* Journal de travail TB \*\*

Mécanisme dentretien dun pendule de Foucault par lames flexibles

- 23.02.2024 -
  - o 1ère séance avec YCH : administatif TB + Contexte
  - o recherche bibliographie + anciens TB
- 29.02.2024 -
  - o début élaboration planning
  - o lecture "Conception des guidages flexibles" de Henein Simon -> p.154
- 01.03.2024 -
  - o 2ème séance avec YCH : clause de confidentialité, CdC, analyse fonctionnelle et discution de concepts
  - o début réalisation CdC + analyse fonctionnelle
- 04.03.2024 -
  - o CdC
  - o Recherche informations + données du pendule existant
- 05.03.2024 -
  - o CdC
  - o Matlab : calculs paramètres pendule et paramètre de mouvement excitation
- 07.03.2024 -
  - o lecture papier scientifiques
  - o recherche logiciels calculateur éléments flexibles
- 08.03.2024 -
  - o 3ème séance avec YCH :
    - modifs CdC
    - planning pour le 15.03.2024
    - concevoir en parallèle système à câble à section variable (G.Derron):
      - o voir à l'atelier B53 pour fabrication
      - o à ajouter dans le planning
      - o idéalement pouvoir comparer les mesures entre le système à couteaux et le système à guidages flexibles
  - o Réalisation planning
- 13.03.2024 -
  - o finalisation CdC et planning
  - o recherche concepts pour système câble à section variable (CàSV)
  - o adaptation de la mécanique existante pour système CàSV
- 14.03.2024 -
  - o suite CàSV, recherche pince de serrage

## C.2. JOURNAL DE TRAVAIL

- o concept sarrus fermé
- 21.03.2024 -
  - o prise en main logiciel DAS 2D
- 22.03.2024 -
  - o Séance YCH
- 28.03.2024 -
  - o conception maquette à clinquants
- 02.04.2024 -
  - o Séance Christophe Maendly (CHM)
- 11.04.2024 -
  - o Conception maquette système flexible
- 12.04.2024 -
  - o Séance YCH
  - o Conception maquette système flexible
- 18.04.2024 -
  - o Conception maquette système flexible
- 19.04.2024 -
  - o Séance YCH
  - o Conception maquette système flexible
- 22.04.2024 -
  - o Conception maquette système flexible
- 23.04.2024 -
  - o Conception maquette système flexible
- 24.04.2024 -
  - o Impression 3D maquette système flexible
  - o Recherche Acier ressort (corde à piano) pour CàSV
- 25.04.2024 -
  - o Essais découpes laser maquette système flexible
  - o Recherche Acier ressort (corde à piano) pour CàSV
- 26.04.2024 -
  - o Séance YCH
  - o assemblage maquette
- 02.05.2024 -
  - o Caractérisation de la maquette

*ANNEXE C. DIVERS*

- o analyse mesures
- 03.05.2024 -
  - o Séance YCH
  - o analyse mesures
  - o Documents pour Reymond Clavel
- 07.05.2024 -
  - o Rapport - Etat de l'art
- 08.05.2024 -
  - o Rapport - Etat de l'art
- 13.05.2024 -
  - o Maquette impression 3D : Conception V2
  - o Info CuBe et Pfinodal à l'Atelier méca
- 15.05.2024 -
  - o Impression maquette V2
- 16.05.2024 -
  - o découpe clinquants CuBe
  - o assemblage maquette V2
  - o persage fil ressort par CHM
- 17.05.2024 -
  - o sertissage fils ressort par CHM
- 22.05.2024 -
  - o Fils sertis récupéré
- 23.05.2024 -
  - o Illustrations catalogue de sol.
- 24.05.2024 -
  - o Illustrations catalogue de sol.
- 30.05.2024 -
  - o Simulink Pendule de Foucault (abandonné)
- 31.05.2024 -
  - o Séance YCH
- 05.06.2024 -
  - o Introduction rapport
  - o Offre Robert Laminage:
    - Téléphone avec Amal Kaou Baker, Responsable des ventes
      - o Proposition de donner la matière en échange de citation de la marque da

## C.2. JOURNAL DE TRAVAIL

- o Rm de 1300 MPa uniquement possible avec épaisseur plus fine
- 06.06.2024 -
  - o Introduction rapport
- 07.06.2024 -
  - o Simulation rapport
  - o Séance YCH
  - o Appel Amal de chez Robert Laminage :
    - Forfait de 800ChF
      - pas en stock -> matière doit être fabriquée
- 13.06.2024 -
  - o Séance YCH et F. Cosandier
  - o Rapport
  - o Road map
- 14.06.2024 -
  - o Séance YCH et A. Cardinale
  - o Rapport
- 18.06.2024 -
  - o Rapport
- 19.06.2024 -
  - o Rapport
- 20.06.2024 -
  - o Recherche bras de Sarrus
- 21.06.2024 -
  - o Recherche Table à 8 cols
- 24.06.2024 -
  - o Mesures traction cyclique
  - o Table 8 cols
  - o démontage ancien PdF et montage PdF avec CàSV
- 25.06.2024 -
  - o Mesures traction cyclique
  - o Bras de sarrus
- 26.06.2024 -
  - o Mesures traction cyclique, analyse mesures
  - o Bras de Sarrus
- 27.06.2024 -
  - o Mesures traction cyclique, analyse mesures

- o Bras de Sarrus
- 28.06.2024 -
  - o Mesures traction cyclique, analyse mesures
  - o Bras de Sarrus
- 01.07.2024 -
  - o Recherche idées guidages flexibles
  - o Table à 6 lames "repliée"
- 02.07.2024 -
  - o Table à 6 lames "repliée"
  - o Simulations FEM guidages
- 03.07.2024 -
  - o Simulation FEM guidages
  - o Simulation FEM bistable
  - o Conception Proto CNC bistable
- 04.07.2024 -
  - o Conception Proto CNC bistable
  - o MeP Proto bistable
- 05.07.2024 -
  - o Simulation FEM
  - o Mesures traction cyclique
  - o Analyse mesures Pdf
- 08.07.2024 -
  - o Analyse ellipticité Pdf
  - o Mesures traction cyclique
- 09.07.2024 -
  - o Analyse ellipticité Pdf : ancien = 0.9999496, nouveau = 0.9999631
  - o Mesures traction cyclique
- 10.07.2024 -
  - o Analyse ellipticité Pdf
  - o Mesures traction cyclique
- 11.07.2024 -
  - o Conception intergration finale
- 12.07.2024 -
  - o Conception intergration finale

### C.3 Planning

N° TÂCHE	Total par tâche	Planning hebdomadaire [hr]																Date : 18.06							
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22		
<b>00-00-00 Administratif</b>																									
00-01-01 Saisie du CdC finalisé				X																					
00-01-02 Définition de la grille d'évaluation du TB				X																					
00-01-03 Définition de la forme de la revue de projet				X																					
00-02-00 Validation du descriptif							X																		
00-03-01 Revue de projet (Après ~180h sur le travail)																			X						
00-03-02 Édition du "Descriptif du TB"																			X						
00-03-03 Édition de la "Clause de confidentialité"																			X						
00-03-04 Edition du contrat de confidentialité																			X						
00-03-05 Attribution de la note revue de projet ou rapport intermédiaire																			X						
00-04-01 Téléchargement du rapport du TB																								X	
00-04-02 Importation électronique du rapport et de ses annexes dans Gaps																								X	
00-04-03 Saisie du résumé publiable																								X	
00-04-04 Validation																								X	
00-04-05 Saisie des coordonnées de l'expert dans Gaps, de la date, heure et lieu de la soutenance et envoi du rapport à l'expert																								X	
00-05-00 Validation résumé publiable + Réalisation affiche TB																									
00-06-00 Soutenance du travail de Bachelor, entre																									
<b>01-00-00 Système Câble à section variable (Georges Derron)</b>	96		1	13	15	24			15	4									12	12					
01-01-01 Analyse du système	5		1	4																					
01-01-02 Recherche idées de conception	6			6																					
01-01-03 Calculs	8			3	5																				
01-02-01 Conception	20				10	10																			
01-02-02 Mise en plan	14					14																			
01-03-01 Fabrication	0			A	A																				
01-03-02 Montage	15																								
01-04-01 Mesures	12																								
01-04-02 Analyse des mesures	12																								
01-99-99 Imprévu	4																		4						
<b>02-00-00 Système à guidage flexible</b>	197	3	6	5			4	15	11	12	15	15	10	10	4	24		31	32						
02-01-01 Lecture anciens TB + littérature	14	3	6	5				4	6																
02-01-02 Recherche concepts	10							9		4															
02-01-02 Réalisation de maquette(s) concept (carton, laser, 3D)	13								4																
02-01-03 Choix du concept	4									4															
02-01-04 Calculs	15									3	12														
02-02-01 Modélisation + conception 3D	46																		15	15	10	6			
02-02-02 Mise en plan	32																		4	4	24				
02-03-01 Fabrication	0																								
02-03-02 Montage	39																								
02-99-99 Imprévu	24																								
<b>03-00-00 Logiciel DAS2D/3D</b>	12		1					11																	
03-01-01 Prise en main	11		1					10																	
03-02-01 Choix de la pertinence son utilisation	1							1																	
<b>10-00-00 Rédaction Documents</b>	173	2	4	4															5	5	18	15	27	39	8
10-01-01 Planning	6	2	2	2															4	4	24				
10-02-01 Cahier des Charges fonctionnel	4		2	2																					
10-03-01 Rapport intermédiaire	28																		5	5	18				
10-04-01 Rapport final	115																		15	27	39	8	7	19	
10-99-99 Imprévu	20																								
<b>11-00-00 Autre</b>	21	1	1	1	2	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
11-01-01 Séance suivi TB	20	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
11-02-01 Autre	1							1																	
<b>TOTAL hebdomadaire [hr]</b>		4	9	12	19	16	24	16	16	16	16	12	16	16	16	16	23	40	40	52	40	40	40		

# Glossaire

**anisotropie** "État, qualité d'une substance anisotrope, dont les propriétés varient selon la direction considérée." (source : *Dico en ligne Le Robert*). 1, 5, 48

**BCM** Beam Constraint Model. 23, 24, 25, 54, 58

**CNC** Computer Numerical Control. 11, 29

**CoMUI** Compliant Mechanism User Interface. 23

**EDM** Electrical Discharge Machining. 11

**FDM** Fused Deposition Modelling. 28

**FEM** Finite Element Method. xiii, 23, 32

**HEIG-VD** Haute École d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud. vii, xii, 1, 2, 5, 7, 8, 37

**MDF** Medium Density Fiberboard. 28

**OCF** Opposing Constant Force. xii, 14

**OCT** Opposing Constant Torque. xii, 14

**PLA** Polylactic Acid (Acide polylactique). 28

**précession** "Mouvement de rotation autour d'un axe fixe" (source : *Dico en ligne Le Robert*). 5

**RCC** Remote Center Compliance. 14