POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Développement d'un débobineur asservi sans-fil pour le tressage de composites textiles
Auteur: Author:	Cristian Stefan Talos
Date:	2022
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Talos, C. S. (2022). Développement d'un débobineur asservi sans-fil pour le tressage de composites textiles [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/10227/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/10227/
Directeurs de recherche: Advisors:	Louis Laberge Lebel, & Sofiane Achiche
Programme: Program:	Génie mécanique

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Développement d'un débobineur asservi sans-fil pour le tressage de composites textiles

CRISTIAN STEFAN TALOS
Département de génie mécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie mécanique

Mars 2022

© Cristian Stefan Talos, 2022.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Développement d'un débobineur asservi sans-fil pour le tressage de composites textiles

présenté par **Cristian Stefan TALOS**
en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Luc BARON, président
Louis LABERGE LEBEL, membre et directeur de recherche
Sofiane ACHICHE, membre et codirecteur de recherche
Aurelian VADEAN, membre

DÉDICACE

À Carmen et Sorin,
merci pour votre soutien inconditionnel.

REMERCIEMENTS

Ayant entamé mon baccalauréat en 2015, je n'aurais jamais pensé faire une maitrise. Je suis énormément reconnaissant pour toutes les personnes incroyables que j'ai rencontrées durant mon parcours et qui ont en grande partie façonné l'individu que je suis devenu aujourd'hui. J'ai rencontré des personnes incroyables qui m'ont énormément soutenu durant tout mon parcours.

En premier lieu, je tiens à remercier Louis Laberge-Lebel qui est sans aucun doute l'élément déclencheur de ma décision de poursuivre aux études supérieures. Merci beaucoup de m'avoir accueilli en 2016 dans ton équipe de recherche et de m'avoir fait découvrir l'univers de la recherche. Je n'aurais certainement pas pu grandir autant sans ton intervention avec la bourse d'initiation à la recherche UPIR. Qui aurait cru que 5 ans plus tard cela se transformerait en projet de maitrise ?

J'aimerais remercier Aurelian Vadean ainsi que Sofiane Achiche d'avoir été là pour me guider durant mon baccalauréat lorsque je ne savais pas encore ce que je voulais faire et lorsque je me demandais si le génie était pour moi. Merci pour tous vos précieux conseils.

J'aimerais remercier l'équipe de laboratoire : Yasmine, Nawaf, Pascal, Matthieu, Pablo, Mohammad, Marc, Mehdi, Félix et Christophe. Il m'a fait grand plaisir de travailler avec vous et je vous remercie pour vos conseils au long de mon projet.

J'aimerais remercier Joseph Lacerte, Nathanael Beaudoin-Dion et Mathieu Corbett pour leur implication dans le projet et pour leur assistance technique incroyable. Je suis très content que ce projet nous ait permis de faire connaissance et je vous suis profondément reconnaissant pour tout votre soutien technique.

J'aimerais remercier les membres du Jury, Aurelian Vadean, Louis Laberge-Lebel, Sofiane Achiche et Luc Baron. Merci pour votre temps et pour vos commentaires constructifs.

J'aimerais également remercier toutes les nouvelles amitiés que j'ai eu la chance de forger durant mon parcours et qui ont été là pour m'encourager durant ce périple. Plus particulièrement, j'aimerais remercier Fanny-Aude Boutrouille-Gariépy pour m'avoir soutenu durant ce parcours et d'avoir été à l'écoute lors des moments les plus difficiles.

Je voudrais remercier tous mes amis qui ont pris le temps de relire mes premières versions de mémoire et qui m'ont aidé à apporter une multitude de corrections. Merci Sebastian, David, Nikolaï, Karl, Melissa et Fanny.

Finalement, je tiens à remercier mes parents, Carmen et Sorin, pour leur support lors des montagnes russes d'émotions vécues à la fois par le projet et par la COVID-19. Merci pour votre soutien.

RÉSUMÉ

La manipulation de fibres pour la réalisation de textiles a permis à l'être humain d'évoluer au fil des millénaires. Présentement, les textiles ne servent pas uniquement à la fabrication de vêtements, mais peuvent également servir pour des applications dans le domaine de l'ingénierie, telles que le tressage de matériaux composites. Celui-ci permet d'obtenir, suite à une infusion de résine, des structures composites rigides et légères pour des applications comme dans le domaine de l'aérospatiale.

La fabrication de ces pièces commence sur des machines de tressage. Un type de machine populaire dans l'industrie est de type *maypole*. Des débobineurs se déplacent selon des trajectoires opposées grâce à des engrenages spéciaux *horngears*. Le déplacement des débobineurs créé des tresses avec les fils qui se débobinent. Pour maintenir le fil sous tension lors du tressage, celui-ci passe à travers une série de poulies et de surfaces de frottement. Un mécanisme de relâchement ainsi que des ressorts assurent une force moyenne constante dans le fil. La force de tension dans le fil est un paramètre important pour les procédés de tressage parce qu'elle permet au fil de se conformer à un mandrin (s'il y a lieu) et peut affecter diverses propriétés des tresses. La force est ajustée par un opérateur en remplaçant un ressort dans le débobineur avant le démarrage du procédé de tressage.

La revue de littérature a fait ressortir plusieurs enjeux liés aux procédés de tressage circulaire et 3D, ainsi qu'aux débobineurs traditionnels. Parmi ces enjeux, une des causes principales de l'usure prématurée dans le fil est le frottement. La littérature démontre également que les propriétés mécaniques des pièces obtenues sont liées à la force de tension dans le fil lors du débobinage. Les quatre aspects que ce projet adresse sont l'usure par frottement du fil avec diverses surfaces de contact, l'usure par le mécanisme de relâchement des débobineurs traditionnels, l'ajustement de la force de tension et la variation de la force de tension pendant le tressage.

Le premier objectif de recherche consiste à caractériser deux débobineurs traditionnels pour déterminer la variation de la force dans le fil selon deux matériaux filamentaires (fil de nylon et fibre de verre) et selon diverses vitesses de déroulement. Un banc de tests a été mis au point pour tester et analyser les données. Le premier débobineur étudié (offert par le LabSFCA) pouvait appliquer des forces de tension de 0.25 N à 1.5 N avec un écart-type entre 0.05 N et 0.3 N. Le second débobineur étudié (offert par le Groupe CTT) pouvait réaliser des forces de tension de 0.5 N à 4.5 N avec un écart-type entre 0.06 N et 0.43 N. Les résultats des deux débobineurs sont étroitement dépendants du matériau débobiné ainsi que de la vitesse de débobinage. Les débobineurs mécaniques engendraient des oscillations en dents de scie dans la force de tension.

Le second objectif de recherche consiste à développer un débobineur actif devant offrir des meilleures performances que les débobineurs traditionnels. Ce débobineur utilise un moteur sans brosse (*brushless DC motor – BLDC*) contrôlé par commande vectorielle (*field-oriented control*). Cette manière d'asservissement permet de contrôler le courant dans les trois phases du moteur et, par une relation proportionnelle, contrôler le couple produit par le moteur. Un circuit de contrôle libre-accès (par *ODrive Robotics*) a été adapté pour l'application du débobineur. Ce circuit de contrôle permet un asservissement en couple du moteur. Le débobineur actif possède un système pour mesurer le bras de levier effectif du fil par rapport à l'axe de rotation du moteur et il est ainsi possible de calculer la tension dans le fil. Ce système de mesure constitue l'unique source de frottement dans le nouveau débobineur.

Le prototype est alimenté par une batterie lithium-polymère (Li-Po) et contrôlé par WiFi grâce à un ordinateur de bord Raspberry Pi Zero W. Le protocole de communication MQTT est utilisé par l'opérateur pour envoyer des commandes de contrôle à partir du poste de travail. L'architecture informatique développée permet à l'opérateur d'envoyer des commandes à plusieurs débobineurs simultanément et de lire des informations à partir de chacun des débobineurs. Ce design novateur peut ouvrir des portes dans l'industrie du tressage pour plusieurs raisons. Il est maintenant possible de contrôler en temps réel la force dans le fil, celle-ci est beaucoup plus constante. Il y a donc beaucoup moins d'usure prématurée du fil. Il est également possible d'obtenir des données pour des fins d'analyse et d'optimisation du procédé. En somme, ce concept permet d'avoir un meilleur contrôle des paramètres de tressage, ce qui permet d'obtenir des pièces avec de meilleures propriétés mécaniques.

Le troisième objectif de recherche est de caractériser le nouveau débobineur robotisé. L'écart-type dans la force de tension mesurée se trouve entre 0.06 N et 0.12 N, ce qui représente une réduction jusqu'à quatre fois inférieure à celle des débobineurs mécaniques. L'écart-type dans la force mesurée est invariant selon le type de matériau et selon la vitesse de débobinage, contrairement aux débobineurs traditionnels. Il est possible de varier le couple du débobineur en temps réel pour réaliser des forces de tension entre 0 N et 3.5 N. Le débobineur actif est également capable de rembobiner le fil pour le garder tendu. Le principal défaut de cette solution est la génération de chaleur par le moteur ainsi que la puissance de calcul de l'ordinateur de bord qui limite la vitesse de mesure et de transmission par WiFi des données.

Le débobineur actif ouvre la porte à de nouveaux domaines d'étude et d'optimisations. Chacun des débobineurs est doté de plusieurs systèmes de mesures, alors il est possible d'effectuer l'acquisition de données tout au long du procédé de fabrication. Ainsi, il sera maintenant possible de mettre au point des optimisations sur les paramètres de tressage en se basant sur toutes les données générées durant la fabrication de chacune des pièces. Le débobineur actif permet ainsi au procédé de tressage textile de faire le saut vers l'industrie 4.0, l'industrie des données.

ABSTRACT

The braiding process of textile materials has been around for years and the emergence of the industry 4.0 has finally allowed for new breakthrough in the sector. The braiding of composite materials allows, after consolidation, the manufacturing of structures with interesting mechanical properties such as the making of very light weight and stiff structures in the desired axis. Such parts are used in areas where it is important to reduce as much as possible the weight of the machines, such as the aerospace sector.

The manufacturing of braided parts begins with the braiding machine. One of the most common braiding process is called the "maypole braiding". The braiding carriers move in a predetermined circular sinusoidal path thanks to special gears called "horngears". Half of the carriers move in a clockwise motion and the other half in a counter clockwise motion. Thus, their motion causes the yarns to intertwine and build a braided mesh. The yarn unwinds from the carriers by passing through multiple pulleys and friction-inducing surfaces. A release mechanism combined with springs ensure that the yarn is always under tension. The tensioning force is a key parameter for obtaining the desired mechanical properties (such as the cover ratio of the fiber and the braiding angle). The tensioning force is adjusted by manually replacing one of the springs inside the carrier prior to the braiding manufacturing process.

The literature presented many challenges regarding the maypole braiding, the 3D braiding, and the braiding carriers. The main cause of wear in the yarn during manufacturing has been identified as friction. The literature shows that the mechanical properties of the manufactured parts are tightly related to the tension in the yarn during the unwinding of the carriers. The three aspects that can me addressed in this research project are the wear of the yarns due to friction within the carrier, the adjustment of the tension in the yarn, and the variance of the tension during the braiding.

The first research objective is te characterize two traditional carriers in order to identify the variation of the tension for two materials (nylon wire and glass fiber) at different unwinding speeds. A test bench has been constructed in order to conduct the characterisation tests and to analyze the test data. The first carrier studied (provided by ACFSLab) could apply tensions in the fiber from 0.25 N to 1.5 N with a standard deviation between 0.05 N and 0.3 N. The second carrier studied (provided by CTT Group) could apply tensions in the yarn from 0.5 N to 4.5 N with a standard deviation between 0.06 N and 0.43 N. These values were tightly related to the braiding material and the unwinding speed. Both carriers produced saw-shaped mechanical oscillations in the tension force.

The second research objective is to develop an active carrier that would offer better performances than traditional carriers. This novel carrier uses a brushless DC motor controlled using field-oriented control. This method allows the precise control of the current in each one of the three phases of the motor. An open-sourced control circuit (developed originally by ODrive Robotics) has been adapted for our application. This driver is able to control the torque of the motor by "pushing" more current in the three phases. A measuring system has been implemented in our final solution to measure the effective lever of the yarn with respect to the motor axis. In doing so, it is possible to control the force in the yarn. This measuring system is the only source of friction in our novel carrier.

The novel active carrier uses a Li-Po battery and is controlled by WiFi thanks to an on-board computer Raspberry Pi Zero W. The communication protocol MQTT is used by the operator to send commands from

its working station. The infrastructure of the developed control program allows the operator to control multiple carriers simultaneously and to receive data from each one of them. This novel design allows new manufacturing processes in the braiding industry for multiple reasons. It is now possible to control the tensioning force in the yarn in real-time, the force being extremely constant during the unwinding, thus reducing the premature wear of the yarn. It is also possible to get data and build a database for analysis and optimisation of the manufacturing process. Overall, this novel carrier allows for a better control of the braiding parameters, which in turn result in parts with better mechanical properties. The main objectives of the project are the characterisation of the traditional carriers, the design of the novel active carrier and the characterisation of the novel carrier.

The third research objective is to characterize the novel active carrier with the same parameters as the traditional carriers. The standard deviation in the tensioning force varies between 0.06 N and 0.12 N, which is a reduction of up to four times lower compared to the traditional carriers. The standard deviation is not influenced by the fiber material nor by the unwinding speed, unlike the traditional carriers. The active carrier is able to change it's torque in real time and thus exert a tension in the yarns between 0 N and 3.5 N. The active carrier is also capable of rewinding the yarn to maintain it under tension. The main issue of this novel design is the heat generated by the motor after long periods of time and the lower-than-expected computation power of the on-board computer.

The novel carrier opens the door for a new research fields. Each carrier can save data throughout the manufacturing process and this data can be used to optimize parameters and to detect imperfections in the parts. It will now be possible to use all this data to optimize the manufacturing process to obtain parts with better desired mechanical properties. The novel carrier allows the braiding process to make the jump to the industry 4.0, the industry of data.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE . . . iii

REMERCIEMENTS . . . iv

RÉSUMÉ . . . v

ABSTRACT . . . vii

TABLE DES MATIÈRES . . . ix

LISTE DES TABLEAUX . . . xi

LISTE DES FIGURES . . . xii

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS . . . xiv

LISTE DES ANNEXES . . . xv

CHAPITRE 1 INTRODUCTION . . . 1
- 1.1 Objectifs de recherche . . . 1

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE . . . 2
- 2.1 Procédés de tressage de composites . . . 2
- 2.2 Paramètres de tressage et propriétés mécaniques . . . 6
- 2.3 Dégradation du fil . . . 8
- 2.4 Systèmes de tension . . . 8
- 2.5 Synthèse de la problématique . . . 10

CHAPITRE 3 CARACTÉRISATION DES DÉBOBINEURS MÉCANIQUES . . . 12
- 3.1 Description des débobineurs mécaniques . . . 12
- 3.2 Banc de tests pour la caractérisation des débobineurs classiques . . . 16
  - 3.2.1 Étalonnage du capteur de force et du rayon effectif du fil . . . 21
- 3.3 Méthodologie d'acquisition et paramètres de tests . . . 22
- 3.4 Résultats de caractérisation des débobineurs mécaniques . . . 24
  - 3.4.1 Visualisation des résultats . . . 27
  - 3.4.2 Test avec chargement oscillatoire . . . 30
- 3.5 Analyse des résultats . . . 33
  - 3.5.1 Résultats des statistiques de caractérisation . . . 33
  - 3.5.2 Influence des divers paramètres lors du débobinage . . . 37
- 3.6 Conclusions sur la caractérisation des débobineurs mécaniques . . . 37

CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT DU DÉBOBINEUR ACTIF . . . 38
- 4.1 Méthodologie de conception adaptée . . . 38

4.2 Identification des besoins du client . . . 38
4.2.1 Collecte d'informations du client . . . 38
4.2.2 Interprétation des commentaires du client . . . 39
4.2.3 Organisation hiérarchisée des besoins du client et attribution d'une importance relative 39
4.2.4 Attribution d'une importance relative des besoins . . . 40
4.3 Spécifications techniques du produit . . . 40
4.3.1 Identification de métriques . . . 40
4.3.2 Étude des produits compétiteurs . . . 41
4.3.3 Requis techniques du débobineur actif . . . 44
4.3.4 Validation des besoins du client par le requis techniques . . . 48
4.4 Génération de concepts . . . 49
4.4.1 Décomposition du produit en sous-systèmes . . . 49
4.5 Sélection du concept final . . . 50
4.5.1 Élimination des concepts des sous-systèmes . . . 51
4.5.2 Recherche sur les solutions techniques . . . 51
4.6 Présentation du concept final . . . 52
4.6.1 Vue d'ensemble du concept final . . . 52
4.6.2 Vue détaillée des sous-systèmes . . . 55
4.7 Revue du concept final . . . 59
4.8 Conclusions sur le développement d'un débobineur actif . . . 61

CHAPITRE 5 CARACTÉRISATION DU DÉBOBINEUR ACTIF . . . 62
5.1 Méthodologie d'acquisition pour la caractérisation du débobineur actif . . . 62
5.1.1 Paramètres de test . . . 62
5.1.2 Modifications du banc de tests . . . 63
5.2 Résultats du débobineur actif . . . 63
5.2.1 Test avec chargement oscillatoire . . . 65
5.3 Analyse des résultats . . . 68
5.4 Comparaison des performances des débobineurs . . . 70
5.4.1 Conclusions sur les performances du débobineur actif . . . 70
5.4.2 Conclusions sur les requis techniques du débobineur actif . . . 71
5.4.3 Points à améliorer dans le comportement du débobineur actif . . . 71
5.5 Conclusions sur la caractérisation du débobineur actif . . . 72

CHAPITRE 6 CONCLUSION . . . 73
6.1 Limitations du projet de recherche . . . 74
6.2 Travaux futurs . . . 75

RÉFÉRENCES . . . 76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Attributs des ressorts étudiés 16
Tableau 3.2 Tableau récapitulatif des paramètres des tests de caractérisation 24
Tableau 4.1 Hiérarchisation des besoins du client 40
Tableau 4.2 Liste de métriques pour le débobineur actif 41
Tableau 4.3 Comparaison des métriques pour les débobineurs mécaniques 43
Tableau 4.4 Fonctions principales 46
Tableau 4.5 Fonctions complémentaires 46
Tableau 4.6 Contraintes de conception 48
Tableau 4.7 Hiérarchisation des besoins du client 49
Tableau 4.8 Validations des fonctions du concept final 60
Tableau 5.1 Tableau sommaire des paramètres de test 63
Tableau 5.2 Tableau sommaire des paramètres de test 70

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Machine de tressage circulaire du LabSFCA 3
Figure 2.2 Schéma fonctionnel du tressage circulaire sur un mandrin (tiré de [1], droits obtenus) ... 3
Figure 2.3 Machine de tressage 3TEX avec 576 débobineurs (tiré de [2], droits obtenus) 4
Figure 2.4 Fonctionnement d'un débobineur mécanique (tiré de [1], droits obtenus pour les images) 5
Figure 2.5 Débobineur pour tressage 3D mis au point par Legersdorf *et al.* (tiré de [3], droits obtenus) 6
Figure 2.6 Paramètres et composantes des tresses 7
Figure 2.7 Concept de tension *dancer arm* utilisé pour le débobinage de rouleaux et de fils (tiré de [4], licence CC BY 4.0) 9
Figure 2.8 Concept d'estimation de tension et de détection d'anomalies durant le débobinage (tiré de [5], licence CC BY 3.0) 10
Figure 3.1 Composantes principales du db.SFCA (gauche) et du db.CTT (droite) 12
Figure 3.2 Schéma illustrant le mécanisme interne d'un débobineur mécanique avec toutes les composantes numérotées. En rouge sont les composantes qui sont différentes entre le db.SFCA et le db.CTT. 13
Figure 3.3 Fonctionnement du mécanisme de relâchement des débobineurs actifs. Position du bras de levier de tension du fil : bas (a, d), milieu (b, e) et haut (c, f). 15
Figure 3.4 Schéma du banc de tests ainsi que des composantes principales. 17
Figure 3.5 Diagrammes fonctionnels du capteur de force dans le fil 18
Figure 3.6 Variation du rayon effectif lors du rembobinage du fil par le moteur BLDC du banc de tests 19
Figure 3.7 Ordinateur Raspberry Pi 4 [6] utilisé pour contrôler le banc de tests 20
Figure 3.8 Aperçu de l'interface graphique pour la réalisation des tests de caractérisation 21
Figure 3.9 Évolution de la force dans la phase transitoire (a, b, c) et dans la phase périodique (d, e) avec le changement du bras de levier du db.CTT, et mesure de la force (f) lors du test 25
Figure 3.10 Évolution de la force dans la phase transitoire (a, b, c) et dans la phase périodique (d, e) avec le changement du bras de levier du db.SFCA, et mesure de la force (f) lors du test 26
Figure 3.11 Tests avec ressort SFCA-39 à 100.0 mm/s, db.SFCA avec fil de nylon. Évolution de la force avec filtre médian (a), distribution des mesures brutes et filtrées (b), analyse spectrale sur les données filtrées entre 5 et 15 secondes (c). 28
Figure 3.12 Tests avec ressort CTT-425 à 25.0 mm/s, db.CTT avec fibre de verre. Évolution de la force avec filtre médian (a), distribution des mesures brutes et filtrées (b), analyse spectrale sur les données filtrées entre 5 et 15 secondes (c). 29
Figure 3.13 Tests avec ressort SFCA-7 à 250.0 mm/s, db.SFCA avec fibre de verre. Évolution de la force avec filtre médian (a), distribution des mesures brutes et filtrées (b), analyse spectrale sur les données filtrées entre 5 et 15 secondes (c). 30
Figure 3.14 Tous les ressorts du db.SFCA avec fil de nylon, un échantillon par consigne face à un chargement oscillatoire lent. Longueur de fil débobiné (a) et variation dans la tension du fil pendant le débobinage (b). 31

Figure 3.15 Tous les ressorts du db.SFCA avec fil de nylon, un échantillon par consigne face à un chargement oscillatoire rapide. Longueur de fil débobiné (a) et variation dans la tension du fil pendant le débobinage (b). 32
Figure 3.16 Tous les ressorts du db.SFCA avec fil de nylon, un échantillon par consigne face à un chargement oscillatoire stationnaire. Longueur de fil débobiné (a) et variation dans la tension du fil pendant le débobinage (b). 32
Figure 3.17 Sommaire de la moyenne avec écart-type des tests de caractérisation 34
Figure 3.18 Sommaire de l'évolution de l'écart-type des tests de caractérisation 35
Figure 3.19 Sommaire de l'écart entre la force minimale et maximale des tests de caractérisation . 36
Figure 4.1 Aperçu des composants principaux et de l'allure générale du débobineur actif 54
Figure 4.2 Schéma des systèmes principaux du débobineur actif 55
Figure 5.1 Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, tous les échantillons pour un débobinage à 50mm/s. Évolution de la force avec filtre médian (a), distribution des mesures brutes et filtrées (b), analyse spectrale sur les données filtrées entre 5 et 15 secondes (c). 64
Figure 5.2 Toutes les consignes du db.ACT avec fibre de verre, tous les échantillons pour un débobinage à 250mm/s. Évolution de la force avec filtre médian (a), distribution des mesures brutes et filtrées (b), analyse spectrale sur les données filtrées entre 5 et 15 secondes (c). 65
Figure 5.3 Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, un échantillon par consigne face à un chargement oscillatoire lent. Longueur de fil débobiné (a) et variation dans la tension du fil pendant le débobinage (b). 66
Figure 5.4 Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, un échantillon par consigne face à un chargement oscillatoire rapide. Longueur de fil débobiné (a) et variation dans la tension du fil pendant le débobinage (b). 67
Figure 5.5 Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, un échantillon par consigne face à un chargement oscillatoire stationnaire. Longueur de fil débobiné (a) et variation dans la tension du fil pendant le débobinage (b). 67
Figure 5.6 Sommaire de la moyenne et écart-type des tests de caractérisation du db.ACT 68
Figure 5.7 Sommaire de l'évolution de l'écart-type des tests de caractérisation du débobineur actif 69
Figure 5.8 Sommaire de l'écart entre la force minimale et maximale des tests de caractérisation du débobineur actif 69

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BLDC	Moteur sans brosse (*Brushless DC Motor*)
BMS	Système de gestion de la batterie (*Battery Management System*)
CAN	Convertisseur analogique-numérique
CNA	Convertisseur numérique-analogique
db.SFCA	Débobineur fourni par le LabSFCA
db.CTT	Débobineur fourni par le Groupe CTT
GUI	Interface utilisteur graphique (*Graphical User Interface*)
I2C	*Inter-Integrated Circuit*
IMU	Unité de mesure de l'inertie (*Intertial Measurement Unit*)
IoT	Internet des objets (*Internet of Things*)
LabSFCA	Laboratoire de Structure et Fabrication de Composites Avancés
Li-po	Batterie lithium-polymère
MQTT	*MQ Telemetry Transport*
PLA	Acide Polylactique
RAM	Mémoire active (*Random-Access Memory*)
RPi	Raspberry Pi - micro-ordinateur Linux 32bits
SoC	*System on a Chip*
SPI	*Serial Peripheral Interface*
SSH	*Secure Shell*

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Communication SPI 79

Annexe B Ressorts Herzog 81

Annexe C Équation approximative du parcours d'un débobineur 82

Annexe D Méthodologie d'acquisition 84

Annexe E Résultats de caractérisation des débobineurs traditionnels 86

Annexe F Analyse des résultats des débobineurs mécaniques 111

Annexe G Identification des besoins du client 115

Annexe H Identification de solutions techniques pour chaque sous-système 117

Annexe I Classement des solutions techniques 125

Annexe J Spécifications du BDDrive V2 129

Annexe K Interface de contrôle des débobineurs actifs 132

Annexe L Coûts de fabrication 133

Annexe M Résultats de caractérisation du débobineur actif 134

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les procédés textiles sont couramment utilisés pour tisser des fibres de renfort pour des applications composites. Dans le tressage 2D, plusieurs débobineurs se déplacent selon un parcours prédéfini de manière à s'entrecroiser pour réaliser une tresse. Il s'agit de dispositifs mécaniques sur lesquels se retrouvent des bobines de fils pour le tressage. Le fil passe à travers une multitude de poulies (ou surfaces de frottement) pour ensuite se rediriger vers le point de tressage. La force de tension dans le fil est ajustée par un ressort et un mécanisme de relâchement qui peut générer des variations de tension importantes. Le frottement du fil avec les diverses surfaces ainsi que ces variations peuvent causer une dégradation prématurée des fils. Lorsque le mécanisme est activé, la bobine peut effectuer une courte rotation pour libérer du fil. La force de tension n'est pas constante et le mécanisme de relâchement engendre une énergie d'impact dans le fil qui peut briser les filaments les plus faibles. Pour changer la tension dans le fil, il faut qu'un opérateur remplace les ressorts de chacun des débobineurs avant de démarrer un tressage. Il est donc impossible de varier la tension en temps réel ou d'effectuer un tressage en continu avec différents ressorts.

Un procédé plus moderne de fabrication par textile est le *tressage 3D*. Le principe de cette méthode de fabrication est que l'on peut déplacer chacun des débobineurs individuellement de manière à contrôler avec exactitude la position des fils dans la pièce finale. Avec ce procédé, il est possible de créer par exemple des pièces tressées ayant une forme finale en L ou en I. On peut ainsi fabriquer des "poutres" en textile. Étant donné qu'il est possible de contrôler le déplacement de chacun des débobineurs individuellement, il se peut que certains débobineurs aient à parcourir de longues distances pour arriver à leur position finale. Durant ce déplacement, la distance entre le débobineur et le point de tressage diminue. Cela signifie qu'il y aura un excédent de fil dans la machine. Cet excédent doit être rattrapé par le débobineur pour que le fil soit toujours tendu. Toutefois, les débobineurs mécaniques ne peuvent rattraper qu'une petite longueur de fil (de l'ordre de grandeur du 10 cm), et la force de tension diminue durant ce rattrapage. La variation de la tension dans le fil influence les propriétés mécaniques de la pièce finale, alors le mécanisme de relâchement n'est pas adéquat pour le tressage 3D.

1.1 Objectifs de recherche

Ce projet de recherche consiste à mettre au point un débobineur motorisé avec des performances et fonctionnalités supérieures aux débobineurs traditionnels qui sont présentement utilisés dans le LabSFCA et par le Groupe CTT. Ce mémoire possède trois objectifs de recherche. Le premier consiste à caractériser le comportement de deux débobineurs traditionnels. Un banc de tests a été mis au point pour obtenir des données et plusieurs paramètres de tests sont étudiés. Les résultats de tests sont ensuite analysés pour conclure sur les performances des débobineurs traditionnels. Le second objectif de recherche consiste à développer un débobineur motorisé. Une méthodologie de conception adaptée est employée pour établir les requis techniques du débobineur, et une solution finale est prototypée. Le troisième objectif de recherche est de comparer les performances du débobineur motorisé avec celles des débobineurs mécaniques. Cette comparaison permet de valider les requis techniques et de conclure sur les performances du débobineur motorisé.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue de littérature sur le procédé de tressage textile, les relations entre les paramètres de tressage et les propriétés mécaniques, l'usure de fibres et divers systèmes de tension des fils composites. Par la suite, une synthèse de la problématique des débobineurs mécaniques sera effectuée. Pour des fins de clarté, les termes anglais de certains propos seront ajoutés entre parenthèses pour des objets non usuels en français.

2.1 Procédés de tressage de composites

Le tressage circulaire consiste à déplacer des débobineurs mécaniques selon une trajectoire prédéfinie par la géométrie de la machine. Les débobineurs effectuent un parcours d'allure sinusoïdale, avec la moitié qui se déplace dans le sens horaire de la table de tressage, et l'autre moitié qui dans le sens antihoraire. En effectuant leur parcours sinusoïdal, ils entremêlent la fibre et effectuent une tresse qui est tirée par un mécanisme de traction [3, 7]. Le *Laboratoire de Structures de Fibres et de Composites Avancés* (LabSFCA) soutient la réalisation de ce projet et la Figure 2.1 montre une machine de tressage circulaire utilisée au laboratoire. On y voit les composantes principales : le mécanisme de traction (*pull-up*) de la tresse, les débobineurs mécaniques qui déroulent le fil, le point de tressage qui converge les fils pour former une tresse, la plaque de guidage des débobineurs (*track plate*) ainsi que la trajectoire que les débobineurs. Les parcours des débobineurs sont illustrés par les flèches de couleur.

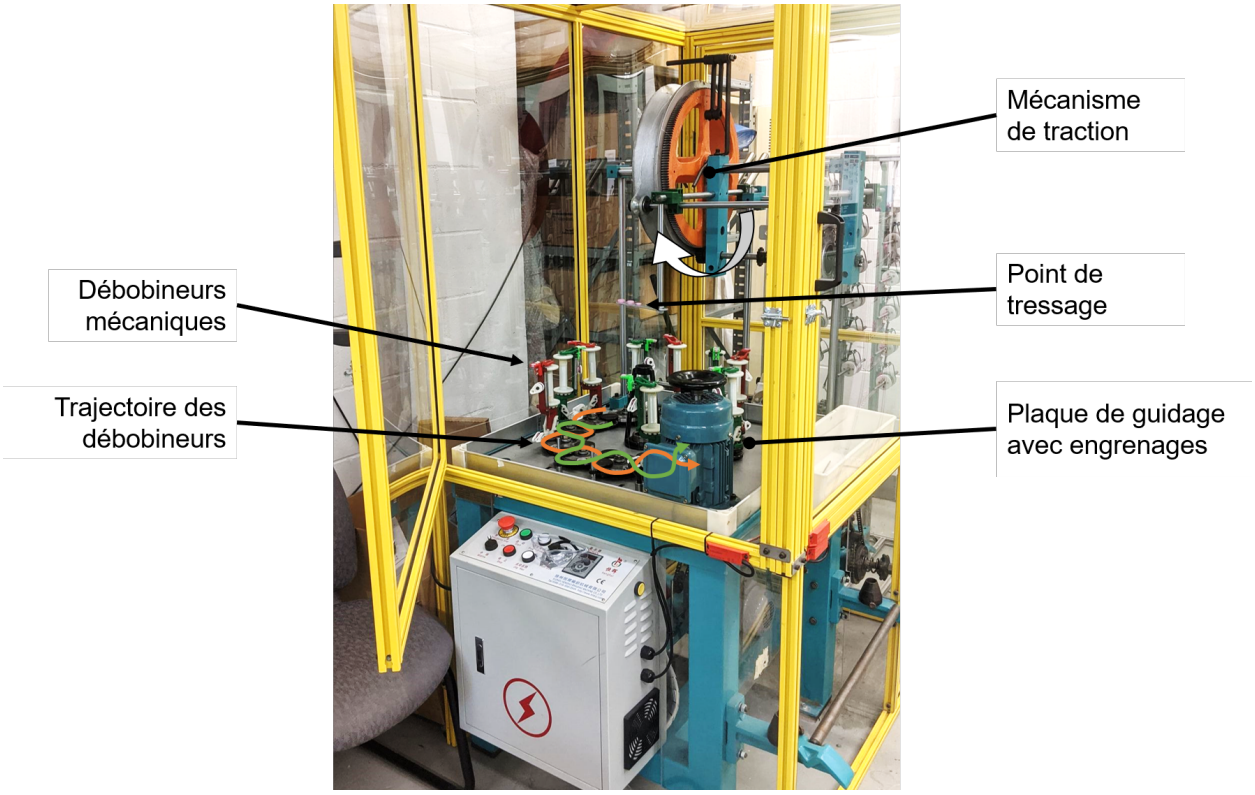


Figure 2.1. Machine de tressage circulaire du LabSFCA

La Figure 2.2 démontre le fonctionnement du tressage circulaire sur un mandrin. On peut voir l'arrangement des *horngears* qui servent à guider les débobineurs et on peut voir un mandrin ayant une géométrie quelconque au milieu de la machine. Les débobineurs réalisent un tressage sur la surface du mandrin, alors les fibres épousent la forme de ce dernier.

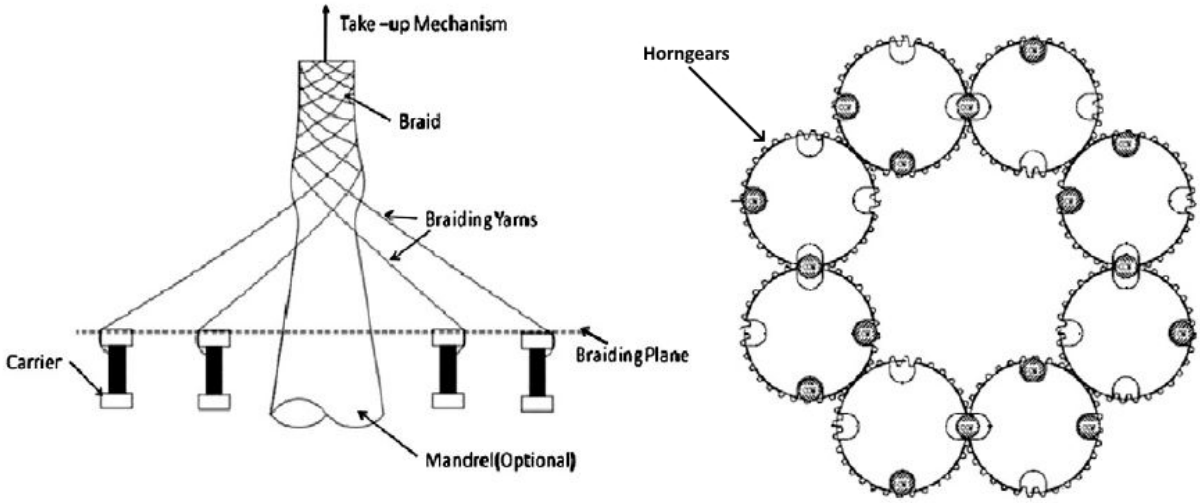


Figure 2.2. Schéma fonctionnel du tressage circulaire sur un mandrin (tiré de [1], droits obtenus)

Le tressage 3D consiste à déplacer des débobineurs mécaniques tel que les fils peuvent réaliser un tressage multicouche et ainsi produire des pièces ayant des formes non cylindriques [2,8,9]. Il est possible de contrôler avec exactitude l'arrangement des différents fils qui composent la tresse et ainsi de réaliser des géométries complexes (telles que des tresses carrées, en forme de L, à géométrie variable, etc.). La Figure 2.3 montre une machine de tressage 3D (modèle 3TEX) avec 576 débobineurs munis de fil de verre (a) et munis de fil de carbone (b). Il est possible de constater la taille de la machine ainsi que le chaos apparent engendré par les fils issus des 576 débobineurs et qui sont attachés au point de tressage. Ces machines sont généralement de grande taille pour permettre aux débobineurs d'avoir plus de marge de manœuvre dans leur déplacement [10].

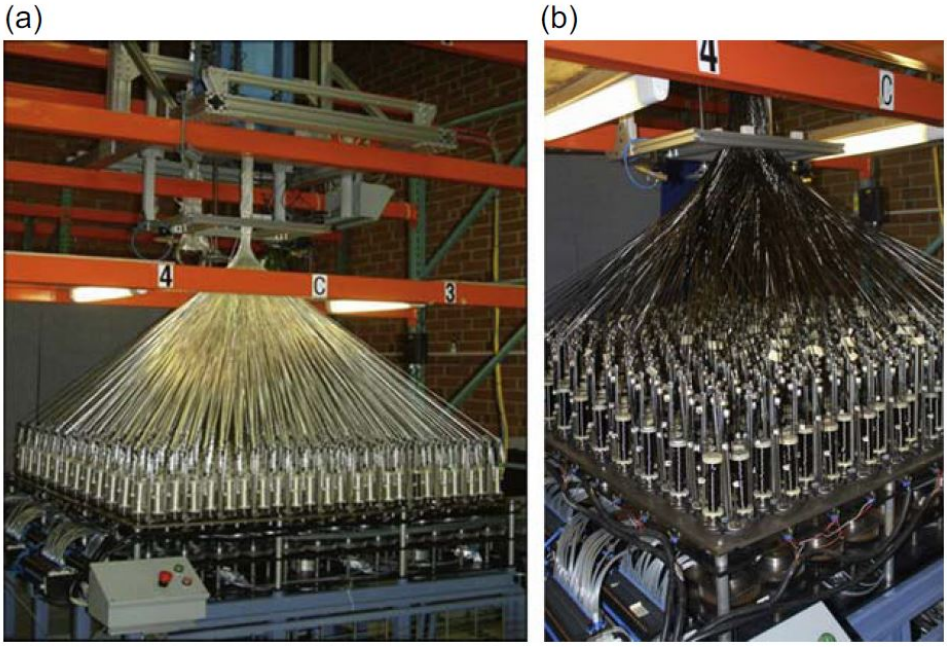
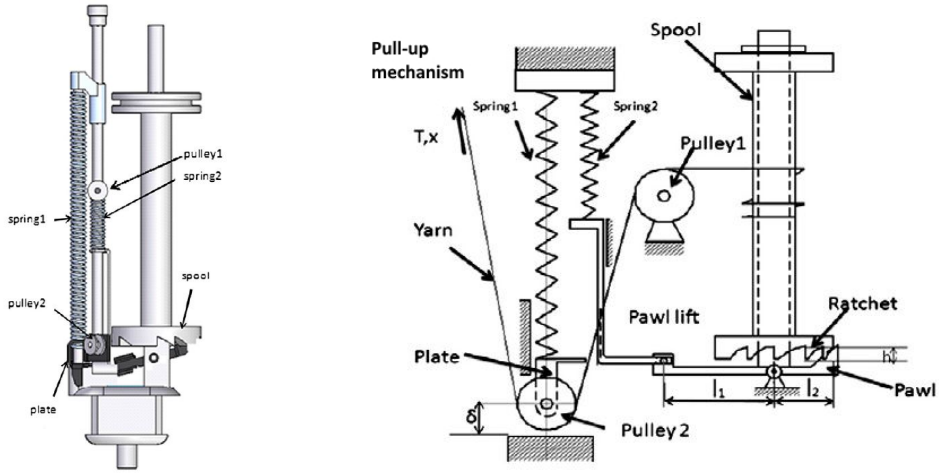


Figure 2.3. Machine de tressage 3TEX avec 576 débobineurs (tiré de [2], droits obtenus)

Le rôle principal des débobineurs est de dérouler le fil tout en le maintenant tendu durant le tressage. Il est possible d'ajuster la force de tension moyenne dans le fil en utilisant différents ressorts. La Figure 2.4 présente le fonctionnement général d'un débobineur mécanique. Il est possible d'apercevoir plusieurs ressorts, poulies ainsi qu'un mécanisme de relâchement qui est composé d'un rochet et d'un cliquet. La rotation de la bobine de fil (*spool*) est bloquée par le rochet (*ratchet*) qui est attaché à la poulie 2. Lorsque le fil est tiré par le mécanisme de traction de la machine de tressage, la poulie 2 comprime le ressort 2 en se déplaçant vers le haut. Cela engendre un pivot du rochet vers le bas. Lorsque suffisamment de fil est tiré, le rochet libère la bobine. Ainsi, plus de fil est débobiné. Le ressort 2 pousse la poulie 2 vers le bas ce qui engendre un pivot du rochet qui engendre un arrêt de la rotation de la bobine. Il n'est pas possible de contrôler la force de tension dans le fil en temps réel parce qu'il faut remplacer le ressort principal dans chacun des débobineurs. De plus, le déplacement vertical de la poulie 2 est limité, de l'ordre de grandeur du centimètre, ce qui constitue une limite pour la longueur maximale de fil qui peut être repris par le débobineur. Lors du tressage 3D, les débobineurs peuvent être soumis à de grands déplacements dans la machine et la variation dans la longueur du fil engendrée par ce déplacement doit pouvoir être rattrapée. Afin de réaliser un tressage 3D sur une machine ayant une taille approximative de 2 mètres par 2 mètres, Lengersdorf *et al.* ont développé un débobineur

mécanique capable de rembobiner une plus grande longueur de fil que les débobineurs traditionnels [3]. La Figure 2.5 montre le schéma de fonctionnement du débobineur mis au point par Legersdorf *et al.*. Il possède un deuxième degré de liberté : le débobineur peut pivoter sur lui-même en plus de posséder un bras de levier qui récupère le fil. Ce degré de liberté supplémentaire est denommé *yarn storage* sur la figure. Sur l'image de gauche, il est possible d'apercevoir du fil qui est bobiné sur le rouleau blanc. Ce dernier est monté sur un *spring assembly* qui permet au rouleau blanc de tourner pour embobiner du fil. Ceci indique que les machines de tressage 3D apportent un enjeu supplémentaire concernant le rembobinage des fils pour les maintenir tendus.



(a) Composantes d'un débobineur mécanique

(b) Éléments dynamiques du débobineur mécanique

Figure 2.4. Fonctionnement d'un débobineur mécanique (tiré de [1], droits obtenus pour les images)

Il est possible de modéliser mathématiquement la dynamique des débobineurs mécaniques et il existe plusieurs géométries de débobineurs. Par exemple, Zhang *et al.* ont tenté de mettre au point un débobineur de manière à réduire les variations de la force de tension dans le fil [11]. Leur modèle mathématique démontre que le débobineur mécanique produit une réponse oscillatoire périodique qui est causée par la discontinuité du mécanisme de relâchement. Ma *et al* ont modélisé la dynamique d'un débobineur traditionnel et ont comparé le modèle mathématique avec la réponse réelle du système [1]. Ils ont identifié une force d'impact dans le fil lors du débobinage qui se produit lorsque le mécanisme de relâchement permet la rotation ponctuelle de la bobine pour allouer plus de fil dans le tressage. Le mécanisme se bloque instantanément lorsqu'une longueur de fil suffisante a été libérée. Ce comportement engendre des vibrations dans les filaments qui se superposent avec les vibrations causées par le fonctionnement normal de la machine de tressage.

Cette section a décrit le fonctionnement du tressage circulaire, 3D et des débobineurs mécaniques. Elle a également fait ressortir un enjeu du tressage 3D dans lequel les débobineurs doivent être en mesure de rembobiner de plus grandes longueurs de fil pour maintenir celui-ci tendu ainsi que le comportement vibratoire dans le fil lors du débobinage.

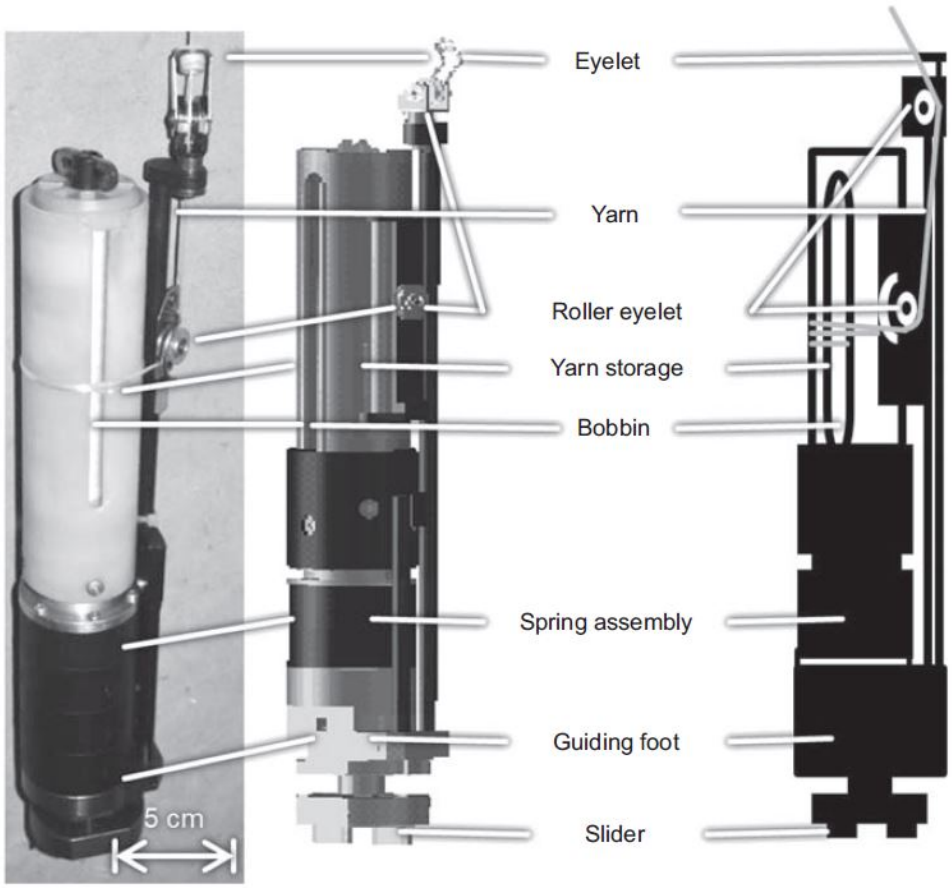


Figure 2.5. Débobineur pour tressage 3D mis au point par Legersdorf *et al.* (tiré de [3], droits obtenus)

2.2 Paramètres de tressage et propriétés mécaniques

Il existe plusieurs paramètres de tressage qui peuvent être modifiés durant le procédé de fabrication pour obtenir les propriétés mécaniques désirées. Cette section présente plusieurs paramètres de tressage ainsi que leur impact sur les propriétés mécaniques des pièces consolidées.

Un des paramètres qui peut être contrôlé est l'angle de tressage. La Figure 2.6 illustre l'angle de tressage θ formé entre les fils et la direction de tressage. L'angle de tressage peut être influencé par une combinaison entre la vitesse de tressage, la force de tension dans les fils par les débobineurs et la force de frottement causée par le glissement des différents fils tressés et qui dépend du type de matériau [12]. L'angle de tressage des fils dans la pièce finale influence directement les propriétés mécaniques de la pièce, telles que la résistance en compression et aux impacts [13–15].

Un autre paramètre existant dans le jargon du tressage textile est le ratio de couverture. Il s'agit d'un pourcentage qui exprime la superficie du mandrin qui est couverte par de la fibre. Sur la Figure 2.6, la matrice est illustrée en vert dans les espaces entre les fils. Selon Roy *et al.*, la tension dans les fils engendrée par les débobineurs affecte l'angle de tressage, le ratio de couverture ainsi que le diamètre final des pièces consolidées [16]. Une tension dans les fils plus élevée va regrouper les filaments ensemble, diminuant ainsi l'espace vide entre chacun d'eux. Cela signifie qu'ils occupent une plus petite empreinte de surface sur un

mandrin, ce qui diminue le ratio de couverture parce qu'il y a apparition de trous entre les tresses qui seront comblés par la matrice. De plus, une augmentation de la tension dans les fils entraîne une augmentation du frottement entre les filaments. Ce thème est couvert plus loin. Le contrôle de l'angle de tressage et du ratio de couverture est important pour obtenir des pièces ayant les propriétés mécaniques désirées et il dépend de la tension dans les fils.

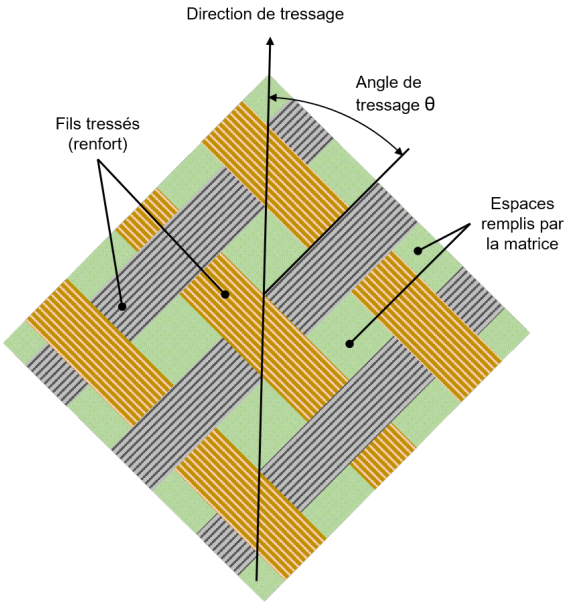


Figure 2.6. Paramètres et composantes des tresses

Pour concevoir des pièces en fil composite tressé, diverses approches mathématiques sont employées. Bien que les fils soient tendus par le mécanisme des débobineurs, leur tressage peut être modélisé mathématiquement. Zhang *et al.* ont mis au point des équations mathématiques qui dictent la cinématique des fils pendant le tressage [17, 18]. En raison des diverses forces en jeu (tel que la gravité, le frottement entre les fils, la distance entre le débobineur et le point de tressage, etc.), le fil suit une forme paraboloïde qui prend fin sur la surface du mandrin. Les équations qui dictent l'angle de tressage dépendent principalement des vitesses du procédé, mais aussi de la tension dans le fil. Dans cette méthode de modélisation, la tension dans le fil a peu d'importance pour l'obtention de l'angle de tressage si le tressage s'effectue sur un mandrin. Dans certaines conditions, telles qu'en absence d'un mandrin ou à tension très faible, la tension prend de l'importance. Pickett *et al.* propose une méthodologie de simulation par éléments finis pour modéliser la position exacte du fil dans la pièce tressée [19]. Ce modèle prend en considération le parcours des débobineurs dans la tresseuse et les diverses forces de frottement. Ce modèle assume cependant que les débobineurs engendrent une tension constante dans le fil durant le débobinage. Ainsi, pour concevoir une pièce ayant les propriétés mécaniques désirées, une hypothèse de tension constante dans le fil est posée. La réalité est toutefois différente parce que la tension dans le ressort suit une relation proportionnelle selon la rigidité de celui-ci — $F = k \cdot x$ — et en raison du mécanisme de relâchement, il y a des discontinuités qui engendrent un comportement oscillatoire.

Cette section permet d'identifier l'influence de l'angle de tressage et du ratio de couverture du textile dans l'obtention des propriétés mécaniques d'une pièce. Les méthodes de simulation pour le calcul des propriétés mécaniques font appel à la tension dans les fils et elle est assumée constante pour les fins de simulation. La

force de tension dans les fils a été identifiée comme facteur pouvant influencer ces deux paramètres de tressage. Ainsi, ces diverses études font ressortir l'importance de contrôler la force de tension par les débobineurs lors du tressage.

2.3 Dégradation du fil

La dégradation du fil se traduit par le bris de certains filaments qui constituent le fil en raison du frottement et des vibrations. Ces filaments peuvent s'accumuler sur les surfaces du débobineur et freiner le déroulement du fil, ce qui engendre encore plus de frottement avec le fil. Ce bris peut affecter les propriétés mécaniques de la pièce finale. L'usure du fil ne se produit pas seulement durant le procédé de tressage, mais aussi durant les différentes étapes de préparation de la matière avant et après le tressage [20].

Les vibrations ressenties dans les fils lors du tressage peuvent engendrer de l'usure prématurée du matériau en raison du frottement que ces vibrations génèrent. Zhang *et al.* ont établi que ces vibrations peuvent endommager prématurément certains textiles, tels que la fibre de carbone [11]. Dans une étude de cas effectuée par Bulat *et al.* sur le tressage de fibre de carbone, il a été déterminé que les forces de frottement sur ce matériau engendraient de la poussière, ce qui est indicateur de dommages dans le matériau [21]. Outre les vibrations engendrées par les débobineurs, Ebel *et al.* ont trouvé qu'il y a une multitude d'autres facteurs d'usure prématurée dans la fibre, tels que la force de tension, la vitesse de tressage et le procédé d'embobinage des bobines vides [20]. Lorsque la force de tension augmente dans le fil, cela se traduit par une augmentation du frottement entre les fibres et les diverses surfaces de contact, engendrant ainsi le bris des filaments les plus faibles. Une haute vitesse de tressage engendre des vibrations avec amplitudes grandissantes, ce qui provoque encore une fois du frottement entre les filaments. Le procédé d'embobinage sert à embobiner le fil à partir d'une bobine de matière brute sur des petites bobines servant aux débobineurs mécaniques. Le mauvais contrôle du procédé d'embobinage pourrait engendrer des nœuds et des bris dans le fil [22]. De plus, selon Czichos *et al.*, lors d'une étude portant sur le frottement de la fibre et sur les défauts de fabrication, l'énergie de frottement a été établie comme étant une des causes primaires des bris des filaments [23]. Il a été conclu que le fil ne peut pas absorber toute l'énergie de frottement qui est causée par les vibrations, alors les filaments les plus faibles peuvent se rompre.

Cette section a fait ressortir le phénomène vibratoire qui se produit lors du tressage et ce dernier est identifié comme étant le principal facteur de dégradation du textile. Les débobineurs mécaniques ont été identifiés comme étant principalement responsables des vibrations dans les fils en raison de leur mécanisme de relâchement.

2.4 Systèmes de tension

Cette section présente plusieurs systèmes de tension des fils composites. En premier lieu sera étudié le procédé de placement filamentaire qui fait appel lui aussi à des fils composites. Par la suite, d'autres mécanismes de tension ou de mesure seront présentés.

Le placement filamentaire est un procédé de fabrication de matériaux composite qui fait appel à un bras robotisé qui déroule et comprime un fil en continu sur un mandrin [24]. Un mécanisme de tension qui est utilisé pour maintenir les fils tendus lors du placement filamentaire est le *yarn tension dancer arm*. La Figure 2.7 illustre le fonctionnement de ce système de tension pour le débobinage de fil composite. Yi Liu *et al.* illustrent la bobine de fil qui se déroule à partir d'un moteur M. Le fil passe par une poulie guidée en

translation et connectée à un ressort. Par la suite, le fil passe à travers un système de mesure de la tension, pour ensuite atteindre le mandrin. Le terme *dancer* s'applique à la poulie qui est montée sur le ressort parce qu'elle peut se déplacer pour maintenir le fil tendu.

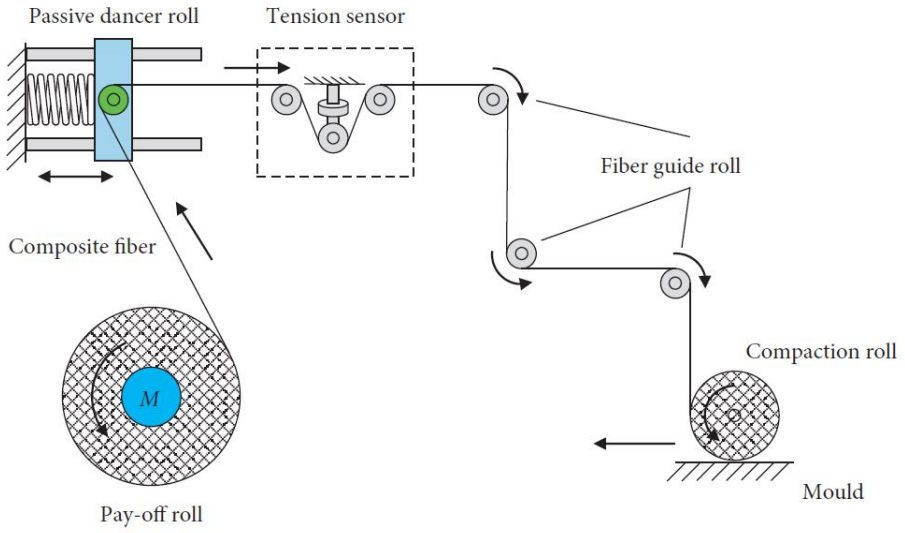


Figure 2.7. Concept de tension *dancer arm* utilisé pour le débobinage de rouleaux et de fils (tiré de [4], licence CC BY 4.0)

Ce procédé de fabrication possède des enjeux similaires au tressage : le textile doit être appliqué avec une force de tension très précise afin d'éviter des bris ou des défauts de fabrication [25]. Le ratio de couverture du matériau influence grandement les propriétés mécaniques de la pièce finie, et l'épaisseur du fil dépend de la force de tension dans le fil [26]. Alors, une plus grande force de tension dans le fil rend les filaments plus compacts, ce qui cause le fil à avoir une plus petite épaisseur sur le mandrin.

Plusieurs projets de recherche ont été réalisés dans le but d'asservir la tension dans le textile lors du déroulement de la bobine [25, 27] et ils font appel à divers mécanismes motorisés. Ces systèmes utilisent des capteurs étalonnés pour mesurer la force dans le fil et ces mesures sont utilisées dans la rétroaction de l'asservissement de la rotation du moteur qui déroule le textile. Plusieurs sous-mécanismes sont mis en place pour éliminer les vibrations et assurer une force constante et contrôlable en temps réel.

Un autre projet de recherche utilise une méthode par frottement pour contrôler la tension dans le textile. Podsiedlik *et al* ont développé un mécanisme qui utilise deux plaques en acier pour comprimer le textile, augmentant ainsi le frottement dans ce dernier [28]. La force de frottement est contrôlée par un champ électromagnétique qui serre ou relâche les deux plaques.

Dans le domaine du tressage, Maidl *et al.* ont développé un mécanisme afin d'estimer la tension dans le fil en mesurant la position du bras de levier lié au rochet (de chacun des débobineurs) lorsqu'il passe devant un capteur installé sur la machine de tressage [5]. La Figure 2.8 illustre le fonctionnement de ce système qui permet d'estimer la force de tension. Un capteur à effet hall est installé sur la machine de tressage et un aimant est fixé sur le bras de levier des débobineurs. Durant le tressage, l'aimant de chacun des débobineurs passe devant le capteur, ce qui permet de mesurer la position du bras de levier des débobineurs, et donc d'estimer la tension dans le fil. Ce système permet également de détecter des défaillances telles que le bris

du fil qui cause le bras de levier à être à sa position la plus basse.

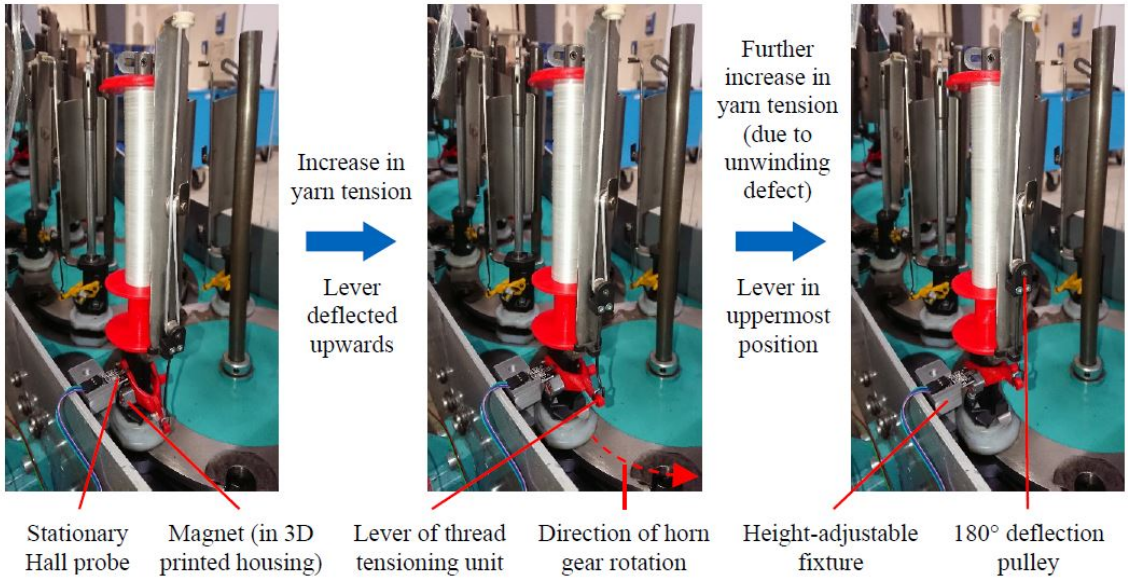


Figure 2.8. Concept d'estimation de tension et de détection d'anomalies durant le débobinage (tiré de [5], licence CC BY 3.0)

Dans cette revue de littérature, uniquement deux références de débobineurs actifs ont été retrouvées. Une première [29] a été mentionnée dans un des articles cités précédemment, cependant le texte original n'a été retrouvé dans aucune base de données, il est donc impossible d'en vérifier le contenu. Une seconde mention de débobineur actif a été rencontrée lors d'une publication par *Institut für Textiltechnik (ITA), RWTH Aachen University* [30]. Dans cette publication, un système motorisé est incorporé aux débobineurs déjà existants dans le but de contrôler la tension dans le fil. Il y a également un système de mesure de la tension pour assurer la boucle de rétroaction de l'asservissement. Ce concept utilise une batterie pour pouvoir fonctionner sans fil. Outre ces deux références, il ne semble pas y avoir de concept de débobineur actif dans l'industrie.

Cette section a permis d'introduire divers mécanismes utilisés pour contrôler la tension dans le textile lors de la fabrication. Le placement filamentaire fait appel à des systèmes motorisés et asservis pour contrôler la tension. Il existe également d'autres méthodes pour tendre le textile ainsi que pour estimer la force de tension durant le tressage. L'absence de documentation dans la revue de littérature sur le concept de débobineur motorisé pour tressage démontre qu'il s'agit d'un sujet novateur qui peut apporter une valeur scientifique au domaine du tressage.

2.5 Synthèse de la problématique

À travers cette revue de littérature, il a été possible de cerner les enjeux principaux liés aux débobineurs traditionnels, au tressage circulaire et au tressage 3D. Cette section détaille les divers problèmes que les débobineurs mécaniques actuels apportent aux procédés de tressage.

La liste suivante regroupe toutes les problématiques liées aux débobineurs qui ont été ressorties par la revue de littérature.

1. Le tressage 3D requiert des débobineurs pouvant rembobiner plus de fil que les débobineurs traditionnels.
2. La force de tension dans le fil influence l'angle de tressage ainsi que le ratio de couverture. Ceci affecte les propriétés mécaniques de la pièce consolidée.
3. La géométrie des débobineurs mécaniques détermine la réponse vibratoire de la tension dans les fils.
4. Les vibrations lors du tressage, principalement générées par les débobineurs, engendrent de l'usure prématurée des fils.
5. Au moment de la rédaction de ce mémoire, peu de documentation a été trouvée sur l'existence d'un débobineur motorisé et asservi.

La littérature soulève un problème vibratoire lors du débobinage du fil durant le tressage. Ces vibrations ont été associées à la dégradation prématurée du matériau composite. Étant donné que la géométrie des débobineurs détermine la réponse vibratoire et qu'il manque de données de caractérisation sur les débobineurs, il faut mettre au point une méthodologie de caractérisation des débobineurs mécaniques afin d'avoir une base de comparaison. Ainsi, le Chapitre 3 porte sur la caractérisation de deux types de débobineurs mécaniques.

La littérature a fait ressortir le besoin de contrôler la tension dans le fil dans le but de produire des pièces ayant les propriétés mécaniques désirées, le tressage 3D nécessite des débobineurs capables de rembobiner de plus grandes longueurs de fil pour maintenir ce dernier tendu durant le tressage et il n'existe pas présentement de débobineurs motorisés pour tressage. Ainsi, le Chapitre 4 porte sur le développement d'un débobineur motorisé qui devra résoudre plusieurs problèmes qui sont présents avec les débobineurs traditionnels.

Finalement, il faut pouvoir conclure sur les performances du débobineur motorisé et les comparer à celles des débobineurs traditionnels. Ainsi, le Chapitre 5 porte sur la caractérisation du débobineur actif lorsque celui-ci est soumis au même test de caractérisation que les débobineurs mécaniques lors du Chapitre 3. Ayant la même base de comparaison, il sera possible de conclure si le débobineur actif offre de meilleures performances que les débobineurs traditionnels.

CHAPITRE 3 CARACTÉRISATION DES DÉBOBINEURS MÉCANIQUES

Ce chapitre traite du premier objectif de recherche, soit la caractérisation du comportement des débobineurs mécaniques. Tout d'abord seront présentés les débobineurs mécaniques, le banc de tests utilisé pour l'acquisition des données et la méthodologie de caractérisation. Finalement, les résultats principaux seront présentés et analysés. Ce chapitre permet d'établir une base de comparaison entre les performances de divers débobineurs.

3.1 Description des débobineurs mécaniques

Dans le cadre de ce projet de recherche, deux modèles de débobineurs mécaniques sont étudiés : un débobineur A03 (Xuzhou Henghui Braiding Machine Co. Ltd) utilisé par le LabSFCA et un débobineur IFDA100 (Herzog Gmbh) provenant du Groupe CTT. Dans ce mémoire, le débobineur du LabSFCA sera dénommé *db.SFCA* et celui du CTT sera dénommé *db.CTT*. Ces débobineurs sont illustrés sur la Figure 3.1. On peut y voir les composantes principales : le bras de levier, la goupille de relâchement, le mécanisme de redirection du fil, l'emplacement pour le ressort principal ainsi que la bobine avec le fil pour tressage. La différence principale entre ces deux débobineurs est que celui du LabSFCA utilise des poulies et un tambour à rotation libre pour rediriger le fil tandis que celui du Groupe CTT utilise uniquement des surfaces à frottement (aucune composante mobile) pour la redirection du fil.

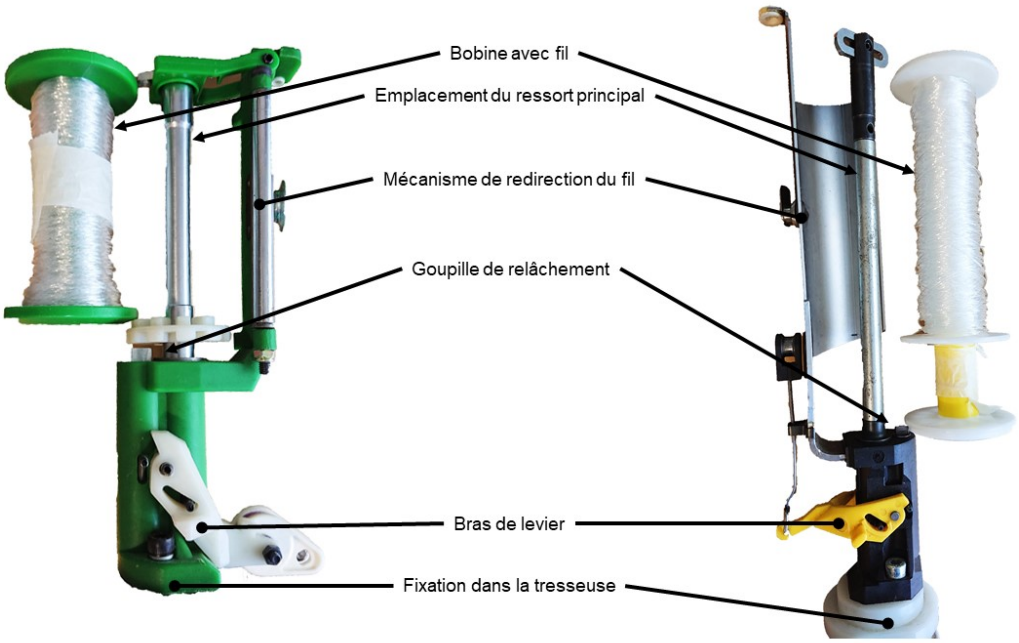


Figure 3.1. Composantes principales du db.SFCA (gauche) et du db.CTT (droite)

La Figure 3.2 illustre le schéma d'un débobineur mécanique plus en détail. Le schéma a été inspiré du db.SFCA, toutefois, la majorité des composantes peuvent être retrouvées également sur le db.CTT. Celles

qui sont différentes entre les deux débobineurs sont illustrées en rouge. Les composantes du db.SFCA sont décrites par la liste suivante.

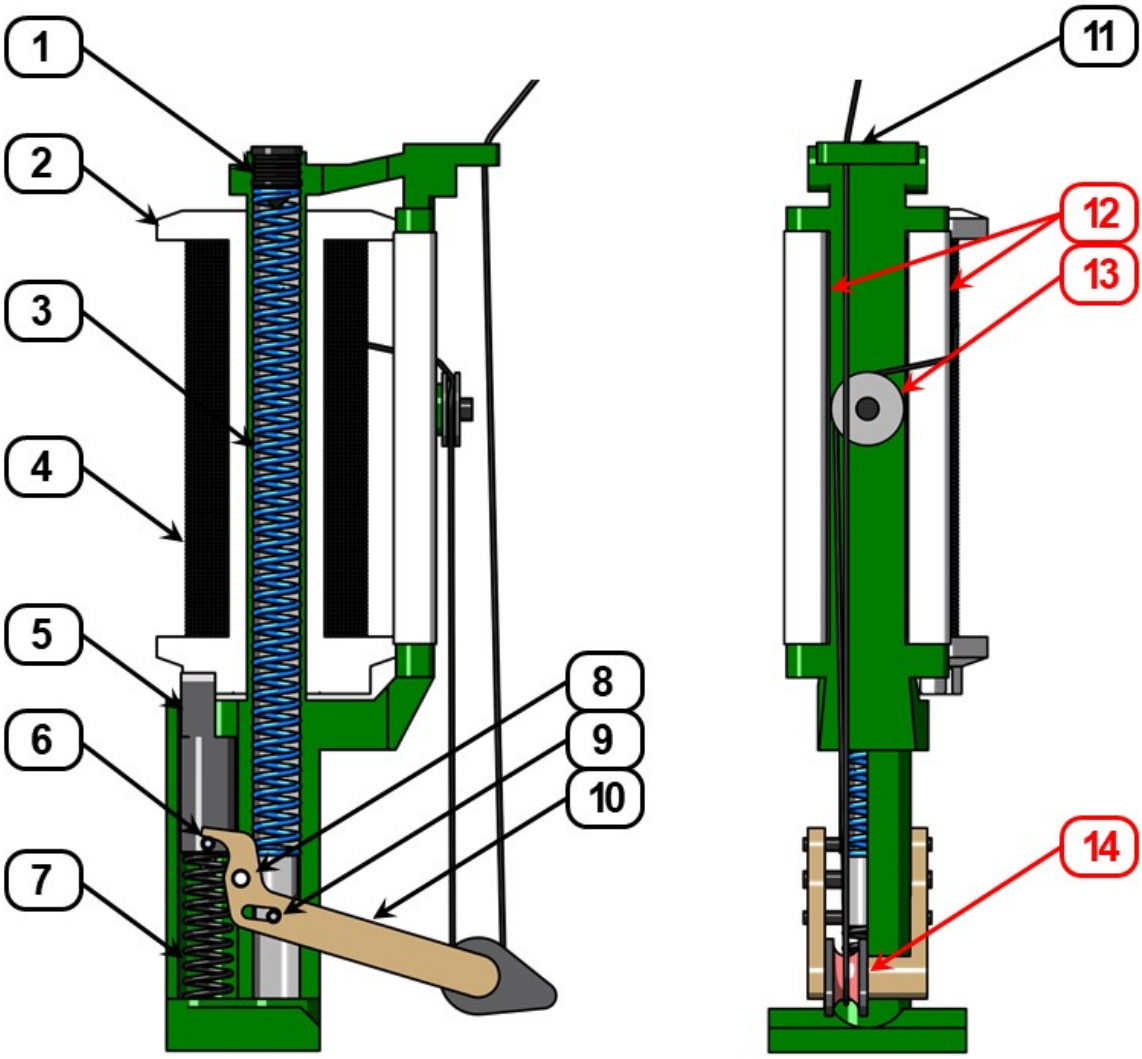


Figure 3.2. Schéma illustrant le mécanisme interne d'un débobineur mécanique avec toutes les composantes numérotées. En rouge sont les composantes qui sont différentes entre le db.SFCA et le db.CTT.

1. Vis de réglage pour maintenir le ressort principal (3) comprimé contre la goupille (9) attachée au bras de levier (10).
2. Bobine en plastique sur laquelle le fil est enroulé.
3. Ressort principal pour assurer une tension dans le fil.
4. Fil embobiné sur la bobine (2).
5. Goupille de relâchement de la bobine.
6. Goupille en contact avec le bras de levier (10) et attachée à la goupille de relâchement (5).
7. Ressort secondaire qui pousse la goupille de relâchement (5) vers le haut pour bloquer la rotation de la bobine (2).

8. Point de pivot du bras de levier (10).
9. Goupille attachée au bras de levier (10) pour transmettre la force de compression du ressort principal (3).
10. Bras de levier.
11. Anneau en céramique pour le point de sortie du fil.
12. Tambours à rotation libre.
13. Poulie de redirection du fil.
14. Poulie du bras de levier.

Les anneaux en céramique (11) des points de sortie du fil pour les deux débobineurs servent à guider le fil vers le point de tressage. Faits en céramique avec un fini de surface extrêmement lisse, ils engendrent une augmentation de la tension dans le fil qui dépend de l'angle de recouvrement et du coefficient de frottement entre le fil et la céramique. Cette force de frottement est toutefois réduite en raison du fini de surface lisse de la céramique.

Les tambours à rotation libre (12) du db.SFCA offrent peu de résistance de frottement en raison de leur rotation engendrée par le déroulement du fil. Sur le db.CTT, cette composante est remplacée par une grande plaque courbée en métal sur laquelle le fil frotte continuellement.

La poulie de redirection du fil (13) fonctionne à l'aide de roulements à billes en céramique pour le db.SFCA. Pour le db.CTT, cette composante est remplacée par un simple cylindre métallique soudé sur le corps du débobineur. Le fil frotte continuellement lors du débobinage.

La poulie du bras de levier (14) emploie un roulement à billes de haute qualité en céramique pour le db.SFCA. Il s'agit du type de poulies qui offre le moins de résistance de frottement parmi toutes celles qui peuvent être montées sur le db.SFCA. Ainsi, le fil roule sur la poulie lors du débobinage. Pour le db.CTT, cette composante est remplacée par un simple cylindre métallique fixé sur le bras de levier (10). Le fil frotte continuellement lors du débobinage.

La Figure 3.3 présente le fonctionnement du relâchement de la bobine. Les Figures 3.3a et 3.3d montrent la configuration des différentes composantes à l'état initial lorsque la bobine est bloquée et les Figures 3.3c et 3.3f montrent la configuration des différentes composantes à l'état final lorsque la bobine est libérée. Le relâchement du fil se déecrit par la rétraction de la goupille de relâchement (5) en raison de la rotation du bras de levier (10) qui pivote vers le haut. Le bras de levier (10) pivote vers le haut parce que la bobine (2) est bloquée par la goupille de relâchement (5) lors du déroulement du fil. Sur les Figures 3.3b et 3.3e on peut voir que le déroulement du fil engendre une rotation du bras de levier (10) qui comprime le ressort primaire (3) et le ressort secondaire (7). Ainsi, lorsqu'une longueur de fil suffisante est tirée par la machine de tressage, le bras de levier (10) atteint la position la plus haute, comprimant ainsi le ressort secondaire (7) suffisamment par l'intermédiaire de la goupille (6). Ceci rétracte la goupille de relâchement (5) qui libère la rotation de la bobine (2). Cette dernière commence à dérouler du fil et cette longueur de fil est reprise par le bras de levier (10) qui pivote maintenant vers le bas. Puisque le bras de levier (10) pivote vers le bas, il enclenche le mécanisme de relâchement (5, 6, 7). Ainsi, la goupille de relâchement (5) est poussée vers le haut, ce qui bloque la rotation de la bobine (2). Ce phénomène se produit périodiquement durant tout le procédé de tressage.

Il a été constaté que la goupille de relâchement possède des chanfreins entre 0.5 et 1 mm sur les côtés qui sont en contact avec la bobine et que la bobine en plastique possède des coins arrondis sur les faces qui sont

en contact avec la goupille de relâchement. Ces deux facteurs combinés peuvent engendrer un glissement lorsque la bobine tourne rapidement pour donner plus de longueur de fil. Effectivement, il arrive parfois que la bobine (avec toute la masse de fil) ait assez d'inertie de rotation pour comprimer la goupille de relâchement en glissant sur celle-ci. Ce phénomène permet à la bobine de libérer plus de fil que prévu, ce qui engendre une diminution significative de la force de tension.

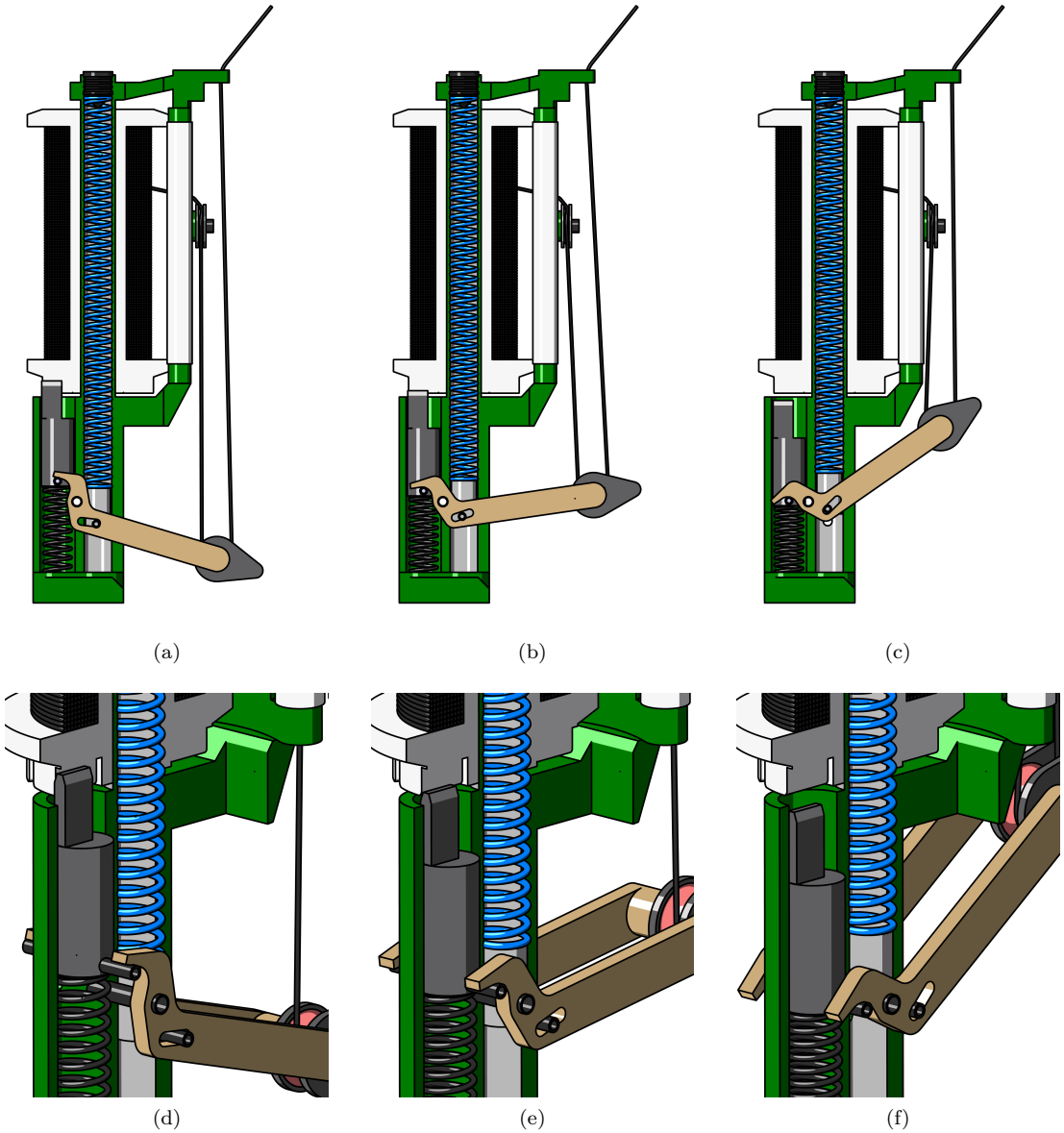


Figure 3.3. Fonctionnement du mécanisme de relâchement des débobineurs actifs. Position du bras de levier de tension du fil : bas (a, d), milieu (b, e) et haut (c, f).

Le db.SFCA possède cinq types de ressorts qui sont identifiés par des couleurs (vert, bleu, jaune, rouge et blanc). Il n'y a aucune fiche technique disponible pour en connaitre leur constante de rigidité. Le db.CTT possède quatre types de ressorts identifiés eux aussi par des couleurs (bleu, vert clair, vert foncé et rose). La fiche technique des ressorts du db.CTT est jointe dans l'Annexe B, mais elle ne mentionne pas le coefficient de

rigidité des ressorts. Cette fiche technique fournit une tension produite par le débobineur en régime statique et dynamique. Les tests de caractérisation devraient, en théorie, valider les données de la fiche technique. Pour mieux comparer les différents ressorts et pour faciliter l'appellation des ressorts, le Tableau 3.1 a été mis au point et à l'aide d'un calculateur de rigidité des ressorts [31], leur coefficient a été approximé. Un matériau utilisé couramment pour la fabrication des ressorts est le ASTM A 228 [32] qui possède un module en torsion de 80 GPa. Celui-ci a été utilisé pour calculer les coefficients de rigidité. Dans ce mémoire, les ressorts seront toujours dénommés par leur nomenclature qui correspond au type de débobineur ainsi que le coefficient de rigidité.

Tableau 3.1 Attributs des ressorts étudiés

Couleur	$D_{nominal}$**[mm]**	D_{fil}**[mm]**	**Nb. de spires**	**Coeff. calculé [N/m]**	**Nomenclature**
db.SFCA					
Blanc	5.7	0.8	60	369	SFCA-369
Rouge	5.9	0.6	80	83	SFCA-83
Jaune	6.0	0.5	75	39	SFCA-39
Bleu	5.6	0.4	75	19	SFCA-19
Vert	5.7	0.3	70	7	SFCA-7
db.CTT					
Rose	5.6	0.9	88	425	CTT-425
Vert foncé	5.8	0.7	94	130	CTT-130
Vert pâle	5.9	0.63	94	81	CTT-81
Bleu	5.9	0.6	107	59	CTT-59

3.2 Banc de tests pour la caractérisation des débobineurs classiques

Cette section présente en détails le banc de tests utilisé pour la caractérisation des débobineurs mécaniques. Le montage réel sera décrit avec chacune des composantes utilisées. Il est à noter que le processus de conception pour ce banc de test n'est pas discuté ici, car il est analogue à celui utilisé pour atteindre l'objectif 2 — développement d'un débobineur actif — présenté au chapitre suivant.

Le banc de tests doit pouvoir effectuer l'acquisition à haute fréquence de la force dans le fil lors du déroulement des deux débobineurs étudiés. Il doit être capable d'embobiner du fil à vitesse constante et il doit également être capable de sauvegarder les données pour des fins d'analyse. Il faut que les deux débobineurs étudiés puissent être installés sur le banc de tests pour leur caractérisation.

La Figure 3.4 montre le banc de tests avec toutes les composantes qui le constitue. On peut y voir les débobineurs mécaniques (1), les capteurs de force (2), le système de rembobinage avec moteur BLDC, encodeur et capteurs du rayon effectif du fil (3), le système de calibration de la force (4), le bloc d'alimentation électrique (5), le CAN pour la lecture de force et du rayon effectif (6), le circuit de contrôle ODrive (7) et l'ordinateur Raspberry Pi (8). Chacune de ces composantes sera détaillée plus loin dans cette section.

Mesurer la tension dans le fil

Pour mesurer la tension dans le fil, un système de mesure a été mis au point. Il emploie des poulies en céramique de haute qualité pour rediriger le fil de manière à ce qu'elle exerce une force perpendiculaire au

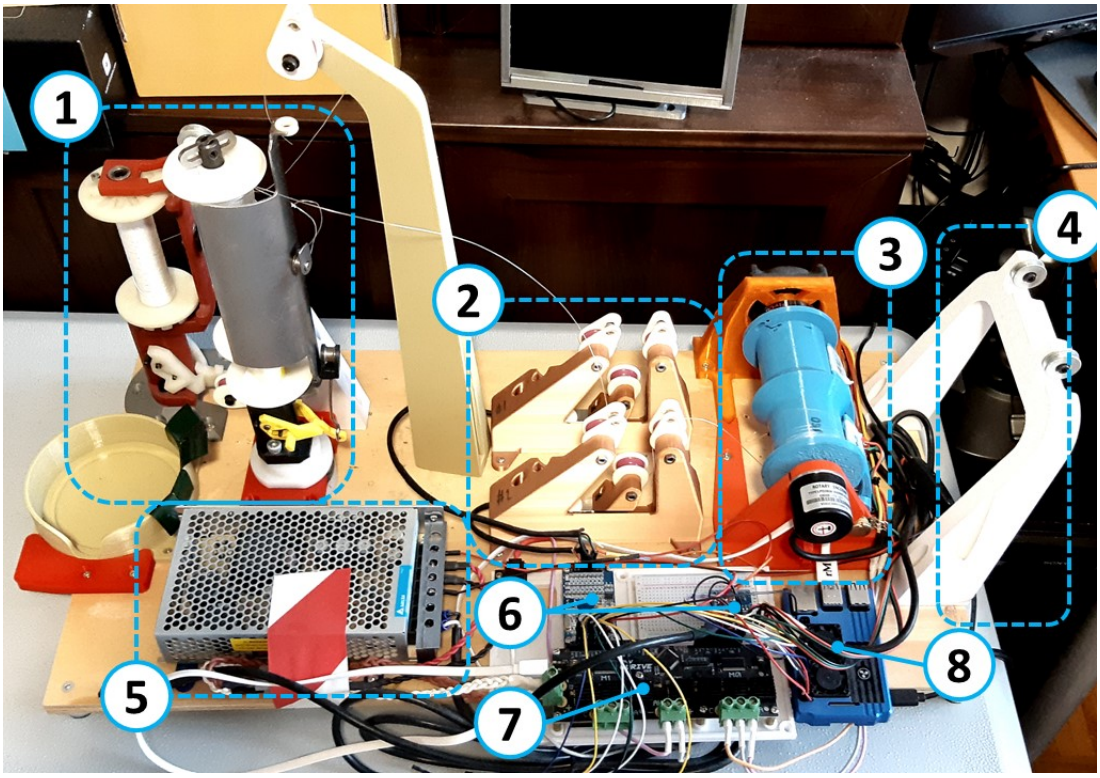


Figure 3.4. Schéma du banc de tests ainsi que des composantes principales.

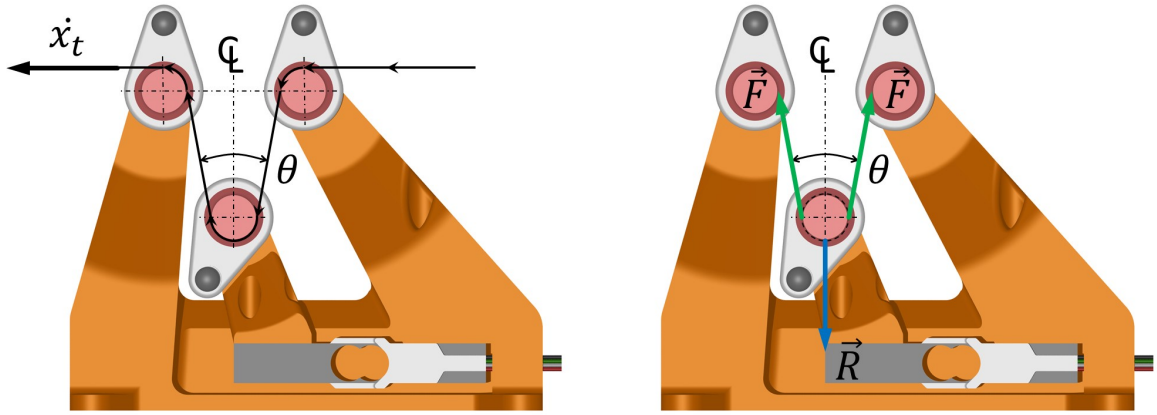
Débobineurs mécaniques (1), capteurs de force (2), système de rembobinage avec moteur BLDC, encodeur et capteurs de rayon effectif du fil (3), système de calibration de force (4), boitier d'alimentation (5), CAN pour la lecture de force et du rayon effectif (6), ODrive (7) et ordinateur Raspberry Pi (8)

corps d'épreuve. La Figure 3.5a illustre le parcours du fil à travers une série de poulies. Le fil suit la direction de déroulement indiquée par la flèche $\dot{x}_t$. Les deux poulies du haut sont parfaitement symétriques par rapport à la poulie du bas qui est fixée sur le corps d'épreuve. Ainsi, la seule force résultante est perpendiculaire au corps d'épreuve. Un corps d'épreuve avec jauges de déformation a été utilisé pour mesurer la force. Les jauges de déformation forment un pont de Wheatstone pour produire une différence de potentiel mesurable et proportionnel à l'amplitude de déformation. Un convertisseur analogique-numérique (CAN) est utilisé pour lire cette différence de potentiel. Sur la Figure 3.5b on peut observer un diagramme des forces sur la poulie liée au corps d'épreuve. On y aperçoit les forces $\vec{F}$ dans le fil ainsi que la réaction $\vec{R}$ dans le corps d'épreuve, qui peut être obtenue à l'aide d'une simple relation trigonométrique. Le corps d'épreuve a été choisi de manière à tolérer la force maximale présente dans le fil. Ainsi, la force maximale dans le fil avec un certain facteur de sécurité a été établie à 10 N.

La sélection du CAN était basée sur les deux critères suivants :

- Mesurer au minimum deux canaux différentiels à haute précision (pour mesurer la force dans les débobineurs mécaniques).
- Effectuer l'acquisition à haute fréquence de cette force.

Ainsi, le convertisseur analogique numérique choisi est le ADS1256 [33] produit par Texas Instruments. Ce module offre une précision sur 24bits ainsi qu'une fréquence maximale d'acquisition de 30 000 données par



(a) Déplacement du fil à travers le capteur de force

(b) Diagramme de forces sur le corps d'épreuve

Figure 3.5. Diagrammes fonctionnels du capteur de force dans le fil

seconde (30kHz). De plus, il possède plusieurs autres paramètres ajustables, tels qu'un filtre programmable, un gain programmable (*Programmable Gain Amplifier - PGA*). Pour des fins de stabilité, la fréquence d'acquisition choisie est de 7500 données par seconde, qui est la vitesse maximale que l'ordinateur d'acquisition peut traiter avant que le processeur ne soit surchargé. La communication des données entre le CAN et l'ordinateur d'acquisition s'effectue par l'intermédiaire d'un protocole de communication SPI (*Serial-Peripheral Interface*). Pour plus de détails sur la communication SPI, il est possible de se référer à l'Annexe A.

Embobiner du fil à vitesse contrôlée

Pour réaliser ce requis du banc de tests, deux sous-systèmes sont employés :

1. Utilisation d'un moteur BLDC pour enrouler le fil.
2. Utilisation d'un système pour mesurer le rayon effectif du fil par rapport à l'axe de rotation du moteur.

Un moteur BLDC possède plusieurs pôles magnétiques (on retrouve souvent 14 pôles dans les moteurs pour loisirs, tels que la fabrication d'avions ou drones téléguidés), mais il possède toujours trois phases. Ces trois phases sont alimentées par trois fils qui reçoivent différents niveaux de tension, ce qui engendre une rotation contrôlée de l'axe du moteur. Afin de contrôler le moteur BLDC, un circuit de contrôle *Open Source* a été sélectionné : le ODrive, conçu par ODrive Robotics (`https://odriverobotics.com/`). Ce contrôleur utilise un asservissement avec rétroaction par encodeur ainsi que par rétroaction sur la mesure du courant dans chacune des phases du moteur. La méthodologie d'asservissement emploie ce que l'on appelle le *Field-Oriented Control — FOC*. Il s'agit d'un contrôle vectoriel du courant dans les trois phases du moteur. Par l'implémentation d'un encodeur, le ODrive est capable de contrôler avec exactitude l'angle de rotation du moteur, et par la mesure du courant dans chacune des phases du moteur, il est également capable de contrôler avec exactitude le couple électromécanique du moteur. Il faut rappeler qu'il existe une relation proportionnelle qui relie le couple d'un moteur BLDC au courant. Ce circuit a été étudié et modifié par un étudiant — Nathanaël Beaudoin-Dion — pour la réalisation de l'objectif de recherche du Chapitre 4. Le ODrive permet d'asservir avec précision la position du moteur grâce à la rétroaction de l'encodeur. La vitesse de déroulement correspond à la vitesse tangentielle du fil $\dot{x}_t$, c'est-à-dire en relation avec le rayon effectif du fil R_{eff}. Le moteur possède une vitesse de rotation angulaire $\dot{\theta}$. On obtient ainsi l'équation $\dot{x}_t = R_{eff} \cdot \dot{\theta}$.

En se rembobinant sur une pièce cylindrique attachée au moteur BLDC, le volume de fibre augmente. Cette augmentation volumétrique engendre une augmentation du rayon effectif du fil, ce qui influence la vitesse tangentielle. Sur la Figure 3.6 suivante, on peut constater l'effet d'augmentation du bras de levier du fil par rapport à l'axe de rotation du moteur BLDC. On peut remarquer que le rayon R_1 sur la bobine moins chargée à gauche est inférieur au rayon R_2 sur la bobine plus chargée à droite. Étant donné que le moteur BLDC est contrôlé en position de manière à générer une vitesse tangentielle constante, il faut compenser pour cette variation de rayon.

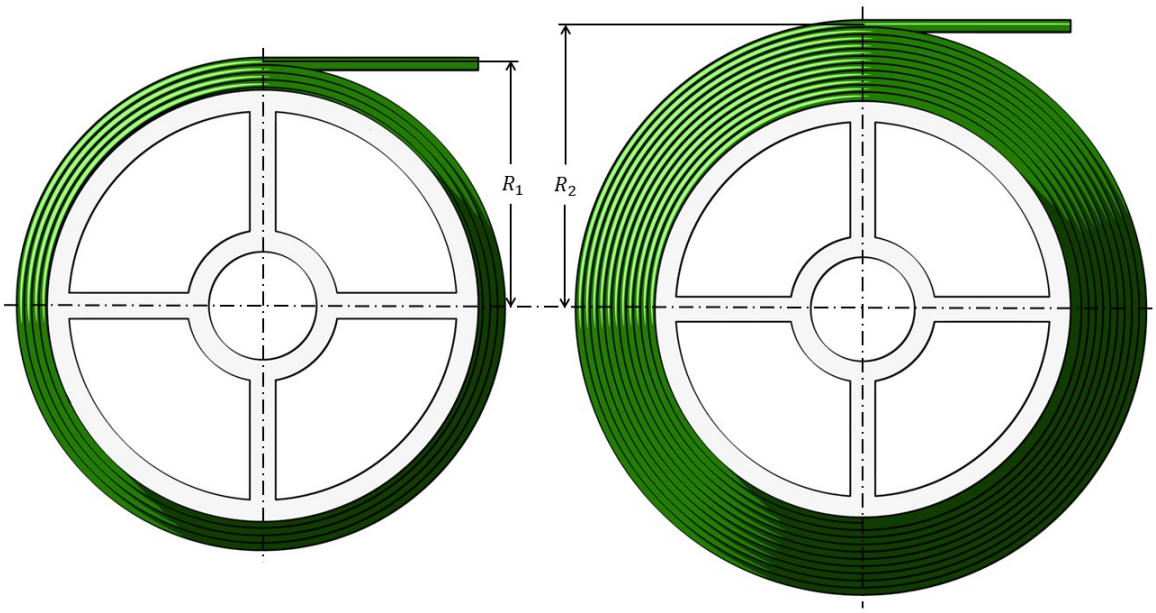


Figure 3.6. Variation du rayon effectif lors du rembobinage du fil par le moteur BLDC du banc de tests

Une manière simple de mesurer le rayon engendré par le bobinage du fil est l'utilisation d'un potentiomètre doté d'une pièce en plastique qui est maintenue en contact avec le fil. La variation du rayon se traduit par une rotation du potentiomètre qui varie proportionnellement sa résistance électrique. En mesurant sa résistance électrique, on peut étalonner une relation entre le rayon effectif et la tension électrique mesurée. Les variations de tension par le potentiomètre sont très petites étant donné que l'angle de rotation est très petit. Il faut utiliser un CAN suffisamment précis pour mesurer ces faibles différences de potentiel. Le CAN qui a été choisi est un ADS1115, qui possède une précision sur 16 bits et peut lire jusqu'à une vitesse de 860 données par seconde [34]. Étant donné la variation de rayon plutôt lente, cette vitesse d'acquisition est amplement suffisante. La transmission des données à l'ordinateur de contrôle se fait via le protocole de communication I2C (*Inter-Integrated Circuit*).

Sauvegarder les données

La Figure 3.7 affiche l'ordinateur RPi qui est utilisé pour contrôler le banc de tests ainsi que certaines de ses caractéristiques. Le processeur quatre-cœurs 64bits de cet ordinateur est de type ARM Cortex-A72 et fonctionne à une fréquence de 1.5GHz. Le système d'exploitation Raspberry Pi avec interface graphique

(Raspbian) [35] est installé sur une carte micro-SD. Ainsi, pour avoir une plus grande capacité de sauvegarde de données, une carte micro-SD de 32Gb est utilisée. Pendant un test d'acquisition, toutes les données sont gardées dans la mémoire vive (RAM) du RPi et lorsque le test est fini, il y a une séquence de post-traitement. Certaines données aberrantes sont enlevées et ensuite toutes les données sont sauvées dans un fichier *.csv* ayant une nomenclature distincte (se référer à la section 3.3). À titre indicatif, un fichier de données pour un seul test occupe un espace approximatif de 5 Mo et possède environ 112500 lignes de données.

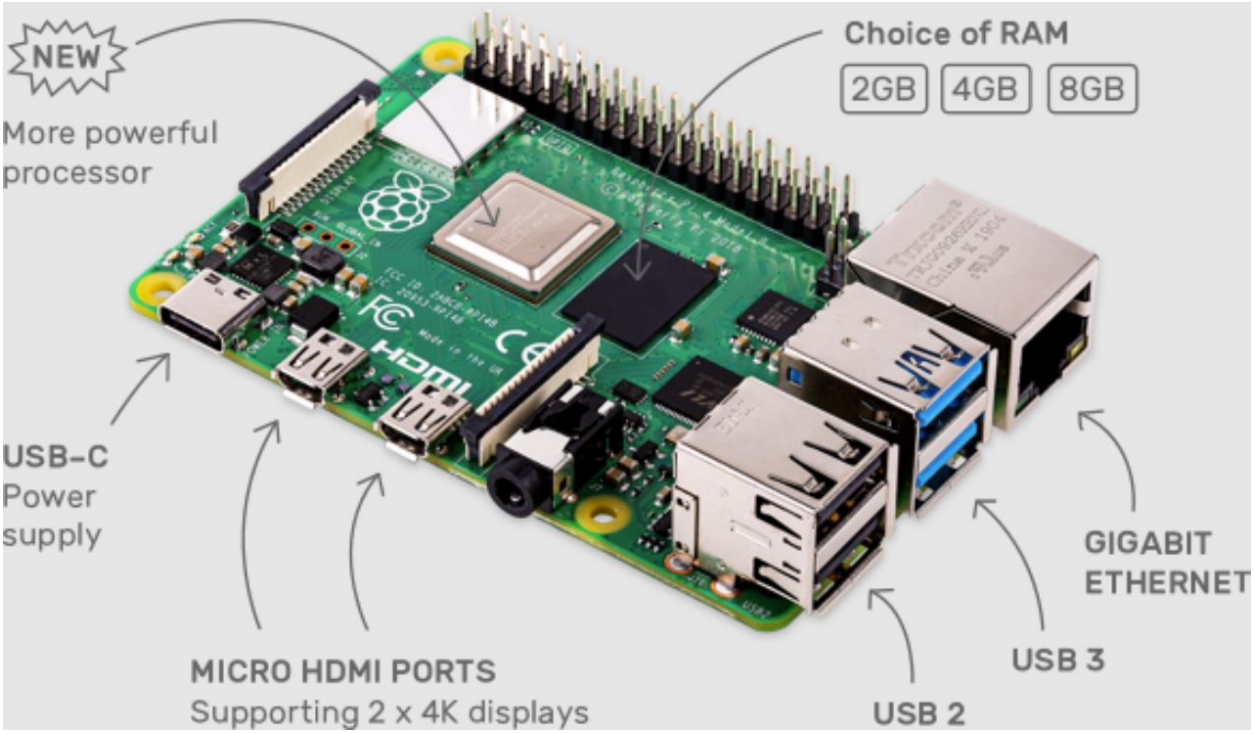


Figure 3.7. Ordinateur Raspberry Pi 4 [6] utilisé pour contrôler le banc de tests

Contrôler le banc de tests

Une interface graphique a été développée par un stagiaire — Mathieu Corbett — pour faciliter les tests d'acquisition et pour automatiser le processus de caractérisation. Par la suite, cette interface graphique a été modifiée pour incorporer de nouvelles fonctionnalités et pour optimiser l'exécution en temps-réel. La Figure 3.8 démontre l'interface graphique avec les sections principales qui sont utilisées dans les tests de caractérisation.

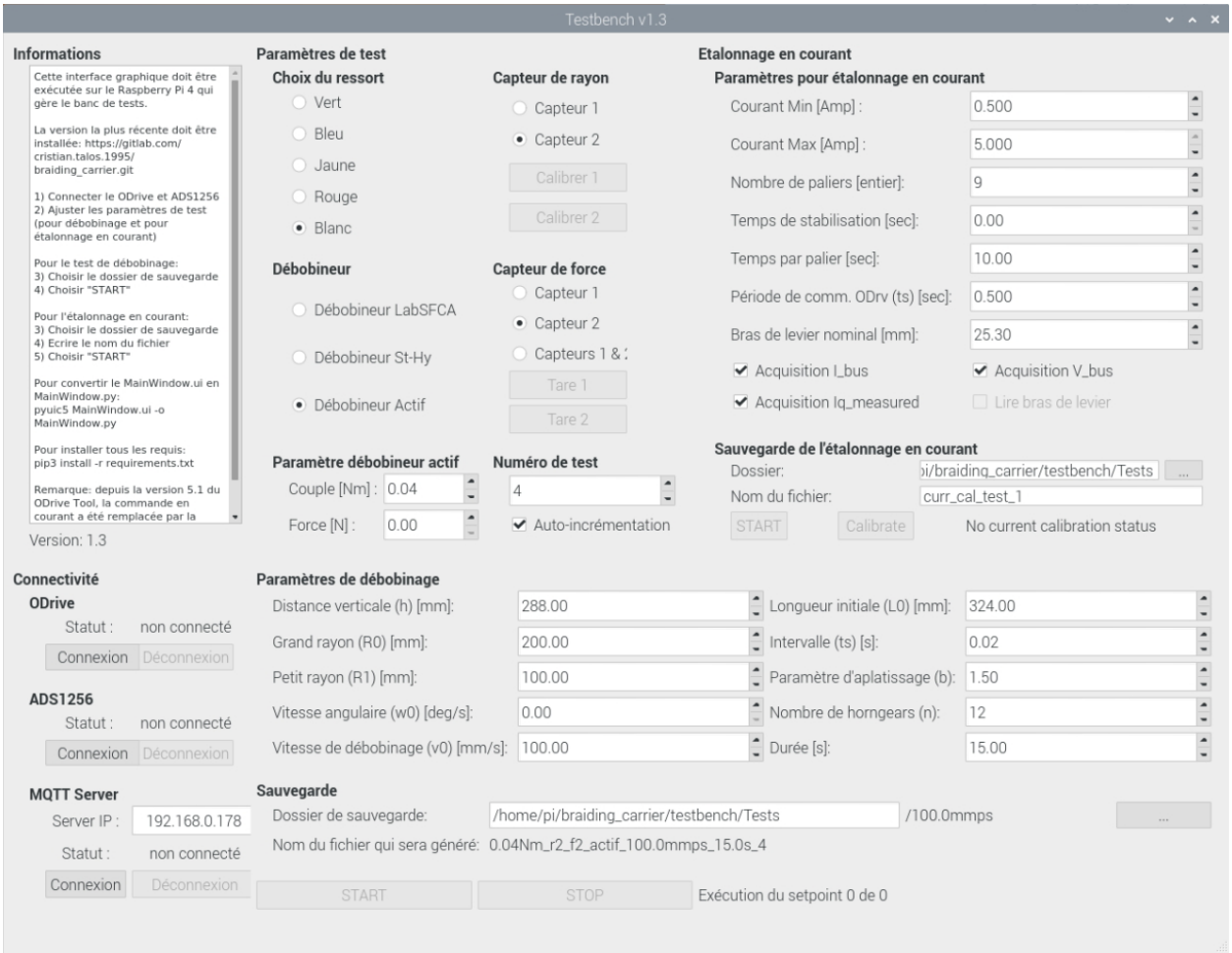


Figure 3.8. Aperçu de l'interface graphique pour la réalisation des tests de caractérisation

On peut remarquer qu'il y a une section à gauche pour donner des indications à l'opérateur sur l'utilisation de l'interface. Il y a également des boutons pour la connectivité avec divers composantes (avec le capteur de force, avec le circuit de contrôle du moteur et avec le serveur MQTT). Dans la section centrale, il y a tous les paramètres de tests qui peuvent être choisis — choix du ressort, choix du débobineur, choix des canaux d'acquisition de la force et du rayon effectif, etc. Il y a aussi des paramètres de débobinage qui peuvent être choisis, tels que la durée du test et la vitesse de débobinage. La section à droite de l'interface ne sera pas utilisée dans la réalisation de l'objectif 1 de recherche. Pour effectuer adéquatement l'acquisition des données, il faut étalonner les capteurs de force et de mesure du rayon effectif du fil.

3.2.1 Étalonnage du capteur de force et du rayon effectif du fil

Le dernier aspect important sur le banc de tests est l'étalonnage des capteurs de force et du rayon effectif du fil. L'objectif de cet étalonnage est d'établir une relation linéaire qui relie le signal lu par le CAN correspondant ainsi que la valeur réelle qu'il représente selon la forme suivante : $lecture = \alpha \cdot signal + \beta$. Pour le capteur de force, on trouve une équation linéaire qui relie un nombre sur 24 bits avec une force en Newton correspondante. Le capteur du rayon effectif aura une équation reliant un nombre sur 16 bits avec une mesure en mm du

rayon.

L'étalonnage des capteurs de force a été fait en utilisant des masses étalons calibrées. Ainsi, entre 100 et 2000 grammes, par incréments de 100 grammes, plusieurs milliers de lectures ont été faites. La régression linéaire a été appliquée sur la moyenne de chacun de ces groupes de lectures. Étant donné la relation proportionnelle entre la déformation du corps d'épreuve et la force appliquée, le taux de variation α est intrinsèque au capteur de force, mais l'ordonnée à l'origine peut varier selon divers facteurs parasitaires (tel que la légère déformation viscoélastique du PLA qui compose l'entièreté du banc de tests). Ainsi, l'interface graphique permet à l'opérateur de remettre à zéro (comme pour une balance) l'ordonnée à l'origine pour une lecture adéquate de la force.

L'étalonnage des capteurs du rayon effectif du fil se fait en utilisant un gabarit de rayons. Le gabarit de rayons se positionne sur la pièce qui rembobine le fil et il permet de mesurer des rayons prédéfinis. En l'occurrence, le rayon de la pièce qui rembobine le fil est de 50mm, et le gabarit permet de mesurer des rayons de 60, 70 et 80mm. La procédure pour l'obtention de l'équation reliant le signal et le rayon effectif est similaire : une série de plusieurs centaines de lectures sont faites pour chaque valeur de rayon, et par la suite une régression linéaire est calculée sur la moyenne de chaque série de lectures. Ainsi, le rayon est mesuré en tout temps par le banc de tests pendant chacun des tests de caractérisation pour permettre d'obtenir la vitesse de débobinage désirée, peu importe la quantité de fil qui se trouve déjà sur le rembobineur.

3.3 Méthodologie d'acquisition et paramètres de tests

Chaque test de caractérisation possède une procédure qui doit être suivie pour obtenir des résultats sous les mêmes conditions. Les procédures énumérées ci-dessous peuvent être retrouvées dans l'Annexe D.

- Procédure avant le début de la séance de tests
- Procédure avant le début d'un test
- Procédure pendant un test de caractérisation
- Procédure à la fin d'un test de caractérisation
- Procédure à la fin d'une séance de tests

La liste suivante présente tous les paramètres qui sont pertinents pour comprendre la méthodologie de tests.

1. Type de débobineur

Deux types de débobineurs mécaniques sont étudiés : débobineur du LabSFCA — db.SFCA — et débobineur du Groupe CTT — db.CTT. Le db.SFCA utilise un rouleau et des poulies pour rediriger le fil tandis que le db.CTT utilise uniquement des surfaces à frottement. Le db.SFCA est un modèle A03 (Xuzhou Henghui Braiding Machine Co. Ltd) tandis que le db.CTT est le modèle IFDA100 (Herzog Gmbh). Plus d'informations sur la fiche technique du db.CTT sont jointes dans l'Annexe B.

2. Ressort utilisé

Comme mentionné précédemment, chacun des débobineurs possède plusieurs ressorts de couleur qui servent à ajuster la tension dans le fil durant le débobinage. Le Tableau 3.1 précédent regroupe les différentes propriétés des ressorts ainsi que la nomenclature qui est utilisée dans ce mémoire.

3. Vitesse de débobinage

Cinq vitesses de débobinage ont été choisies dans ce projet de recherche : 25, 50, 100, 150 et 250 millimètres

par seconde. Ces vitesses ont été choisies arbitrairement de manière à couvrir la plage de vitesses utilisées lors d'un tressage standard.

4. Durée du test

La durée des tests a été fixée à 15 secondes pour pouvoir enregistrer plusieurs séquences en régime permanent sans toutefois surcharger l'espace mémoire (limité) de l'ordinateur d'acquisition.

5. Matériau de test

Les deux matériaux étudiés sont le fil de nylon et le fil de verre. Le fil de verre est très délicat et peut suivre facilement la courbure des poulies et surfaces de frottement. À l'opposé, le fil de nylon est plus gros (avec un diamètre de 0.60 mm) et il est donc plus résistant en flexion. Il ne suit pas aussi facilement la courbure des poulies et surfaces de frottement, alors la dynamique du débobinage peut en être affectée. Le fil de verre possède le numéro commercial suivant : AGY EC7 22 1X0 Z40 620-1, E225 1/0 1.0Z 620-1. Les filaments qui composent le fil de verre ont un diamètre entre 6.35 et 7.61 microns. Le fil de verre possède 22 TEX (22 grammes par 1000 mètres), ce qui correspond à approximativement 204 filaments. Il a également un agent d'encollage (*sizing*) 620-1 qui correspond à un amidon de lubrification spécial pour le tressage [36]. Le fil de nylon utilisé est du simple fil pour canne à pêche, ayant une charge maximale de 30 lb. Aucune autre propriété mécanique n'est connue sur le fil de nylon. Ces deux matériaux ont été choisis parce qu'ils ont des propriétés en frottement qui sont très différentes. Le fil de nylon devrait engendrer moins de forces de frottement parce qu'il y a une seule ligne de contact à travers toutes les surfaces de redirection du fil des débobineurs. Par contraste, le fil de verre possède 204 filaments qui sont en frottements sur les surfaces ainsi qu'entre eux. Malgré l'utilisation d'un revêtement protecteur, cela laisse supposer que le comportement du db.CTT devrait être différent du db.SFCA à cause du frottement. Les tests de caractérisation pourront démontrer s'il y a une différence significative entre un matériau filamentaire et un matériau à filament unique.

6. Nombre de tests par configuration

Le nombre de tests par configuration a été fixé à trois. Étant donné le grand nombre de paramètres étudiés, uniquement trois tests seront effectués par configuration.

7. Canal d'acquisition

Le banc de tests est doté de deux canaux d'acquisition. Le db.SFCA est positionné vis-à-vis le premier canal et le db.CTT vis-à-vis le second canal. Chacun de ces canaux est doté d'un système de mesure du rayon effectif de débobinage.

8. Rayon effectif de débobinage

Le rayon effectif de débobinage correspond à la distance entre l'axe de rotation du moteur qui effectue le débobinage et le point dernier point de contact du fil avec la bobine. L'utilisateur doit sélectionner dans l'interface graphique de contrôle le bon canal pour la compensation de rayon. Le db.SFCA est positionné vis-à-vis le premier canal et le db.CTT vis-à-vis le second canal.

9. Type de chargement

Deux types de chargements ont été envisagés : un chargement à vitesse constante et un chargement oscillatoire pour simuler le déplacement d'un débobineur dans la machine de tressage. Le chargement oscillatoire est une superposition d'un chargement en rampe avec un chargement sinusoïdal. Dans le cadre de ce projet de recherche, la décision a été prise d'effectuer uniquement le débobinage à vitesse constante parce qu'il a été jugé suffisant pour caractériser les performances des débobineurs. Néanmoins, un chargement oscillatoire a

été fait uniquement sur le db.SFCA avec fil de nylon pour servir de référence lors de la comparaison des résultats avec ceux du débobineur actif. Ce test oscillatoire est présenté plus tard dans ce chapitre.

Le Tableau 3.2 illustre tous les paramètres qui peuvent être sélectionnés pour réaliser une configuration de tests. Une configuration est obtenue avec la sélection du type de débobineur, du matériau débobiné, du type de ressort utilisé, de la vitesse de débobinage et du type de chargement.

Tableau 3.2 Tableau récapitulatif des paramètres des tests de caractérisation

Configuration débobineur–ressort	**Vitesse de déroulement (mm/s)**	**Matériau du fil**	**Type de chargement**
SFCA-7	25	Fil de nylon	Vitesse constante
SFCA-19	50	Fibre de verre	Oscillatoire
SFCA-39	100		
SFCA-83	150		
SFCA-369	250		
CTT-59			
CTT-81			
CTT-130			
CTT-425			

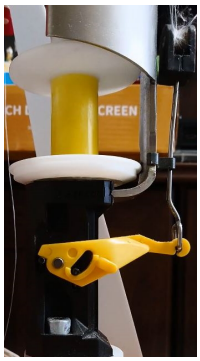
3.4 Résultats de caractérisation des débobineurs mécaniques

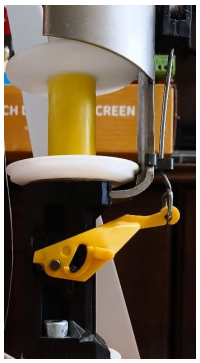
Dans cette section, les résultats sont présentés et dans la prochaine section, les conclusions sont tirées sur les résultats. La Figure 3.9 illustre la variation de la force dans le fil lors du débobinage du db.CTT avec le ressort CTT-425. La Figure 3.10 illustre le même comportement, mais pour le db.SFCA avec le ressort SFCA-369. Les deux exemples utilisent le fil de verre et un débobinage constant à 25 mm/s. Les graphiques sont illustrés pour avoir une idée générale de la variation de la tension selon l'angle de pivot du bras de levier du débobineur. Sur les graphiques, les lectures brutes sont en bleu et les lectures filtrées pour réduire le bruit sont en rouge (une librairie Python est utilisée pour calculer la transformée de fourrier — *Fast-Fourrier Transform* [37, 38] – et ainsi filtrer le signal).

La phase transitoire de l'évolution de la force est illustrée sur les premières images (a, b et c). Ces images sont placées sur l'axe du temps du graphique (f) qui illustre la variation de la force durant le test de 15 secondes. Une fois que l'état de la figure (c) est atteint, le débobineur atteint le régime permanent parce que la lecture de force qui s'en suit se répète périodiquement. Ceci est démontré par les images (d, e). Il est possible de constater l'amplitude du bras de levier durant la phase transitoire qui est largement supérieure à celle durant le régime permanent. Effectivement, il suffit que le bras de levier parcoure quelques degrés vers le bas pour enclencher le mécanisme de relâchement. Malgré cette faible rotation, la tension peut varier de 2.5 N jusqu'à 4 N pour la première période du test avec le db.CTT et de 1.0 N à 1.75 N avec le db.SFCA.

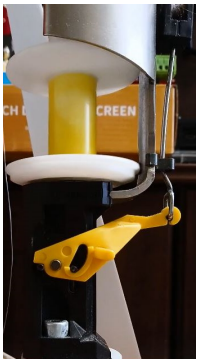
Chaque débobineur possède une réponse en force qui est unique à son design. La réponse du db.CTT semble posséder peu de bruit parce que les données brutes (en bleu) sont presque parfaitement superposées avec les données filtrées (en rouge). Par contraste, le db.SFCA possède plus de bruit parce qu'on peut apercevoir des données brutes (en bleu) qui sont beaucoup plus éloignées du signal filtré (en rouge). Ce genre de comportement sera analysé plus loin dans ce chapitre.

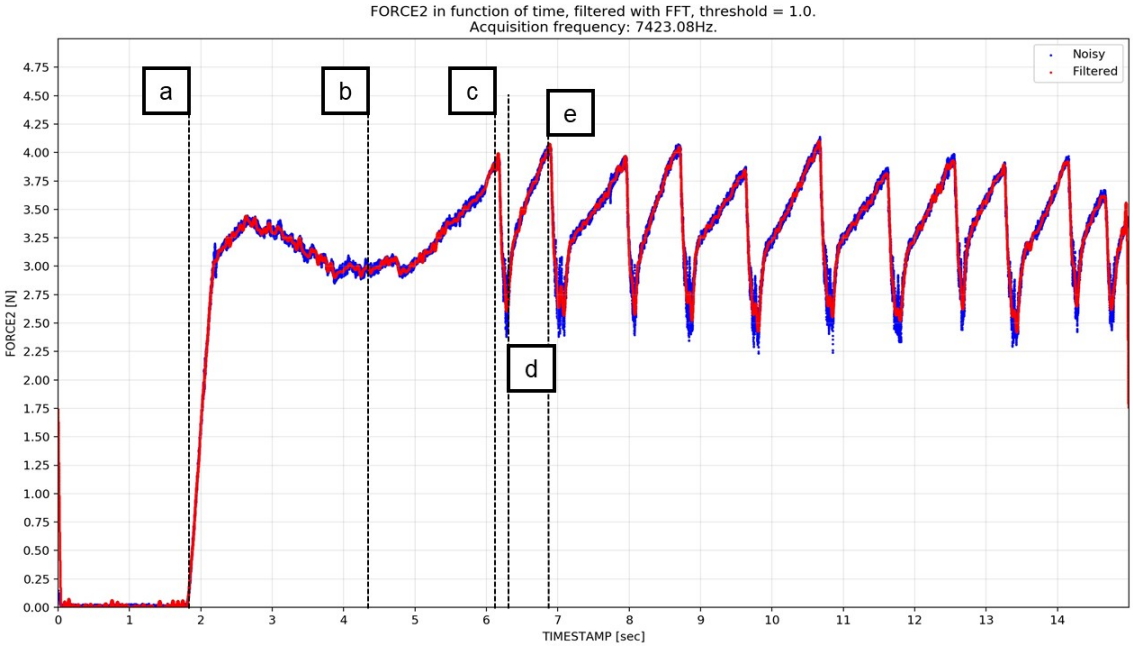
(a)


(b)


(c)

(d)


(e)



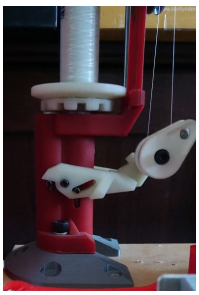
(f) Évolution de la force dans le fil lors d'un test de débobinage du db.CTT avec ressort CTT-425 à 25mm/s et fil de verre

Figure 3.9. Évolution de la force dans la phase transitoire (a, b, c) et dans la phase périodique (d, e) avec le changement du bras de levier du db.CTT, et mesure de la force (f) lors du test

(a)

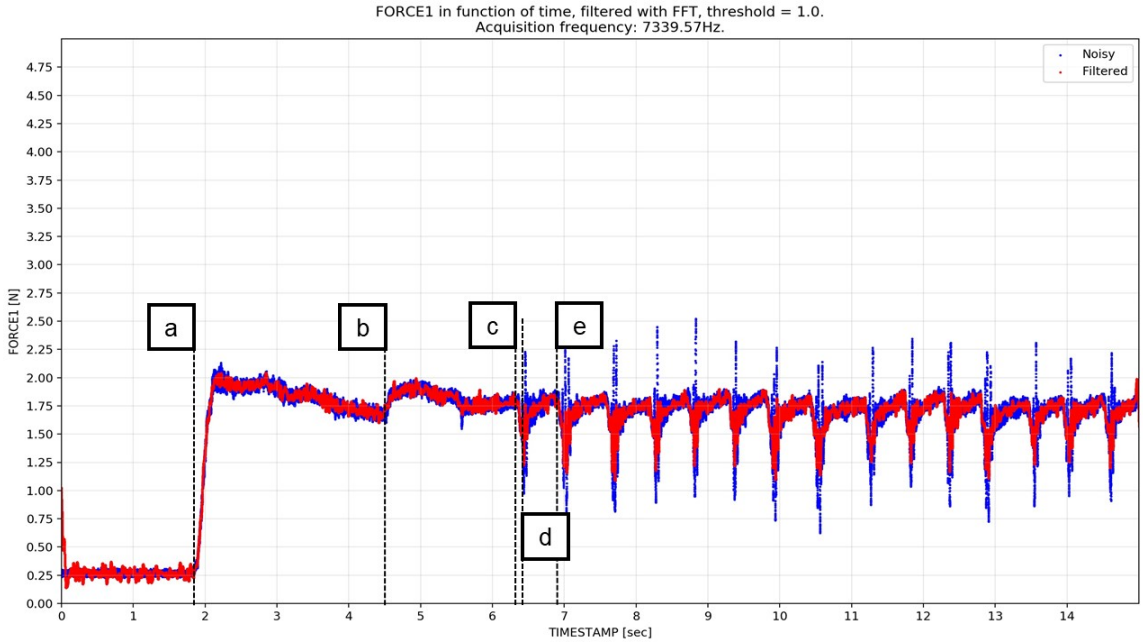
(b)

(c)



(d)

(e)



(f) Évolution de la force dans le fil lors d'un test de débobinage du db.SFCA avec ressort SFCA-369 à 25mm/s et fil de verre

Figure 3.10. Évolution de la force dans la phase transitoire (a, b, c) et dans la phase périodique (d, e) avec le changement du bras de levier du db.SFCA, et mesure de la force (f) lors du test

3.4.1 Visualisation des résultats

Les tests de caractérisation ont engendré une grande quantité de données et de graphiques pour les visualiser. Plus spécifiquement, 270 fichiers *.csv* ont été générés contenant chacun entre 100 000 et 113 000 données sous la structure [temps, force]. Cette sous-section décrit comment les données ont été présentées graphiquement pour en tirer les informations d'intérêt. Seulement quelques graphiques ont été choisis comme exemple de traitement des données. Il est possible de trouver tous les graphiques générés dans l'Annexe E.

Les Figures 3.11 et 3.12 sont composées de trois sous-graphiques (a, b et c). Ces images superposent les trois échantillons pour une vitesse de débobinage avec un type de ressort. On peut ainsi visualiser la variation de la force lors du débobinage pour une configuration. Il faut mentionner que les graphiques n'affichent pas les données brutes, mais plutôt les données filtrées avec un filtre médian sur 201 valeurs. Une courte évaluation de divers filtres a été effectuée avec divers paramètres de filtrage (tel que le nombre de données pour le calcul de chaque donnée filtrée), tels que le filtre Gaussien, le filtre moyen classique, et plusieurs filtres digitaux *FIR* (*Finite Impulse Response*). Suite à cette courte étude, le filtre médian sur 201 valeurs semblait offrir la meilleure visualisation des données. Une étude approfondie sur la sélection du filtre ne fait pas partie du cadre de ce projet de recherche. Le fait de traiter tous les tests avec la même configuration de filtre permet de les comparer sous les mêmes conditions.

Le sous-graphique *a)* présente l'évolution de la force pour chaque configuration durant le test de débobinage en entier (entre 0 et 15 secondes). On peut y voir les trois courbes qui correspondent à chacun des tests pour cette configuration. On peut également voir une ligne verticale à 5 secondes qui est tracée pour indiquer le début de la région considérée *en régime permanent*. L'analyse spectrale et tous les calculs statistiques sont effectués à partir de ce point, sur l'intervalle 5 à 15 secondes. Finalement, on peut y voir des lignes horizontales qui sont tracées pour illustrer la moyenne, ± l'écart-type ainsi que le minimum et maximum pour ces courbes en régime permanent. À côté de la ligne verticale à 5 secondes se retrouve une boite de texte décrivant la moyenne ± l'écart-type pour ce groupe d'échantillons.

Le sous-graphique *b)* présente la distribution de toutes les données brutes et filtrées pour la région en régime permanent (entre 5 et 15 secondes). Il y a approximativement 73 000 données (la fréquence d'acquisition peut varier entre 7200 Hz et 7400 Hz). La distribution des données permet de visualiser le minimum, la moyenne et le maximum. Une hypothèse sur la répartition des données assume une distribution normale, mais pour certains graphiques, la distribution des données n'est pas d'allure normale. Une analyse approfondie de l'allure des distributions ne fait pas partie du cadre du projet de recherche. Même si les distributions ne sont pas toujours normales, un écart-type a tout de même été calculé et utilisé pour des fins de comparaison entre les tests de caractérisation.

Finalement, le sous-graphique *c)* présente l'analyse spectrale qui a été effectuée sur les données filtrées en régime permanent (entre 5 et 15 secondes). Sur ces graphiques, la fréquence à 0 Hz n'est pas affichée. L'objectif de visualisation est d'identifier les zones de fréquences dominantes dans le comportement périodique des débobineurs mécaniques. L'affichage spectral a été effectué en utilisant des outils mathématiques calculant la transformée de fourrier [37] sur toutes les données filtrées en régime permanent.

Sur la Figure 3.11, il est possible de voir les résultats des trois échantillons utilisant le ressort SFCA-39 avec le db.SFCA pour une vitesse de 100 mm/sec avec fil de nylon. Dans le sous-graphique *a)*, il est possible de voir que la force moyenne mesurée est de 0.59 N et que cette moyenne est contenue à l'intérieur de l'intervalle [moyenne ± écart-type] qui correspond à [0.51, 0.66] N. Il est également possible de voir que la force maximale

atteint 0.81 N tandis que la force minimale est de 0.26 N. Il est également possible de voir plusieurs pics dans l'évolution de la force qui sont causés par des impacts dans le fil par le mécanisme de relâchement. Dans le sous-graphique *b)*, on constate que l'allure de la distribution semble très normale, alors les données sont réparties également en haut et en bas de la moyenne. Dans le sous-graphique *c)*, les régions fréquentielles dominantes sont entre 0 et 50 Hz avec plusieurs pics a 105, 160 et 250 Hz.

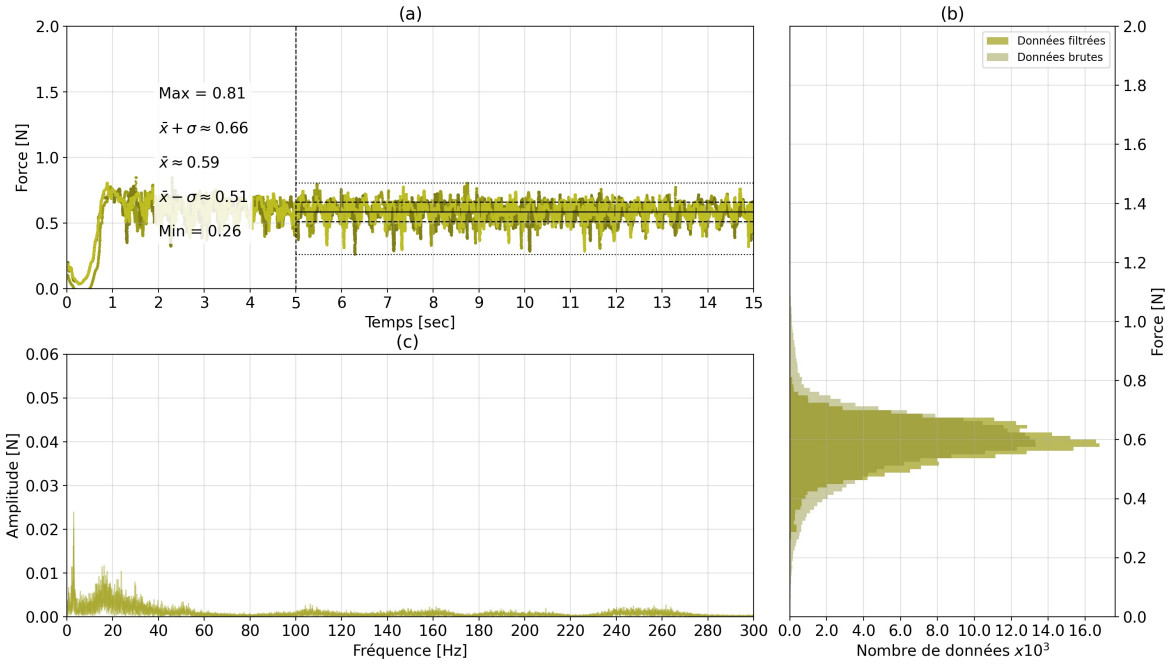


Figure 3.11. Tests avec ressort SFCA-39 à 100.0 mm/s, db.SFCA avec fil de nylon. Évolution de la force avec filtre médian (a), distribution des mesures brutes et filtrées (b), analyse spectrale sur les données filtrées entre 5 et 15 secondes (c).

Sur la Figure 3.12, il est possible de voir les résultats des trois échantillons utilisant le ressort CTT-425 avec le db.CTT pour une vitesse de 25 mm/sec avec fibre de verre. Dans le sous-graphique *a)*, la force moyenne mesurée est de 3.63 N et cette moyenne est contenue à l'intérieur de l'intervalle [moyenne ± écart-type] qui correspond à [3.13, 4.13] N. La force maximale atteint presque 4.46 N tandis que la force minimale est autour de 1.82 N. On peut constater les dents de scie dans l'évolution de la force qui sont causés par des impacts dans le fil par le mécanisme de relâchement. Dans le sous-graphique *b)*, on constate que l'allure de la distribution n'est pas normale, alors les données ne sont pas réparties également en haut et en bas de la moyenne. Dans le sous-graphique *c)*, les régions fréquentielles dominantes sont entre 0 et 20 Hz, avec plusieurs pics à 90, 140 et 190 Hz.

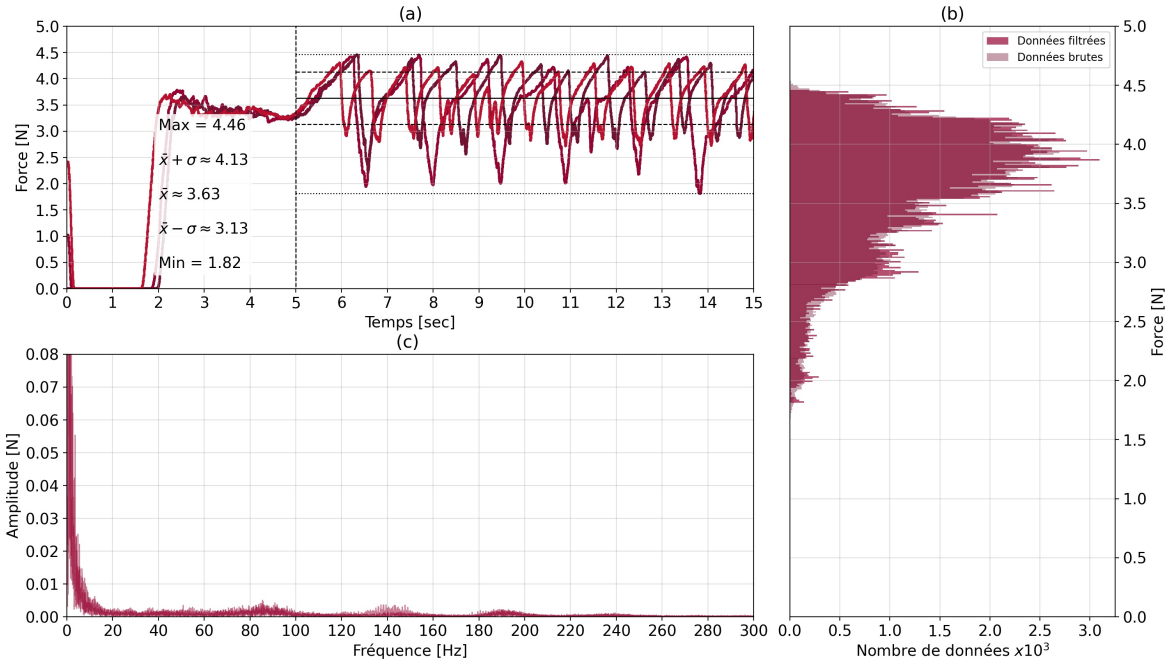


Figure 3.12. Tests avec ressort CTT-425 à 25.0 mm/s, db.CTT avec fibre de verre. Évolution de la force avec filtre médian (a), distribution des mesures brutes et filtrées (b), analyse spectrale sur les données filtrées entre 5 et 15 secondes (c).

Finalement, lors de certains tests, un phénomène oscillatoire pouvait se produire pendant le débobinage. La Figure 3.13 peut illustrer ce comportement parce que l'on observe des pics dans la lecture de force qui sont largement en haut de la force moyenne mesurée. Ce phénomène aléatoire survenait selon la vitesse de déroulement ainsi que la rigidité du ressort principal. Lors du déroulement à haute vitesse, la bobine de fil commence à tourner rapidement et la goupille du mécanisme de relâchement n'a pas toujours le temps de bloquer la rotation de cette bobine. Cela se produit lorsque le ressort utilisé possède une rigidité faible et donc il ne produit pas assez de force pour enclencher la goupille. Alors, la goupille frotte continuellement durant la rotation de la bobine, et cette rotation n'est jamais arrêtée par le mécanisme de relâchement. Lorsqu'un ressort rigide est utilisé, la force exercée sur la goupille est assez élevée pour que celle-ci bloque la rotation de la bobine. Lorsque la rotation de la bobine est bloquée, il se produit des oscillations d'une grande amplitude dans la force de tension du fil. Ce phénomène se produit aléatoirement lorsque la goupille est parfaitement alignée avec les trous de la bobine. Le vidéo YouTube suivant présente ce phénomène en détail `https://youtu.be/rbnXGFDRUkI`.

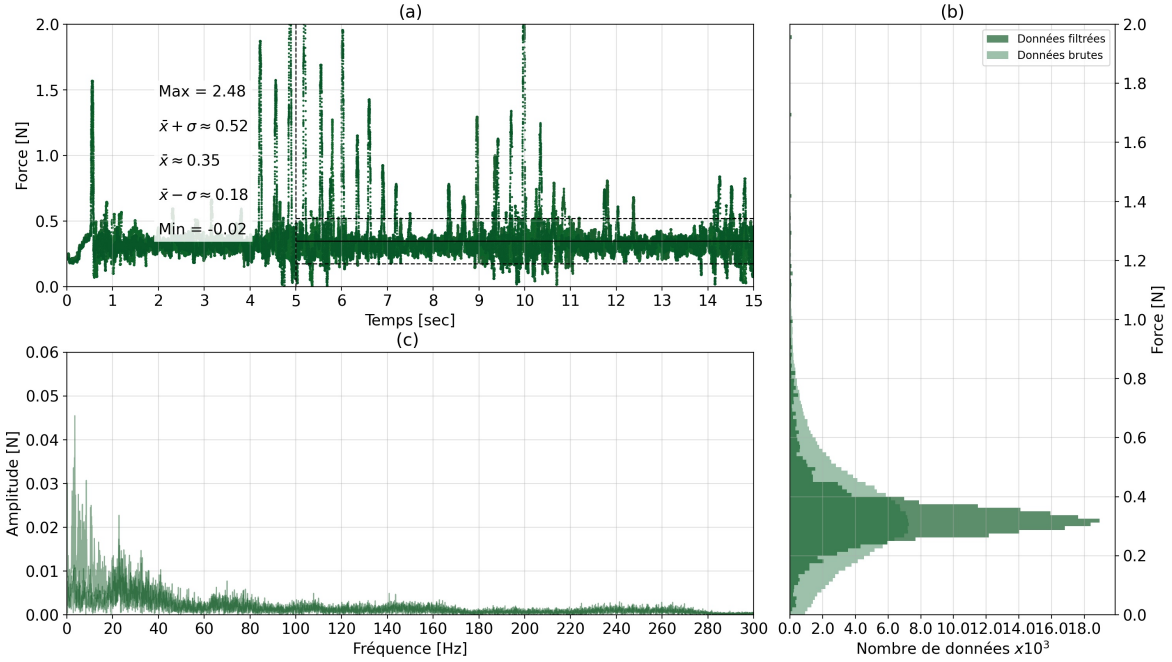


Figure 3.13. Tests avec ressort SFCA-7 à 250.0 mm/s, db.SFCA avec fibre de verre. Évolution de la force avec filtre médian (a), distribution des mesures brutes et filtrées (b), analyse spectrale sur les données filtrées entre 5 et 15 secondes (c).

3.4.2 Test avec chargement oscillatoire

Pour pouvoir conclure sur les performances entre les débobineurs traditionnels et le débobineur actif, un test avec chargement oscillatoire a été effectué. Puisque le comportement des deux débobineurs est identique pour ce type de tests, uniquement le db.SFCA avec fil de nylon a été utilisé. Si jugés pertinents, plus de tests oscillatoires pourraient être réalisés lors de travaux futurs. Il y a trois types de tests oscillatoires qui sont effectués. Le premier requiert du banc de tests de générer un débobinage à 100 mm/s superposé avec des oscillations sinusoïdales avec une amplitude de 100 mm et une vitesse angulaire de 10 degrés par seconde. Le second requiert du banc de tests de générer le même chargement, mais avec une vitesse angulaire de 45 degrés par seconde pour les oscillations. Le troisième requiert de générer uniquement des oscillations sinusoïdales rapides avec une amplitude de 100 mm et une vitesse angulaire de 45 degrés par seconde. Les Figures 3.14 à 3.16 présentent les résultats de tests pour ces chargements oscillatoires. Les graphiques du haut montrent la longueur de fil embobiné par le banc de tests tandis que les graphiques du bas montrent la variation de la tension dans le fil durant le test pour chacun des ressorts.

On peut constater que le db.SFCA engendre une baisse dans la force dans le fil au moment où la longueur débobinée atteint un “plat”. Sur le graphique avec des oscillations rapides, on constate qu’elles engendrent une réaction du db.SFCA qui cause des forces d’impact. Sur le graphique avec les oscillations stationnaires, le bras de levier du débobineur mécanique a été parti à son point mort haut avant chaque test. Cela signifie que lorsque le test de débobinage commence, le moteur du banc de tests déroule le fil de nylon jusqu’à ce que l’amplitude du chargement atteint 100 mm (approximativement). Pendant ce débobinage, le mécanisme de relâchement permet à la bobine de libérer du fil. Par la suite, lorsque le banc de tests relâche le fil (la

longueur du fil passe de 100 mm à 0 mm), le bras de levier du débobineur rattrape l'excédent de fil, mais la force de tension diminue. Ce comportement est normal, c'est ce qui est attendu de la part d'un débobineur mécanique. Ainsi, on peut constater que la force mesurée atteint presque 0 N parce que le bras de levier du débobineur atteint presque son point mort bas. On constate qu'il arrive souvent que la force dans le fil arrive proche de zéro, ce qui signifie que le débobineur a rattrapé le maximum de fil possible. Au-delà de ce point, le fil ne serait plus tendu.

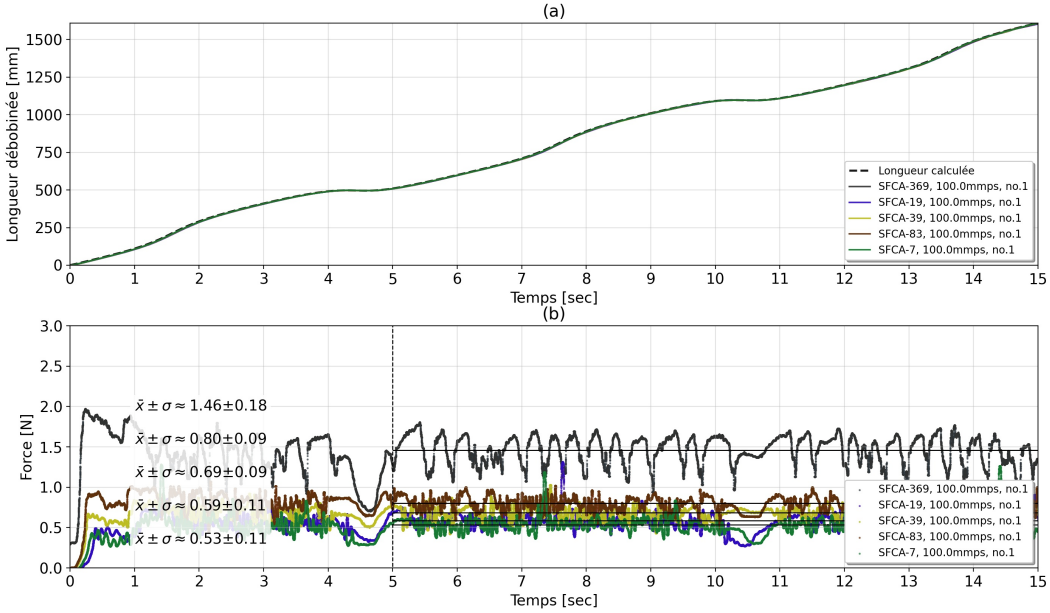


Figure 3.14. Tous les ressorts du db.SFCA avec fil de nylon, un échantillon par consigne face à un chargement oscillatoire lent. Longueur de fil débobiné (a) et variation dans la tension du fil pendant le débobinage (b).

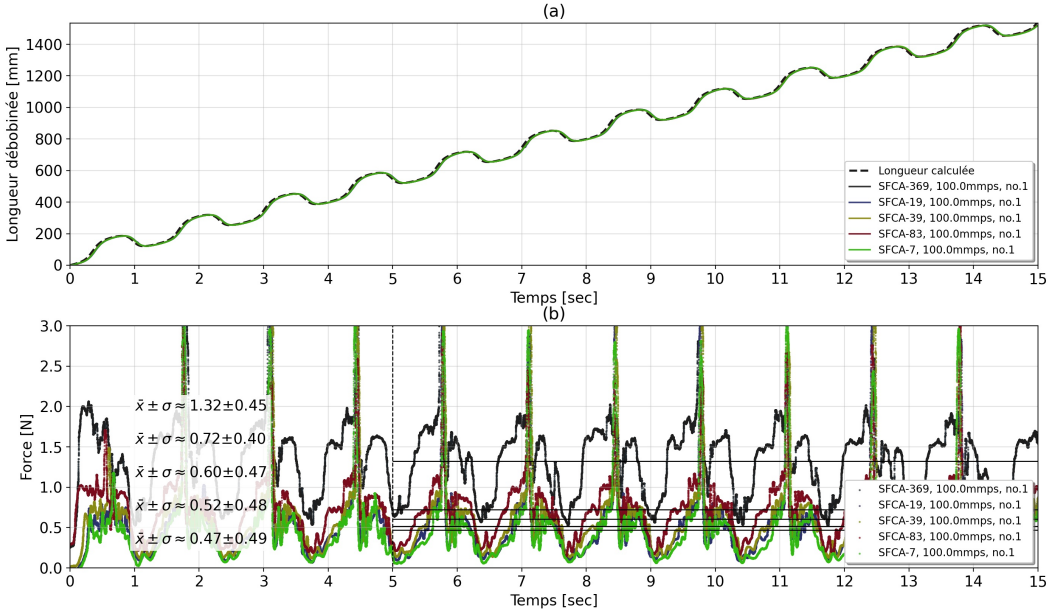


Figure 3.15. Tous les ressorts du db.SFCA avec fil de nylon, un échantillon par consigne face à un chargement oscillatoire rapide. Longueur de fil débobiné (a) et variation dans la tension du fil pendant le débobinage (b).

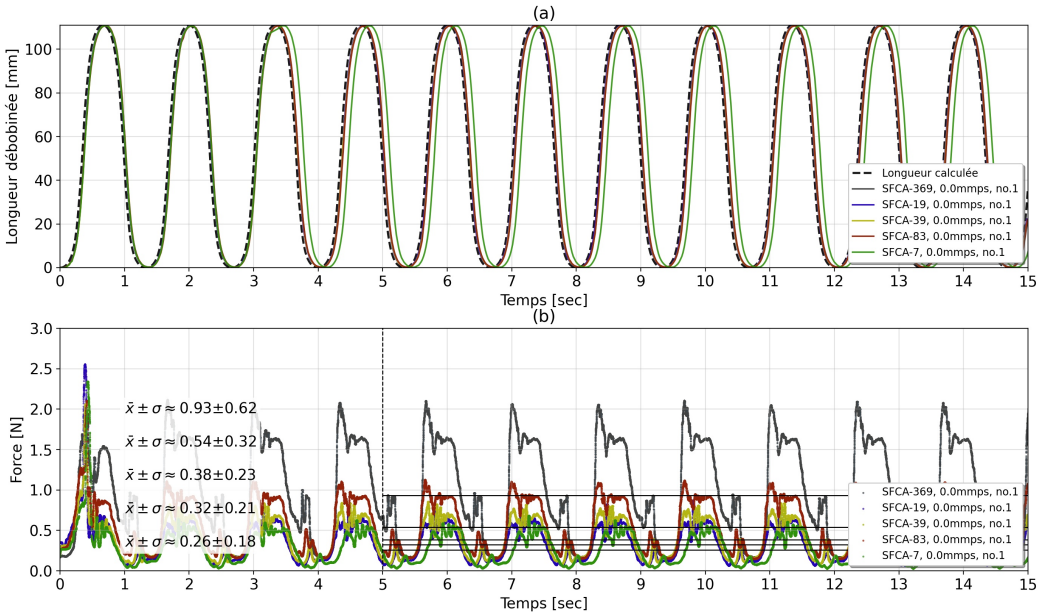


Figure 3.16. Tous les ressorts du db.SFCA avec fil de nylon, un échantillon par consigne face à un chargement oscillatoire stationnaire. Longueur de fil débobiné (a) et variation dans la tension du fil pendant le débobinage (b).

3.5 Analyse des résultats

Cette section présente en premier lieu les statistiques obtenues suite aux tests de caractérisation. Ensuite, une analyse est effectuée sur les différents paramètres qui influencent la tension dans le fil pendant le débobinage.

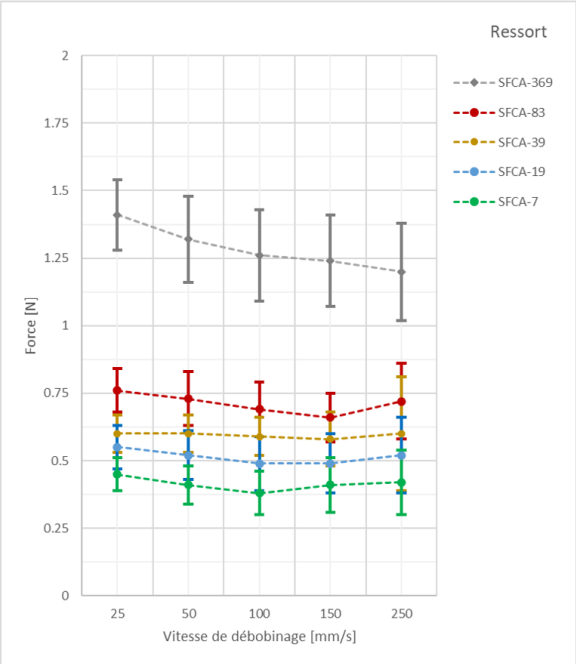
3.5.1 Résultats des statistiques de caractérisation

Tous les échantillons ont subi une analyse sur leur moyenne, leur écart-type (en supposant une distribution normale) et leur écart entre la force minimale et maximale. Ces calculs ont été faits sur le régime permanent entre 5 et 15 secondes pour chaque test. Les tableaux sommaires des résultats sont présentés dans l'Annexe F. À partir de ces données, la moyenne ainsi que l'écart-type pour chacun des paliers de vitesse et pour chacun des ressorts sont affichés.

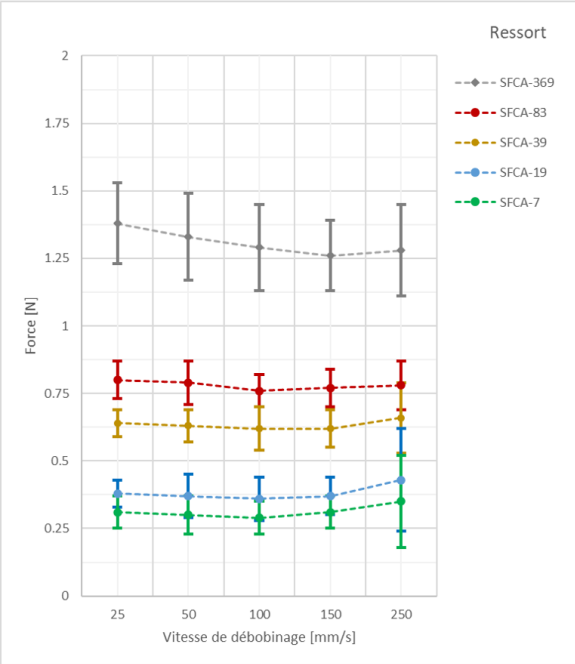
Sur la Figure 3.17 on peut apercevoir graphiquement les résultats présentés dans les tableaux de résultats. Pour chacun des paliers de vitesse de débobinage sont affichés la force moyenne ainsi que l'écart-type. La Figure 3.17a montre l'évolution de la moyenne et de l'écart-type pour le db.SFCA avec fil de nylon et la Figure 3.17b pour la fibre de verre. La Figure 3.17c montre les mêmes paramètres pour le db.CTT avec le fil de nylon et la Figure 3.17d pour la fibre de verre.

Pour le db.SFCA avec fil de nylon, le ressort SFCA-369 produit une force moyenne qui a tendance à diminuer lorsque la vitesse de débobinage augmente : la tension passe d'environ 1.4 N (pour 25 mm/s) à environ 1.2 N (pour 250 mm/s). Les autres ressorts ne subissent pas un changement significatif dans la force moyenne produite. De plus, l'écart-type augmente significativement uniquement pour une vitesse de débobinage de 250 mm/s. En ce qui concerne la caractérisation avec la fibre de verre pour le db.SFCA, on remarque également que l'écart-type augmente significativement à haute vitesse, mais uniquement pour les ressorts SFCA-7, SFCA-19 et SFCA-39. Comme mentionné précédemment, parfois le débobineur entrait dans un régime oscillatoire aléatoirement à haute vitesse (vidéo YouTube : `https://youtu.be/rbnXGFDRUkI`). Avec le fil de verre, les oscillations pouvaient commencer à partir de 100 mm/s et avec le fil de nylon, à partir de 250 mm/s. Le module de rigidité du matériau est étroitement lié à ce phénomène, ce qui peut expliquer la différence entre le fil de nylon et la fibre de verre. Ce phénomène se traduit par une augmentation significative de l'écart-type et de l'écart entre la force minimale et maximale. Les oscillations sont des vibrations d'amplitude grandissante dans le matériau, ce qui peut l'user de manière prématurée. L'étude de ce phénomène aléatoire pourrait faire partie du cadre de travaux futurs.

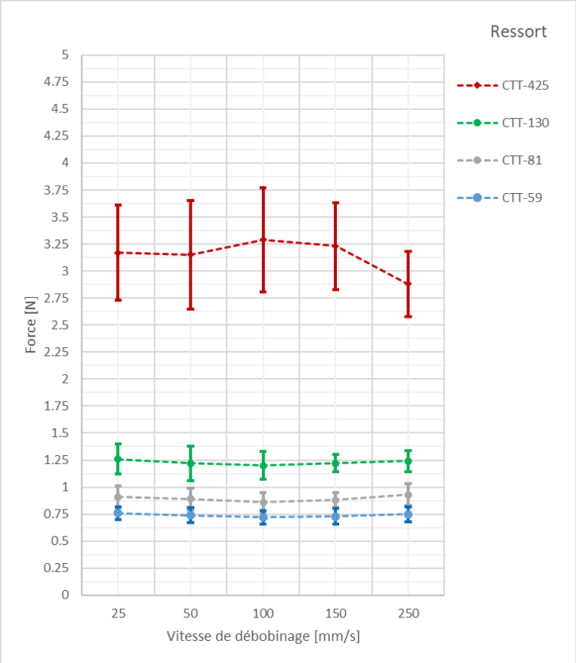
Pour le db.CTT avec le fil de nylon, on peut constater que le ressort CTT-425 produit une force moyenne qui diminue significativement à 250 mm/s tandis que les autres ressorts produisent une force moyenne constante. De plus, l'écart-type pour les autres ressorts est presque toujours constant alors le comportement de ces configurations semble être indépendant du type de matériau débobiné. Avec la fibre de verre, on remarque que la force moyenne ainsi que l'écart-type augmentent significativement lorsque la vitesse de débobinage augmente pour les ressorts CTT-59, CTT-81 et CTT-130. Durant les tests de caractérisation, il était possible de voir le débobineur entrer dans un mode oscillatoire pour les ressorts les moins rigides lorsque la vitesse de débobinage augmentait avec la fibre de verre. Ces oscillations peuvent encore une fois être expliquées par la différence du matériau utilisé. Ce phénomène pourrait être étudié lors de travaux futurs.



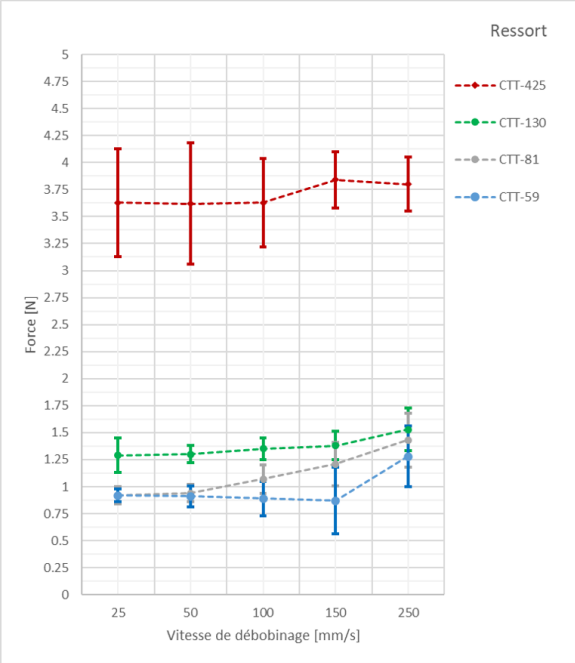
(a) db.SFCA avec fil de nylon



(b) db.SFCA avec fibre de verre



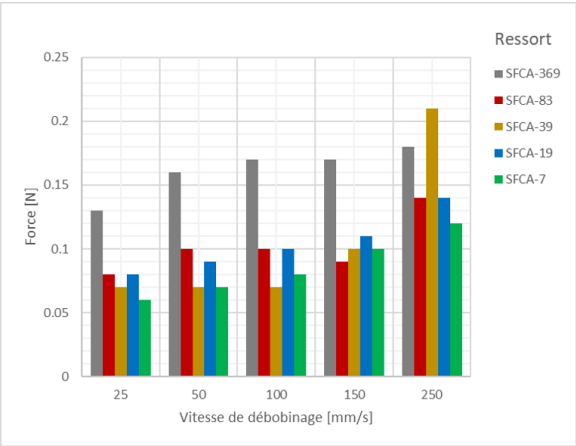
(c) db.CTT avec fil de nylon



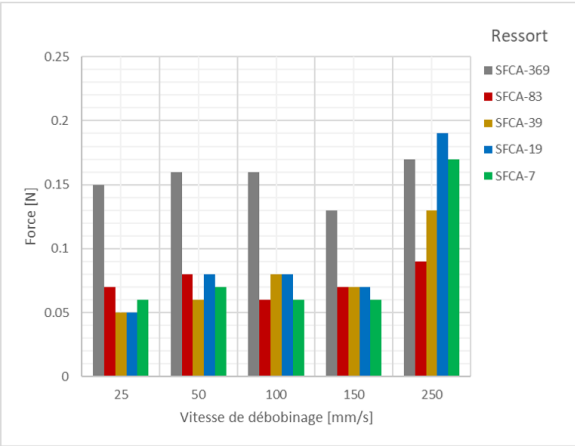
(d) db.CTT avec fibre de verre

Figure 3.17. Sommaire de la moyenne avec écart-type des tests de caractérisation

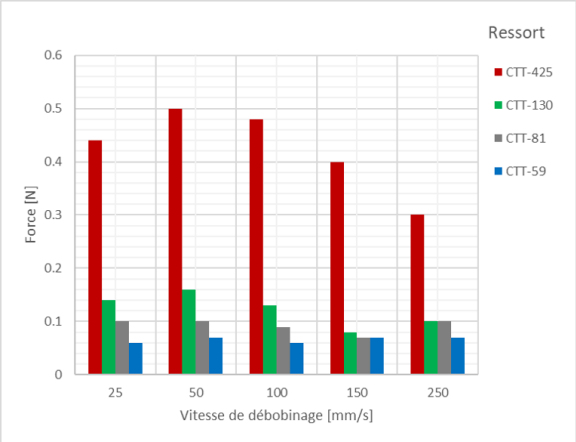
Sur la Figure 3.18 on peut apercevoir l'évolution de l'écart-type pour chacun des palier de vitesse de débobinage. La Figure 3.18a montre l'évolution de l'écart-type pour le db.SFCA avec fil de nylon et la Figure 3.18b pour la fibre de verre. La Figure 3.18c montre la même évolution, mais pour le db.CTT avec le fil de nylon et la Figure 3.18d pour la fibre de verre. On peut observer que l'écart-type a tendance à augmenter pour le db.SFCA lorsque la vitesse de débobinage augmente. L'écart-type passe de la plage [0.06, 0.13] N pour 25 mm/s à [0.12, 0.21] N pour 250 mm/s avec le nylon. Pour la fibre de verre, l'écart-type passe de [0.05, 0.15] N pour 25 mm/s à [0.09, 0.19] N pour 250 mm/s. Le db.CTT possède un comportement différent parce que pour le fil de nylon, le ressort CTT-425 possède un écart-type qui diminue alors que les autres ressorts engendrent un écart-type relativement constant. Pour la fibre de verre, l'écart-type du ressort CTT-425 diminue significativement avec la vitesse de débobinage — de 0.5 N à 0.25 N — alors que pour les autres ressorts, l'effet inverse se produit — de 0.05 N jusqu'à 0.28 N.



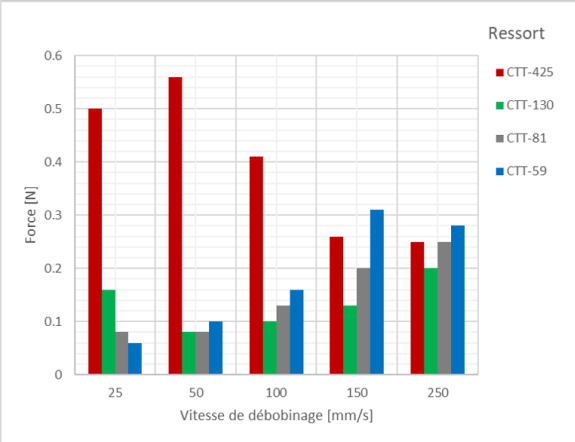
(a) db.SFCA avec fil de nylon



(b) db.SFCA avec fibre de verre



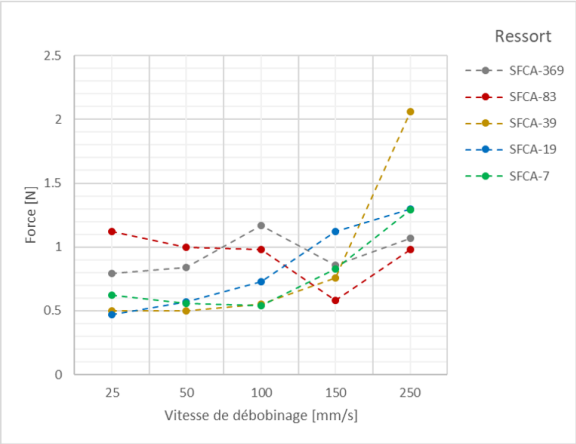
(c) db.CTT avec fil de nylon



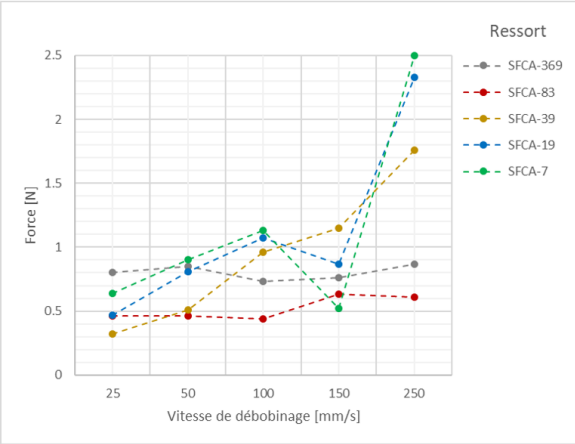
(d) db.CTT avec fibre de verre

Figure 3.18. Sommaire de l'évolution de l'écart-type des tests de caractérisation

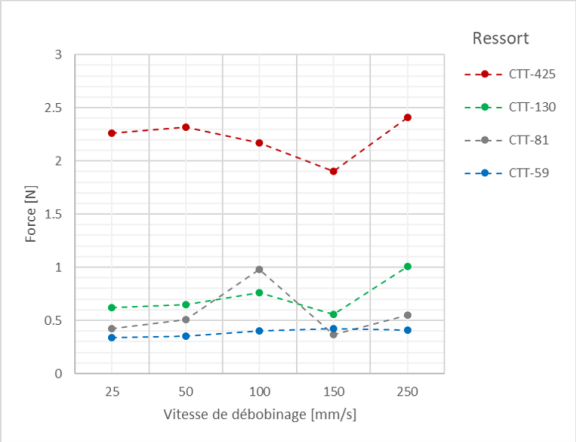
Sur la Figure 3.19 on peut apercevoir l'évolution de l'écart entre la force maximale et minimale pour chacun des paliers de vitesse de débobinage. La Figure 3.19a montre l'évolution pour le db.SFCA avec fil de nylon et la Figure 3.19b pour la fibre de verre. La Figure 3.19c montre la même évolution, mais pour le db.CTT avec le fil de nylon et la Figure 3.19d pour la fibre de verre. On peut constater pour le db.SFCA que l'écart entre la force minimale et maximale augmente significativement à 250 mm/s pour les deux matériaux. La plage d'écarts passe d'environs [0.3, 1.1] N à [0.6, 2.5] N. Pour le db.CTT avec le fil de nylon, l'écart des forces ne semble pas avoir une quelconque tendance. La plage de mesures se trouve entre 0.3 N et 2.4 N. Toutefois, avec la fibre de verre, l'écart diminue significativement pour le ressort CTT-425 avec l'augmentation de la vitesse parce qu'il passe de 2.6 N à 1.6 N. Avec les autres ressorts, cet écart augmente significativement de la plage [0.4, 0.6] N pour 25 mm/s à [1.3, 2.0] N pour 250 mm/s.



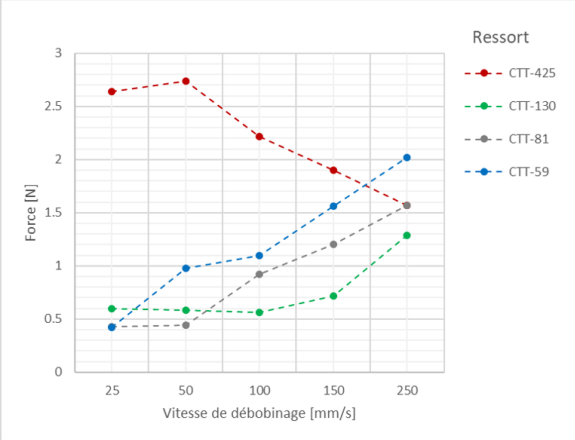
(a) db.SFCA avec fil de nylon



(b) db.SFCA avec fibre de verre



(c) db.CTT avec fil de nylon



(d) db.CTT avec fibre de verre

Figure 3.19. Sommaire de l'écart entre la force minimale et maximale des tests de caractérisation

3.5.2 Influence des divers paramètres lors du débobinage

Quatre paramètres ont été varié dans le cadre des tests de caractérisation : le type de débobineur, la rigidité du ressort principal, la vitesse de débobinage et le matériau du fil. En observant la Figure 3.17, on remarque que le choix des différents ressorts affecte la force moyenne obtenue — les ressorts les plus rigides produisent une force moyenne supérieure aux ressorts les moins rigides. Cette conclusion s'applique aux deux débobineurs étudiés. En ce qui concerne les autres paramètres, il n'y a pas d'effets clairs qui peuvent être conclus avec les graphiques précédents compte tenu du phénomène d'oscillations aléatoires qui pouvait se produire pendant le débobinage. Ainsi, les graphiques de résultats ne permettent pas d'établir des relations claires entre le matériau du fil, le type de débobineur et la vitesse de déroulement sur l'écart-type et l'écart entre la force minimale et maximale.

3.6 Conclusions sur la caractérisation des débobineurs mécaniques

Ce chapitre a traité sur le fonctionnement des débobineurs mécaniques, le banc de tests qui est utilisé pour effectuer la caractérisation des débobineurs mécaniques et sur l'analyse des données. Le banc de tests qui a été développé permet d'ouvrir les portes pour une multitude de travaux futurs dans la caractérisation de divers paramètres de débobinage. La méthodologie pour les tests de caractérisation a été présentée et par la suite les tests de caractérisation ont été faits. Dans la section sur l'analyse de données, des différences majeures ont été identifiées entre le db.SFCA et le db.CTT ainsi qu'entre le fil de nylon et la fibre de verre. Un phénomène oscillatoire aléatoire a ressurgi à travers les tests de caractérisation et ce phénomène a été identifié comme étant indésirable. Le db.SFCA engendre une force moyenne entre 0.25 N et 1.5 N avec un écart-type variant entre 0.05 N et 0.3 N. Le db.CTT engendre une force moyenne entre 0.5 N et 4.5 N avec un écart-type variant entre 0.06 N et 0.43 N. Le db.SFCA produisait une tension qui pouvait avoir un écart de 0.5 N jusqu'à 2.5 N et le db.CTT de 0.3 N à 2.7 N. Suite à l'analyse des données, il est possible d'avoir une meilleure idée des performances que les débobineurs mécaniques offrent durant un tressage, et il est maintenant possible de se servir de ces données comme référence pour la réalisation du prochain objectif de recherche qui consiste à développer un débobineur actif. À travers cette analyse, on a pu constater que la tension dans le fil durant le débobinage dépend des quatre paramètres étudiés : le type de débobineur, la rigidité du ressort, la vitesse de débobinage et le matériau du fil. Toute l'infrastructure présentée dans ce chapitre sera également utilisée lors du dernier objectif de recherche : caractérisation du débobineur actif. Pour finir, le premier objectif de recherche a été atteint parce qu'il a été possible de quantifier les performances des débobineurs traditionnels en utilisant la moyenne, l'écart-type ainsi que l'écart entre la force minimale et maximale dans le fil.

CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT DU DÉBOBINEUR ACTIF

Ce chapitre traite du second objectif de recherche, soit la conception d'un débobineur actif. La méthodologie de design qui a été adoptée pour le prototype d'un débobineur actif est présentée. Ensuite, les sujets abordés sont l'identification des besoins du client, l'identification des spécifications techniques, la génération de concepts, le processus de sélection du concept final et la présentation du concept final. Finalement, une revue sur le concept final est faite pour valider chacun des requis techniques.

4.1 Méthodologie de conception adaptée

La méthode de conception présentée par Karl T. Ulrigh et Steven D. Eppinger dans leur ouvrage *Product Design and Development* [39] a été adoptée. L'objectif de cette méthode de design est de produire un prototype fonctionnel de débobineur actif qui doit avoir des performances à un niveau équivalent ou meilleur que les débobineurs traditionnels. Puisque ce projet de recherche consiste à fabriquer un prototype, un bon nombre de décisions techniques ont été prises basées non pas sur les performances, mais plutôt sur la simplicité de l'intégration des composantes et sur la réduction des coûts matériels. La liste ci-dessous présente les étapes principales qui seront réalisées dans le but de développer un débobineur actif.

- Identification des besoins du client
  - Identification du client et organisation des besoins selon une hiérarchie d'importance
- Spécifications techniques
  - Identification de fonctions principales, complémentaires et contraintes de conception
  - Identification d'une métrique quantitative pour chacune des fonctions
- Génération de concepts
  - Division du produit en sous-systèmes
- Sélection du concept final
  - Élimination de concepts selon des critères de sélection

Le processus de développement débute avec l'identification des besoins du client. Ces besoins sont ensuite traduits par des spécifications techniques. Les diverses spécifications techniques peuvent être comblées par plusieurs solutions techniques, ce qui mène à une génération de concepts. Tous ces concepts sont par la suite comparés entre eux pour éliminer les solutions techniques les moins bonnes et ainsi faire ressortir la solution finale.

4.2 Identification des besoins du client

L'identification des besoins du client est présentée dans les quatre sous-sections suivantes.

4.2.1 Collecte d'informations du client

Le client peut être divisé en deux entités distinctes : le directeur de recherche, Louis Laberge-Lebel, qui connaît les besoins de l'industrie et l'opérateur. Dans le cadre de ce projet de recherche, les besoins de l'industrie

ont été établis suite à des entrevues avec le directeur de recherche, Louis Laberge-Lebel. Le client dénommé *opérateur* peut être considéré comme toute personne (présente ou future) qui aura à manipuler le prototype. Cette clarification est nécessaire parce plusieurs besoins ont été identifiés pour satisfaire l'opérateur. La collecte d'informations du client consiste en la création d'un tableau qui regroupe des phrases descriptives du client et à une interprétation technique de ce besoin. Dans l'Annexe G se trouve un tableau sommaire de toutes les interactions lors d'entrevues avec le client.

4.2.2 Interprétation des commentaires du client

À partir du Tableau G.1, il est possible d'interpréter les commentaires du client pour généraliser les besoins sur la liste suivante. Il ne s'agit pas des fonctions de la solution finale, mais uniquement d'une interprétation des besoins suite aux entrevues avec le client.

- Le débobineur doit avoir une empreinte de surface pour ne pas entrer en collision avec d'autres débobineurs lors du tressage sur la machine du LabSFCA.
- Le débobineur doit pouvoir ajuster la tension dans le fil durant le tressage.
- Le débobineur doit réduire le plus possible les forces de frottement durant le débobinage.
- Le débobineur doit être compatible avec la machine d'embobinage du fil brut.
- Le débobineur doit garder le fil tendu durant le tressage, peu importe les variations de longueur de fil durant le tressage.
- Le débobineur doit résister aux changements de direction brusques lors du tressage maypole.
- Le débobineur doit être simple d'entretien et facile à assembler par un opérateur.
- Le débobineur doit avoir une autonomie d'au moins 6 heures.
- Il doit être possible de commander simultanément plusieurs débobineurs actifs.
- Le débobineur doit pouvoir rembobiner une grande quantité de fil pendant le tressage.
- Le débobineur doit pouvoir tresser différentes rigidités de matériel (du multifilamentaire flexible à section reconfigurable jusqu'au ruban pré-imprégné rigide à section rectangulaire).
- Le débobineur doit pouvoir être commandé en temps réel.
- Le débobineur doit posséder un système de collecte de diverses données.

4.2.3 Organisation hiérarchisée des besoins du client et attribution d'une importance relative

On peut maintenant créer des sous-groupes pour organiser les divers besoins identifiés précédemment et leur attribuer un critère d'importance. Ce critère d'importance est relatif entre les divers besoins. L'objectif est de faire ressortir les besoins essentiels et par contraste, détecter les besoins secondaires. Dans le Tableau 4.1 suivant, cette hiérarchisation des besoins du client est présentée. Le critère d'importance se quantifie par * si le besoin est peu important et par *** si le besoin est très important. De plus, les besoins qui ne sont pas nécessaires dans le projet de recherche sont dénotés par 0. Il faut remarquer qu'il y a des besoins supplémentaires dans le Tableau 4.1 qui n'ont pas été préalablement identifiés dans le Tableau G.1. Chacun des besoins possède un numéro qui sera référé dans la section sur les spécifications du produit.

Tableau 4.1 Hiérarchisation des besoins du client

Catégorie	No.	Besoin	Importance
Géométrie et structure	1	Occuper une petite empreinte de surface (*footprint*)	***
	2	Doit être facile à fabriquer	***
	3	Être peu dispendieux à prototyper	***
	4	Avoir peu de frottement avec le fil	**
	5	Être léger	*
	6	Pouvoir tresser du ruban thermoplastique	0
	7	Résister aux changements de direction brusques du tressage maypole	0
Contrôle du fil	8	Débobiner une multitude de matériaux différents	***
	9	Maintenir le fil tendu en tout temps	***
	10	Contrôler la force dans le fil durant le tressage	***
	11	Rembobiner le fil	***
	12	Détecter des anomalies lors du débobinage	*
	13	Embobiner du fil brut en préparation pour le tressage	*
Fonctionnalités diverses	14	Contrôler le débobineur à distance	***
	15	Modifier la tension dans le fil en temps réel	**
	16	Commander simultanément plusieurs débobineurs	*
	17	Générer une collecte de données durant le tressage	*
	18	Avoir une autonomie suffisante pour un tressage complet	0
Maintenance et sécurité	19	Intervention rapide de l'opérateur en cas de problèmes	***
	20	Manipuler en sécurité par l'opérateur	**
	21	Rapide à assembler et à désassembler	*
	22	Réagir de manière sécuritaire en cas de problèmes	*
	23	Doit être facile et intuitif à utiliser par un opérateur	0

4.2.4 Attribution d'une importance relative des besoins

L'importance relative du Tableau 4.1 a été validée avec le client, Louis Laberge-Lebel. Puisque l'objectif de recherche est de produire un prototype de débobineur actif, plusieurs besoins qui sont présents ne seront pas validés par la solution finale (tels que le tressage de ruban thermoplastique, la résistance aux changements de direction brusques lors du tressage maypole, l'autonomie suffisante pour un tressage complet et la facilité/intuitivité d'utilisation par un opérateur). Ces besoins ne seront pas validés parce que dans le cadre de ce projet de recherche, le débobineur actif ne sera pas testé sur la machine de tressage du LabSFCA.

4.3 Spécifications techniques du produit

Le livre de référence, *Product Design and Development* [39], présente une méthodologie pour l'identification des spécifications techniques du produit. Une méthodologie, inspirée du livre de référence, a été mise au point. La mise au point des spécifications techniques est présentée par les quatre sous-sections suivantes.

4.3.1 Identification de métriques

Tout d'abord, il faut identifier des métriques pour quantifier chacun des besoins du client. Le Tableau 4.2 présente plusieurs métriques identifiées sur les débobineurs mécaniques et sur le débobineur actif. Chaque

métrique possède un numéro unique et peut être liée à plusieurs besoins. Une cote d'importance de 1 (peu important) à 5 (très important) a été attribuée à chacune des métriques. Des unités de mesure ont également été assignés aux métriques pour permettre de les quantifier. On peut constater que chacun des besoins du client est comblé par une métrique et que chacune des métriques est quantifiée par une unité de mesure.

Tableau 4.2 Liste de métriques pour le débobineur actif

No. métrique	No. besoin	Métrique	Importance	Unités
1	1	Rayon du cylindre le plus petit pouvant contenir le débobineur debout	5	mm
2	1	Hauteur	2	mm
3	2, 21	Délais de fabrication	4	Jours
4	3	Coût de fabrication (ou d'achat)	4	$ CAD
5	4	Surfaces de frottement avec le fil	3	Nombre
6	5	Masse totale à vide	4	kg
7	6	Orientation de la bobine	4	Horizontal ou Vertical
8	1,6	Largeur de la bobine	2	mm
9	7	Résistance en fatigue lors du fonctionnement dans une tresseuse	3	Cycles avant défaillance
10	8	Compatibilité avec divers matériaux	4	Liste de matériaux
11	9,10,11	Force de tension dans le fil	5	N
12	9,10,11	Écart-type de la force de tension	5	N
13	9,11,13	Longueur rembobinée	5	mm
14	12,22	Détection de défaillance	3	Indicateur booléen
15	14,15,16	Interventions physiques par l'opérateur sur le débobineur lors du tressage	5	Nombre
16	15,16	Temps requis pour modifier la tension	5	secondes
17	17	Système d'acquisition de données	3	Liste de paramètres
18	18	Autonomie de tressage	4	secondes
19	5,13,18	Quantité de fil sur la bobine	4	mm^3
20	19	Temps requis à l'opérateur pour sécuriser le débobineur	5	secondes
21	20,23	Guide d'utilisation du débobineur	2	Liste d'étapes
22	21	Temps requis pour assembler et démonter le débobineur	2	secondes
23	22	Protocole informatisé de gestion de problèmes	3	Liste de situations

4.3.2 Étude des produits compétiteurs

Ayant identifié les métriques les plus importantes, il est maintenant possible d'étudier les produits compétiteurs et de quantifier leurs performances. Dans le cadre de ce projet de recherche, les produits compétiteurs

sont le débobineur A03 (dénommé db.SFCA) et le débobineur Herzog (dénommé db.CTT). Ces débobineurs ont été sujet d'étude lors du chapitre précédent. Le Tableau 4.3 présente une quantification des débobineurs compétiteurs selon la liste de métriques établie. On peut remarquer que plusieurs métriques ne sont pas quantifiables (dénommés par N/D). Il s'agit de métriques qui ne s'appliquent pas aux débobineurs mécaniques, mais qui s'appliquent au débobineur actif que l'on devra concevoir. Ces métriques peuvent faire ressortir l'aspect novateur du débobineur actif.

Tableau 4.3 Comparaison des métriques pour les débobineurs mécaniques

No. métrique	**No. besoin**	**Métrique**	**Importance**	**Unités**	**db.SFCA**	**db.CTT**
1	1	Rayon du cylindre le plus petit pouvant contenir le débobineur debout	5	mm	100	80
2	1	Hauteur	2	mm	228	330
3	2, 21	Délais de fabrication	4	Jours	N/D	N/D
4	3	Coût de fabrication (ou d'achat)	4	$ CAD	< 30	N/D
5	4	Surfaces de frottement avec le fil	3	Nombre	1	4
6	5	Masse totale à vide	4	kg	0.415	0.468
7	6	Orientation de la bobine	4	Horizontale ou Verticale	Verticale	Verticale
8	1,6	Largeur de la bobine	2	mm	93	130
9	7	Résistance en fatigue lors d'oscillations	3	Cycles avant défaillance	N/D	N/D
10	8	Compatibilité avec divers matériaux	4	Liste de matériaux	Tout filament possible	Tout filament possible
11	9,10,11	Force de tension dans le fil	5	N	0.25 à 1.5	0.5 à 4.5
12	9,10,11	Écart-type de la force de tension	5	N	0.05 à 0.3	0.06 à 0.43
13	9,11,13	Longueur rembobinée	5	mm	100	100
14	12,22	Détection de défaillance	3	Indicateur booléen	N/D	N/D
15	14,15,16	Interventions physiques par l'opérateur sur le débobineur lors du tressage	5	Nombre	8	8
16	15,16	Temps requis pour modifier la tension	5	secondes	15 à 30	15 à 30
17	17	Système d'acquisition de données	3	Liste de paramètres	N/D	N/D
18	18	Autonomie de tressage	4	heures	N/D	N/D
19	5,13,18	Quantité de fil sur la bobine	4	mm^3	387415	513776
20	19	Temps requis à l'opérateur pour sécuriser le débobineur	5	secondes	30 à 60	30 à 60
21	20,23	Guide d'utilisation du débobineur	2	Liste d'étapes	Document interne du LabSFCA	N/D
22	21	Temps requis pour assembler et démonter le débobineur	2	minutes	55	55
23	22	Protocole informatisé de gestion de problèmes	3	Liste de situations	N/D	N/D

Dans le Tableau 4.3, les métriques 11 et 12 ont été quantifiés à l'aide du chapitre portant sur la caractérisation des débobineurs mécaniques. La métrique 13 a été mesurée entre le point mort bas du bras de levier

des débobineurs mécaniques et le point le plus haut qui libère la rotation de la bobine. La métrique 15 pour les débobineurs mécaniques est détaillée sur la liste suivante. Ces manipulations s'appliquent aux deux débobineurs et comportent donc 8 étapes.

1. Dévisser la vis qui maintient le ressort principal.
2. Enlever le ressort.
3. Enlever la bobine vide (ou déjà installée pour un tressage précédent).
4. Installer le ressort désiré.
5. Installer une bobine pleine (avec le bon matériau).
6. Revisser la vis qui maintient le ressort principal.
7. Passer manuellement le fil à travers tout le mécanisme de poulies et guides.
8. Attacher le fil au point de tressage de la machine.

Pour quantifier la métrique 16, un opérateur a été chronométré pendant qu'il effectuait un remplacement de ressort dans chacun des débobineurs mécaniques. Pour quantifier la métrique 20, un opérateur a été chronométré en simulation de bris de fil. Il devait démonter et enlever le fil du débobineur, remplacer la bobine avec une nouvelle bobine pleine, repasser le fil à travers tout le mécanisme de poulies et guides, puis attacher le fil au point de tressage de la machine. La métrique 22 est estimée selon la complexité du débobineur mécanique tel que décrit par la liste ci-dessous. Voici une liste d'opérations possibles pour l'assemblage des débobineurs mécaniques. On suppose que toutes les composantes sont fabriquées et prêtes à être assemblées. On suppose qu'il n'y a aucun sous-assemblage déjà existant.

— Assemblage de pièces *press-fit* : environ 20 min en raison de la machinerie requise.
— Assemblage du bras de levier et des goupilles : environ 15 min en raison du grand nombre de petites pièces.
— Assemblage de divers guides pour la redirection du fil : environ 10 min en raison du grand nombre de petites pièces.
— Assemblage des ressorts (primaire et secondaire) avec la vis de retenue : environ 5 min.
— Assemblage du débobineur dans le support de la tresseuse : environ 5 min.

4.3.3 Requis techniques du débobineur actif

Les métriques les plus importantes ont été identifiées et quantifiées pour les débobineurs compétiteurs dans le Tableau 4.3. À partir de cette analyse, il est possible d'établir les requis techniques pour le débobineur actif. Ces requis seront divisés en trois catégories : fonctions principales (FP), fonctions complémentaires (FC) et contraintes de conception (CO). Ces requis sont établis en se servant des métriques identifiées précédemment. Dans le cadre de ce projet de recherche, certaines métriques ont été mises à part parce qu'elles n'ont pas été identifiées comme étant nécessaires pour la preuve de concept du débobineur actif. En l'occurrence, les métriques dans la liste suivants ont subi des changements ou des précisions.

— Orientation de la bobine (No. 7) : le client impose l'utilisation d'une bobine horizontale.
— Largeur de la bobine (No. 8) : il n'y aura pas de tests effectués avec du ruban thermoplastique. Ainsi, la largeur de la bobine sera définie de manière à respecter la métrique No. 1 (rayon du cylindre le plus petit pouvant contenir le débobineur debout).

— Résistance en fatigue lors du fonctionnement dans une tresseuse (No. 9) : mise de côté parce que le débobineur actif ne sera pas testé dans la machine de tressage. Cela fera partie des travaux futurs.

— Compatibilité avec divers matériaux (No. 10) : les matériaux qui ont été ciblés sont le fil de nylon et la fibre de verre. Dans des travaux futurs, une plus grande variété de matériaux seront testés.

— Quantité de fil sur la bobine (No. 19) : suite à une discussion avec le client, dans le cadre du débobineur actif, la quantité de fil sur la bobine sera quantifiée en terme de masse plutôt qu'en terme de volume parce que dans l'industrie textile, les fibres sont toujours décrites en terme de masse.

— Guide d'utilisation du débobineur (No. 21) : un guide d'utilisation du débobineur actif ne sera pas mis au point. Cela fera partie des travaux futurs.

— Protocole informatisé de gestion de problèmes (No. 23) : aucun protocole informatisé ne sera mis au point pour gérer les différents problèmes possibles. C'est l'opérateur qui devra gérer manuellement les problèmes qui peuvent survenir durant l'opération du débobineur actif.

Suite à ces spécifications, on peut procéder à la répartition des métriques dans des fonctions principales, complémentaires et contraintes de conception. Les Tableaux 4.4 à 4.6 présentent toutes ces spécifications techniques. Le niveau pour chacune des fonctions a été établi en étroite collaboration avec le client. La colonne "Fonction" indique un besoin que le produit devra combler, la colonne "Niv." indique le niveau d'importance de cette fonction de 1 (peu important) à 5 (très important), la colonne "Métrique" indique comment la fonction est quantifiée, la colonne "Valeur" indique la valeur ciblée pour combler le métrique correspondante, et la colonne "Flexibilité" indique s'il y a une flexibilité sur la valeur de la métrique correspondante. Le Tableau 4.4 indique toutes les fonctions principales qui ont été choisies pour le débobineur actif.

La FP-1 indique que le débobineur actif doit être capable de supporter au moins 250 grammes de matériau pour débobinage. Il s'agit d'une borne minimale qui a été imposée par le client pour être capable de réaliser des tresses lors de travaux futurs.

La FP-2 décrit que le débobineur actif doit être capable de maintenir le fil tendu durant le tressage. Pour faire cela, il doit être capable de rembobiner le fil sur la bobine. Suite à une discussion avec le client, la longueur minimale que le débobineur doit rembobiner a été établie à 500 mm. Cette valeur a pour effet de limiter la quantité de solutions techniques possibles qui ne font pas appel à l'utilisation d'un moteur.

La FP-3 indique que le débobineur actif doit engendrer une force dans le fil lors du tressage qui peut être choisie entre 0 et 4 N. La plage d'opération a été largement basée sur les forces moyennes que les débobineurs mécaniques offrent en fonction des divers ressorts utilisés. Ainsi, le débobineur actif doit être capable de reproduire la même plage d'opération. Le client a également autorisé une certaine flexibilité sur cette plage d'opération en la réduisant entre 0 et 3 N. Cette plage est plus représentative de ce qu'il utilise dans ses procédés de tressage.

La FP-4 décrit que le débobineur actif doit être capable de maintenir la force dans le fil de manière très constante. Ceci se quantifie par l'écart-type qui a été choisi de manière à correspondre aux bornes inférieures engendré par les débobineurs mécaniques. Ainsi, le débobineur actif doit engendrer considérablement moins de variations dans la force durant le débobinage.

Tableau 4.4 Fonctions principales

No.	Fonction	Niv.	Métrique	Valeur	Flexibilité
FP-1	Transporter du filament embobiné pour tressage	5	Quantité de fil sur la bobine	250 grammes	Minimum
FP-2	Maintenir le fil tendu durant le tressage	5	Longueur de fil que le débobineur peut rembobiner	500 mm	Minimum
FP-3	Contrôler la force de tension dans le fil	4	Plage d'opération pour la force de tension	0 à 4 N	0 à 3 N
FP-4	Maintenir une force de tension très stable dans le fil	5	Écart-type de la force de tension	0.1 N	Maximum

La FC-1 indique que le débobineur actif doit pouvoir sauvegarder un historique composé de données mesurées durant l'opération. Il doit donc y avoir plusieurs instruments de mesure présents pour mesurer les paramètres d'intérêt. Il sera donc possible de détecter, suite au tressage, des anomalies et d'expliquer la formation de défauts de fabrication. Les instruments de mesure seront choisis avec le client lors du développement de la solution finale.

La FC-2 décrit que le débobineur doit être contrôlé en temps réel. Il doit être capable de modifier la force de tension dans le fil lors du débobinage à l'intérieur d'un délai de 5 secondes.

La FC-3 impose au débobineur actif de pouvoir être contrôlé à distance. Jusqu'à présent, un grand nombre de fonctions et de métriques dirigent les solutions du produit vers un système électromécanique. En raison de la nature des machines de tressage qui déplacent les débobineurs de manière à s'entrecroiser, il serait impossible de contrôler le débobineur avec des fils. Par élimination, la seule manière de contrôler le débobineur est en utilisant une technologie sans fil. Ainsi, cette fonction indique que l'opérateur n'a pas besoin d'effectuer des interventions physiques pour configurer le débobineur actif.

Tableau 4.5 Fonctions complémentaires

No.	Fonction	Niv.	Métrique	Valeur	Flexibilité
FC-1	Sauvegarder en tout temps un historique de mesures durant l'opération	3	Utilisation d'un système d'acquisition de données	Instruments de mesures présents	Aucune
FC-2	Contrôler le débobineur actif en temps réel	5	Temps requis pour varier la force de tension	5 sec	Maximum
FC-3	Contrôler le débobineur actif à distance	5	Nombres d'interventions physiques par l'opérateur pour configurer le débobineur	Aucune intervention	Aucune

La CO-1 dicte que le débobineur doit fonctionner durant un tressage complet. Le client a quantifié l'autonomie minimale requise à 6 heures de fonctionnement.

La CO-2 indique que le débobineur actif doit pouvoir fonctionner sur la machine de tressage du LabSFCA sans entrer en collision avec d'autres débobineurs durant le tressage maypole. La métrique utilisée pour quantifier cette fonction est le diamètre du cylindre le plus petit pouvant contenir le débobineur lorsque placé debout dans la tresseuse du LabSFCA. Le diamètre maximal qui ne cause pas de collisions entre les débobineurs est de 12 cm.

La CO-3 requiert du débobineur actif de pouvoir fonctionner en milieu poussiéreux. Le tressage de matériaux composites produit beaucoup de poussière, et spécifiquement pour la fibre de carbone, les dépôts de poussière sur des composants électriques peut causer des court-circuits. La norme NEMA no. 4 pour les boitiers électriques dicte que le boitier électrique doit protéger l'équipement à l'intérieur contre l'infiltration de poussière. Il s'agit du minimum décrit par la norme NEMA qui inclut la protection contre l'infiltration de poussière. Le besoin de pouvoir fonctionner dans un milieu poussiéreux n'avait pas été identifiée initialement dans la section sur l'identification des besoins du client. Il s'agit d'un besoin qui a été détecté plus tard dans le processus de développement.

La CO-4 impose que le débobineur actif soit le moins cher possible. Le client a imposé un budget maximal de 500$ CAD par prototype. En tenant compte du fait que certaines machines de tressage peuvent avoir plus d'une centaine de débobineurs, et que les débobineurs mécaniques peuvent couter en bas de 30 USD, il faut que le débobineur actif ait un prix compétitif.

La CO-5 impose au débobineur actif d'être le plus léger possible. La masse maximale à vide est choisie de manière à être environ quatre fois la masse d'un débobineur mécanique. La masse d'un débobineur mécanique est d'environ 420 grammes, alors, suite à une discussion avec le client, la masse maximale du débobineur actif a été établie à 2 kg dans le but de ne pas surcharger la machine de tressage.

La CO-6 indique que le débobineur actif doit pouvoir effectuer un tressage avec du ruban thermoplastique. Comme discuté précédemment, il n'y aura pas de tests effectués avec du ruban thermoplastique dans le cadre de ce projet de recherche. Le client a donc imposé l'utilisation d'une bobine horizontale en prévision de travaux futurs.

La CO-7 stipule que le débobineur actif doit être simple à fabriquer et à démonter. Un maximum de 1 jour pour l'assemblage d'un débobineur a été choisi arbitrairement de manière à tenir compte des nouvelles complexités que ce concept apporte (comparativement aux débobineurs mécaniques).

La CO-8 dicte que le débobineur actif doit pouvoir prévenir l'usure prématurée du fil causée par du frottement sur diverses surfaces. Un maximum de 1 surface de frottement avec le fil a été choisi suite à une discussion avec le client. L'hypothèse suivante a été posée : en réduisant le nombre de surfaces de contact du fil, on réduit les forces de frottement qui causent de la dégradation dans le fil.

La CO-9 décrit que le débobineur actif doit offrir des performances invariantes selon le type de matériau utilisé. Cette fonction dicte que le débobineur actif doit être au minimum compatible avec le fil de nylon et la fibre de verre. Dans le cadre de ce projet de recherche, le fil de nylon et la fibre de verre sont les deux matériaux qui ont été choisis comme référence. Pour des fins de comparaison avec les tests de caractérisation des débobineurs mécaniques, il faut que le débobineur actif soit compatible avec ces matériaux.

La CO-10 requiert du débobineur actif d'être sécuritaire en cas de défaillance. La défaillance principale qui peut se produire est le bris du fil lors du débobinage. Ainsi, il faut que le débobineur actif ait un système de détection de défaillances qui peut aviser l'opérateur qu'un problème est survenu.

Tableau 4.6 Contraintes de conception

No.	Fonction	Niv.	Métrique	Valeur	Flexibilité
CO-1	Fonctionner durant un tressage complet	5	Autonomie du débobineur	6 h	Minimum
CO-2	Éviter les collisions avec d'autres débobineurs sur la tresseuse du LabSFCA	5	Diamètre du cylindre le plus petit pouvant contenir le débobineur debout	12 cm	Maximum
CO-3	Fonctionner en milieu poussiéreux	4	Norme NEMA pour boîtiers électriques	4	Minimum
CO-4	Être le moins cher possible	3	Coût de fabrication d'un prototype	500$ CAD	Maximum
CO-5	Être le plus léger possible	5	Masse totale à vide	2 kg	Maximum
CO-6	Débobiner du ruban thermoplastique	3	Orientation de la bobine	Horizontale	Aucune
CO-7	Être simple à assembler	2	Jours requis pour fabriquer un prototype	1 jour	Maximum
CO-8	Prévenir la dégradation prématurée du fil causée par frottement	3	Nombre de surfaces en frottement avec le fil	1 surface	Maximum
CO-9	S'adapter à plusieurs types de matériaux	4	Compatibilité avec divers matériaux	Nylon et fibre de verre	Minimum
CO-10	Détecter les défaillances	5	Système de détection de défaillances	Indicateur booléen présent	Aucune

4.3.4 Validation des besoins du client par le requis techniques

Les requis techniques du débobineur actif ont été explicités dans la sous-section précédente. La dernière étape de la spécification technique du produit consiste à valider que tous les besoins du client sont comblés par les fonctions principales, secondaires et par les contraintes de conception. Le Tableau 4.7 effectue un rappel des besoins du client et indique comment chacun des besoins est comblé. Certains besoins n'ont pas de fonction associées pour les combler. Pour ces besoins, une discussion avec le client avait été entretenue et ils ont été jugés comme n'étant pas nécessaires dans le cadre du projet. On peut également voir apparaître un 24e besoin qui a été ajouté suite à un entretien avec le client (tel que mentionné lors de l'explication de la CO-4). On peut constater que la majorité des besoins principaux (ayant une importante de *, ** ou ***) sont comblés par un ou plusieurs requis techniques. On doit rappeler que les besoins qui sont notés par une importance de niveau 0 ne sont pas essentiels dans le cadre du projet de recherche. Ainsi, ces besoins peuvent être omis lors de la recherche de solutions techniques. L'essentiel est que chacun des besoin ayant une importance significative (*, ** ou ***) soit comblé par une ou plusieurs fonctions.

Tableau 4.7 Hiérarchisation des besoins du client

No.	Besoin	Importance	Fonction
1	Occuper une petite empreinte de surface (*footprint*)	***	CO-2
2	Doit être facile à fabriquer	***	CO-7
3	Être peu dispendieux à prototyper	***	CO-4
4	Avoir peu de frottement avec le fil	**	CO-8
5	Être léger	*	CO-5
6	Pouvoir tresser du tape thermoplastique	0	CO-6
7	Résister aux changements de direction brusques du tressage maypole	0	-
8	Débobiner une multitude de matériaux différents	***	CO-9
9	Maintenir le fil tendu en tout temps	***	FP-2
10	Contrôler la force dans le fil durant le tressage	***	FP-3, FP-4
11	Rembobiner le fil	***	FP-2
12	Détecter des anomalies lors du débobinage	*	CO-10
13	Embobiner le fil brut en préparation pour le tressage	*	FP-2
14	Contrôler le débobineur à distance	***	FC-3
15	Modifier la tension dans le fil en temps réel	**	FC-2
16	Commander simultanément plusieurs débobineurs	*	FC-3
17	Générer une collecte de données durant le tressage	*	FC-1
18	Avoir une autonomie suffisante pour un tressage complet	0	CO-1
19	Intervention rapide de l'opérateur en cas de problèmes	***	CO-10
20	Manipuler en sécurité par l'opérateur	**	CO-10
21	Rapide à assembler et à démonter	*	CO-7
22	Réagir de manière sécuritaire en cas de problèmes	*	CO-10
23	Doit être facile et intuitif à utiliser par un opérateur	0	-
24	Doit fonctionner en milieu poussiéreux	0	CO-3

4.4 Génération de concepts

La méthodologie de génération de concepts est présentée par la liste suivante et chacun des points correspond à une sous-section. L'identification des solutions techniques pour chaque sous-système et le classement des solutions techniques sont joints dans l'Annexe H pour alléger la lecture et mettre l'emphase sur la solution finale.

— Décomposition du produit en sous-systèmes

— Identification de solutions techniques pour chaque sous-système

— Classement des solutions techniques

4.4.1 Décomposition du produit en sous-systèmes

Le débobineur actif peut être décomposé en plusieurs sous-systèmes qui, combinés adéquatement, peuvent satisfaire les requis techniques. À travers les divers requis techniques, on peut constater que plusieurs d'entre eux font appel à des solutions techniques électromécaniques (FC-1, FC-2 et FC-3). Effectivement, un système de détection de défaillances, un système d'acquisition de données, un contrôle en temps réel ainsi que le contrôle à distance peuvent difficilement être réalisés sans l'utilisation de composants électroniques. Basés sur ces requis et métriques, on peut conclure que la solution finale devra posséder un système électrique. Ceci

fait ressortir plusieurs requis supplémentaires, tels que l'alimentation électrique, la présence d'un ordinateur d'acquisition et de contrôle, et la présence d'un dispositif de communication sans fil. En raison de la FP-2 qui demande de rembobiner au minimum 500 mm de fil, et de la CO-8 qui requiert de ne pas avoir plus qu'une surface de frottement, il est impossible de les respecter sans utiliser un moteur électrique pour contrôler la bobine. Ainsi, la génération de concepts se fera uniquement sur des solutions techniques faisant appel à un moteur. On peut décomposer le débobineur actif dans les sous-systèmes suivants.

— Système d'alimentation électrique.

— Système de contrôle de la bobine (et du fil).

— Système d'acquisition de données.

— Système de communication sans fil.

— Système de structure.

Le système d'alimentation électrique doit être en mesure d'alimenter en électricité tous les composants électriques. Il doit également satisfaire la CO-1, soit avoir une autonomie d'au moins 6 heures. Le système de contrôle de la bobine doit être en mesure de contrôler la rotation de la bobine pour effectuer un débobinage précis. Ce système doit satisfaire les FP-2, FP-3 et FP-4 des requis techniques. De plus, la bobine doit être horizontale, selon la CO-6, et doit posséder au maximum 1 surface de frottement sur le fil, selon la CO-8. Le système d'acquisition de données doit satisfaire la CO-10 et la FC-1. Le type de données qui sont intéressantes à sauvegarder pour des fins d'analyse sera détaillé dans la prochaine sous-section. Le système de communication sans fil doit satisfaire les FC-2 et FC-3. L'opérateur doit être en mesure de communiquer avec le débobineur actif, il doit pouvoir le contrôler par l'intermédiaire du système de communication sans fil et il doit pouvoir recevoir des messages d'alerte en cas de détection de problèmes. Finalement, le système de structure doit satisfaire la FP-1, CO-2, CO-3 et CO-9. Effectivement, la structure doit supporter au minimum 250 grammes de fibre, elle doit être compatible avec l'espace de travail de la tresseuse du LabSFCA, elle doit fournir une protection contre l'infiltration de poussière et elle doit supporter du fil de nylon et de la fibre de verre. L'ensemble du débobineur doit satisfaire la CO-4 (coûter moins de 500$ CAD à fabriquer), la CO-5 (l'assemblage complet du débobineur doit peser moins de 2 kg) et la CO-7 (l'assemblage d'un prototype doit prendre moins d'un jour de travail). Finalement, on peut valider que tous les requis techniques sont pris en considération dans la décomposition du produit en sous-systèmes. l'identification des solutions technique pour chaque sous-système ainsi que leur classement est joint dans l'Annexe I.

4.5 Sélection du concept final

Parmi les différentes méthodes de sélection des sous-produits, celle qui sera employée dans ce projet de recherche consiste à valider le choix final en collaboration avec le client, et c'est lui qui aura à trancher pour des solutions équivalentes. Cette méthodologie consiste à établir des facteurs décisionnels avec le client pour ensuite éliminer les sous-systèmes qui ne les satisfont pas. Par la suite, une recherche est effectuée pour la sélection des composantes des sous-systèmes. Il faut rappeler que l'objectif principal de ce projet de recherche est de développer un prototype fonctionnel, alors les solutions les plus économiques et simples seront conservées.

4.5.1 Élimination des concepts des sous-systèmes

Suite au classement des solutions techniques de l'Annexe I, il y a quatre facteurs décisionnels qui ont été choisis avec le client pour éliminer les concepts : privilégier les solutions les moins dispendieuses, privilégier les solutions qui minimisent le nombre de composantes individuelles (et ainsi la complexité), privilégier les solutions les plus faciles à implémenter, et finalement, rejeter les concepts qui ne satisfont pas les performances requises. On procédera à l'élimination des concepts, lorsque possible, qui ne répondent pas à ces quatre facteurs décisionnels.

Système d'alimentation électrique : toute solution qui implique de devoir apporter des modifications à la machine de tressage du LabSFCA est écartée parce qu'elle s'avère trop dispendieuse et complexe. Ainsi, on se retrouve avec le concept d'alimentation électrique par batterie lithium-polymère. Cette dernière est rechargeable et doit employer un circuit de protection pour assurer la sécurité du débobineur.

Système de rétroaction pour le contrôle de la bobine : la lecture de la force électromagnétique de résistance (*back-electromagnetic force - bEMF*) est rejetée en raison de sa complexité et de son manque de précision et la lecture de position par un encodeur absolu est rejetée en raison de son coût élevé. Ainsi, on se retrouve avec l'utilisation d'un encodeur incrémental pour satisfaire le système de rétroaction du contrôle de la bobine.

Système de rotation de la bobine : le moteur pas-à-pas est rejeté parce que lors de son fonctionnement, il engendre des vibrations qui sont impossible à éliminer. Ainsi, on se retrouve avec le concept faisant appel à un moteur à courant continu à brosse et avec le concept faisant appel à un moteur à courant continu sans brosse comme concepts possibles pour satisfaire le système de rotation de la bobine.

Système d'acquisition des données : parmi tous les paramètres de mesure énumérés, le client a décidé de procéder avec la mesure du rayon effectif du fil, la mesure des accélérations lors du débobinage, la mesure du système d'alimentation électrique et la mesure de la force dans le fil. Il a été déterminé avec le client que dans le cadre du projet de recherche, il n'est pas nécessaire d'effectuer les autres mesures mentionnées.

Système matériel de communication sans fil : parmi toutes les solutions techniques générées, le micro-ordinateur Raspberry Pi se démarque significativement des autres parce qu'il possède déjà toutes les composantss nécessaires pour effectuer les tâches requises. Cette solution permet de minimiser le nombre de composants externes et donc satisfait le mieux les facteurs décisionnels. Ainsi, le micro-ordinateur Raspberry Pi a été choisi pour effectuer la communication sans fil.

Système technologique de communication sans fil : les deux technologies satisfont les facteurs décisionnels, alors aucune des deux ne peut être éliminée dans cette étape du processus de conception.

4.5.2 Recherche sur les solutions techniques

Lors du processus de recherche d'une implémentation physique dans chacun des sous-systèmes, il a été découvert un circuit de contrôle pour moteurs à courant continu sans brosse (BLDC) qui possède un système d'asservissement intégré pour le moteur. Ce circuit de contrôle est *Open Source* et tout le programme de contrôle est accessible et documenté. Il s'agit du même circuit de contrôle qui a été présenté dans le chapitre précédent, soit le contrôleur ODrive, qui a été développé par ODrive Robotics [40]. Ce circuit de contrôle permet de choisir le type de moteur qui sera utilisé pour le débobineur actif. Effectivement, puisque le ODrive possède déjà un système d'asservissement mis au point, cela réduit significativement la charge de travail dans

la réalisation d'un débobineur actif. Le circuit de contrôle est compatible avec l'encodeur incrémental. De plus, le circuit de contrôle permet un asservissement en couple, ce qui signifie qu'il est possible de calculer la force dans le fil en utilisant le système de mesure du rayon effectif du fil. Puisqu'il est possible de contrôler directement le moteur avec l'asservissement en couple, cette solution technique permet d'éliminer le système de mesure de la force dans le fil. Ce circuit de contrôle peut être commandé par le micro-ordinateur Raspberry Pi via une interface de communication USB.

Lors du processus de recherche de la sélection de la technologie de communication sans fil, un protocole de communication par WiFi a été identifié. Il s'agit du protocole de communication MQTT (*MQ Telemetry Transport*) qui est largement utilisé dans le domaine de l'Internet des Objets (*Internet of Things — IoT*). Un exemple d'application est l'utilisation d'ampoules LED qui se connectent au WiFi et qui peuvent être contrôlées par une application sur le téléphone. Ce protocole permet de communiquer avec plusieurs appareils simultanément, ce qui est désiré par le client. Ainsi, il est possible de commander simultanément plusieurs débobineurs en utilisant ce protocole. Par contraste, la technologie Bluetooth permet uniquement de communiquer à un appareil à la fois. Il y a beaucoup d'implémentations logicielles déjà existantes pour utiliser le protocole MQTT, alors cette solution respecte le facteur décisionnel sur la complexité. Finalement, le choix de la technologie WiFi pour la communication en utilisant le protocole de communication MQTT a été fait.

Suite à ces analyse sur les solutions techniques, il est possible de développer un concept pour la solution finale. La liste suivante présente un regroupement des solutions techniques finales pour chacun des sous-systèmes.

— Système d'alimentation électrique : utilisation d'une batterie Li-Po et de circuits de protection et de régulation pour la batterie.

— Système de rétroaction pour le contrôle de la bobine : utilisation d'un encodeur incrémental qui est pris en charge par le circuit de contrôle du moteur.

— Système de rotation de la bobine : utilisation d'un circuit de contrôle ODrive avec un moteur à courant continu sans brosse (BLDC).

— Système d'acquisition des données : utilisation d'un capteur pour mesurer le rayon effectif d'enroulement du fil, utilisation de capteurs pour mesurer le statut de la batterie Li-Po et utilisation d'un capteur pour mesurer les accélérations lors du débobinage. Le circuit de contrôle permet de mesurer les divers paramètres du moteur (tel que le courant dans chacune des phases du moteur, le couple du moteur, etc.).

— Système de communication sans fil : utilisation d'un micro-ordinateur Raspberry Pi et communication par WiFi selon le protocole MQTT.

4.6 Présentation du concept final

Dans cette section sera présenté le concept final qui a été retenu et qui satisfait tous les requis techniques et besoins du client. En premier lieu sera présentée une vue d'ensemble du concept final qui illustre toutes les composantes. Par la suite seront présentés chacun des sous-systèmes et leur implémentation matérielle.

4.6.1 Vue d'ensemble du concept final

Sur la Figure 4.1 on peut voir l'allure générale du débobineur actif. Tout l'assemblage peut être compris à l'intérieur d'un cylindre ayant 100 mm de diamètre et 340 mm de hauteur. Le débobineur a une masse

totale de 1.3kg. La bobine de fil (1) se trouve en haut de l'assemblage selon une orientation horizontale. Un moteur BLDC assure le débobinage du fil à l'aide d'un encodeur (9) qui permet la mesure avec précision de la position de l'axe. Un bras de levier (2) imprimé en plastique pour mesurer le rayon effectif du fil est monté sur un potentiomètre (10). Au fur et à mesure que le fil se déroule, le rayon effectif diminue, tel que mentionné dans le chapitre précédent sur la Figure 3.6. Ce bras de levier est maintenu en contact avec le fil grâce à un ressort (qui n'est pas illustré sur la figure). Toutes les composantes mentionnées sont montées sur la structure supérieure (3).

Par la suite, on peut remarquer l'ordinateur de bord Raspberry Pi Zero W (4) qui est un micro-ordinateur 32bits possèdant une puce WiFi et une puce Bluetooth. Il y a également le circuit de contrôle BDDrive (11) qui est monté sur la structure principale (5). Il s'agit d'une version adaptée à nos besoins à partir des schémas libres d'accès. Ce travail de rétro-conception a été réalisé par un étudiant de la Polytechnique — Nathanaël Beaudoin-Dion — et la fabrication du circuit a été assurée par un professionnel indépendant — Joseph Lacerte. Les fonctionnalités du BDDrive seront détaillées dans la prochaine sous-section. Sur le BDDrive sont installés une unité inertielle ainsi qu'un CAN pour la lecture du rayon effectif (12). Ensuite, on peut remarquer l'utilisation d'un circuit de protection (6) pour la batterie (*battery management system - BMS*) qui est connecté à la batterie lithium-polymère (7). Finalement, la dernière composante qui est montée sur la structure principale est le régulateur de voltage de l'alimentation électrique (13).

Ensuite, sur la structure inférieure (8) sont installés un port d'alimentation (14) pour la recharge de la batterie Li-Po et un bouton de démarrage (15) du débobineur.

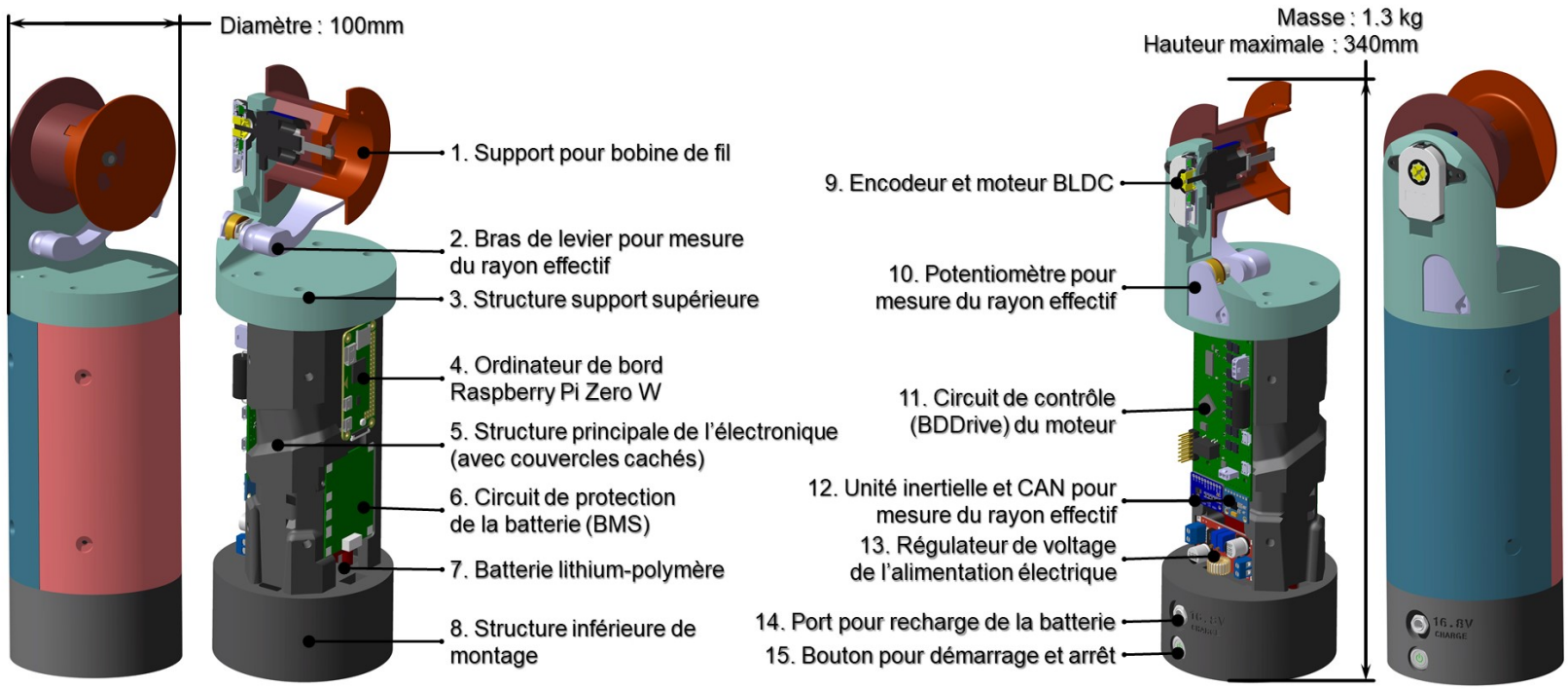


Figure 4.1. Aperçu des composants principaux et de l'allure générale du débobineur actif

4.6.2 Vue détaillée des sous-systèmes

La Figure 4.2 présente toutes les composantes du débobineur actif, regroupées par sous-système. Les sous-systèmes du concept final ont été simplifiés de manière à représenter plus adéquatement le design du débobineur actif. Sur ce diagramme, on peut voir que le premier sous-système correspond au système d'alimentation électrique. Le second bloc fonctionnel correspond au système de contrôle de la bobine. Par la suite, il y a le système de contrôle sans fil et finalement le poste de contrôle que l'opérateur utilisera pour commander à distance les débobineurs. Des flèches illustrent les interactions entre les divers sous-systèmes.

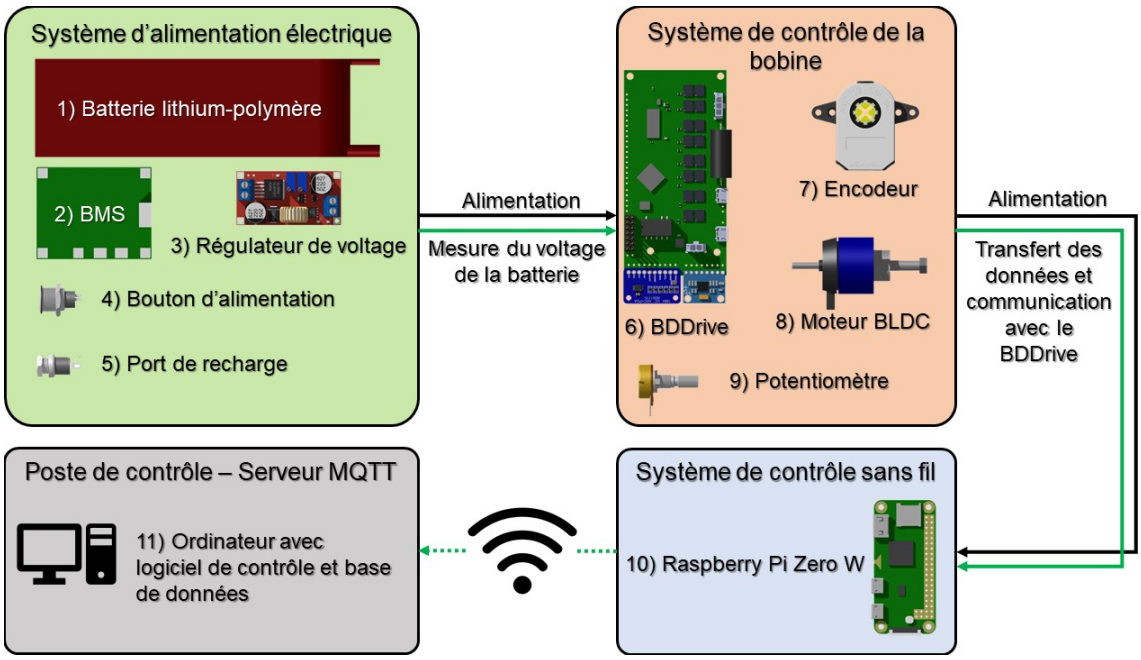


Figure 4.2. Schéma des systèmes principaux du débobineur actif

Système d'alimentation électrique

Ce sous-système est composé de la batterie Li-Po, un circuit de protection de la batterie (BMS), un régulateur de voltage, un bouton d'alimentation ainsi qu'un port de recharge. Le fonctionnement de ce sous-système est relativement simple :

- La batterie Li-Po est connectée sur le BMS en passant par le bouton d'alimentation.
- Le bouton d'alimentation coupe la connexion entre le fil positif de la batterie.
- Le port de recharge est connecté sur le BMS de sorte à pouvoir recharger la batterie.
- La sortie du BMS est connectée à l'entrée du régulateur de voltage.
- Le fil positif de la batterie est lié à un fil pour des fins de mesure par le système de contrôle de la bobine.
- La sortie du régulateur de voltage est connectée au BDDrive du système de contrôle de la bobine.

La batterie choisie est de type Lithium-Polymère ayant une capacité de 5000mAh et est composée de quatre cellules. Cela résulte en un voltage nominal de 14.8v. En réalité, à charge maximale, chacune des cellules

aura une tension approximativement de 4.2v, ce qui donne une tension réelle de 16.8v. L'autonomie de la batterie peut être estimée (de manière conservatrice) par la formule de l'équation 4.1. Elle décrit le temps T (secondes) d'autonomie qui est obtenu lorsqu'on divise la charge C (en ampère-heure) par le courant i (en ampères) qui est sollicité.

$$T = \frac{3600 \cdot C}{i} \tag{4.1}$$

Pour dimensionner la capacité de la batterie requise, quelques tests préliminaires ont été faits pour caractériser l'ordre de grandeur de la demande électrique du système. Selon la fiche technique, l'ordinateur de bord Raspberry Pi Zero W (RPi) peut tirer au maximum 1A à 5V. Le circuit de contrôle tire au maximum 0.5A au bus d'alimentation à 20v pour contrôler le moteur de manière a engendrer le couple maximal selon cette configuration. Ainsi, on peut calculer la puissance électrique qui est requise selon l'équation 4.2. On y applique également un coefficient d'efficacité électrique de 90%.

$$P_{requise} = \frac{P_{RPi} + P_{contrôle}}{\eta} \tag{4.2}$$

La puissance électrique se calcule par $P_{elec} = E \cdot I$, ou E est le voltage et i est le courant électrique. Ainsi, on calcule la puissance électrique requise par l'équation 4.3

$$P_{requise} = \frac{5V \cdot 1A + 20V \cdot 0.5A}{0.90} = 16.67W \tag{4.3}$$

Finalement, puisque la batterie possède une tension nominale de 14.8v, alors on peut calculer le courant que la batterie fournit au système en faisant le calcul inverse de la puissance : $i = P_{elec}/E = 16.67W/14.8V = 1.126A$. Pour calculer la capacité requise de la batterie pour fournir cette grandeur de courant pendant 6 heures d'opération, il suffit maintenant d'appliquer l'équation 4.1 et d'en isoler la capacite C en sachant que le cahier des charges requiert au minimum 6h d'autonomie : $C = 6h \cdot 1.126A = 6.757Ah$. Ainsi, en théorie, il faudrait choisir une batterie ayant une capacité d'environ 6757 mAh. Pour des fins pratiques toutefois, une batterie de cette capacité serait beaucoup trop grande et lourde pour satisfaire la CO-5 (masse maximale du débobineur). En conséquent, la batterie choisie possède une charge de 5000 mAh. Cette décision signifie que la CO-1 ne sera pas respectée, car l'autonomie minimale sera inférieure à 6 heures. Elle permet cependant le respect de la CO-5, car la masse du débobineur actif est inférieure à 2 kg.

Le port de recharge est compatible avec un connecteur de type *powerjack* 3.5 mm standard. Pour charger la batterie, il faut y appliquer une tension de 16.8v afin que les cellules atteignent à la fin de la charge une tension d'environs 4.2v chacune. Le BMS s'occupe de transmettre l'électricité d'alimentation à la batterie.

Le régulateur de tension sert à assurer un voltage constant à la sortie du système d'alimentation électrique. Au fur et à mesure que la batterie se décharge, son voltage diminue de manière non-linéaire, ce qui pourrait avoir un impact sur le circuit de contrôle BDDrive. Pour prévenir des problèmes qui pourraient survenir, le régulateur de tension utilise un circuit qui permet d'ajuster la tension en sortie à un niveau entre 1 et 32v. Il a été choisi de le régler à 24v parce que la plage de fonctionnement du BDDrive est entre 12 et 24v.

Finalement, le dernier élément qui compose ce sous-système est le circuit de protection de la batterie (BMS). Il possède un connecteur pour se brancher directement à chacune des cellules de la batterie et d'en lire le voltage individuel pour les balancer. Il possède le connecteur principal de la batterie et le connecteur de

sortie de l'alimentation électrique. Ce circuit coupe la sortie de l'alimentation électrique envers le reste du système si jamais le courant demandé est supérieur à 2 A pour ainsi protéger la batterie contre une décharge trop importante. Ce circuit permet de rendre le débobineur actif sécuritaire en cas de failles au niveau de l'alimentation électrique.

Système de contrôle de la bobine

Ce sous-système est composé du circuit de contrôle BDDrive, d'un encodeur incrémental pour mesurer la position du moteur, d'un moteur BLDC et d'un potentiomètre pour mesurer le rayon effectif du fil lors du débobinage. Le fonctionnement de ce sous-système est comme-suit :

— Le BDDrive est alimenté par le régulateur de tension du sous-système précédent.

— Le BDDrive possède un régulateur à 5v pour alimenter l'ordinateur de bord Raspberry Pi Zero W (RPi).

— L'encodeur et le moteur BLDC sont connectés au BDDrive.

— Le potentiomètre est connecté à un CAN qui se trouve sur le BDDrive.

— Une unité inertielle (IMU) est soudée directement sur le BDDrive.

— Le BDDrive achemine toutes les lectures et données via USB à l'ordinateur de bord (RPi).

— Le BDDrive agit comme un serveur, il reçoit par USB des commandes de contrôle de l'ordinateur de bord (RPi).

Puisque le circuit de contrôle est *Open Source*, un étudiant — Nathanaël Beaudoin-Dion — a été mandaté d'apporter certaines modifications pour réduire sa taille et pour incorporer d'autres fonctionnalités. Ce nouveau circuit de contrôle est dénommé BDDrive et les modifications qu'il possède sont les suivantes.

— Ajout d'un régulateur 5 V pour alimenter l'ordinateur de contrôle.

— Ajout du circuit du capteur de rayon effectif du fil.

— Ajout du circuit de mesure des accélérations du débobineur.

— Modification des résistances shunt pour permettre un contrôle en couple plus précis.

Plus d'informations sur le BDDrive sont jointes dans l'Annexe J.

L'encodeur incrémental utilisé est un AMT102-V. Il est recommandé par les créateurs du ODrive parce qu'il possède une précision exceptionnelle. Cela améliore les performances d'asservissement par le contrôleur. Il peut générer 8196 pulsations électriques pour un tour complet (360 degrés), ce qui donne une précision de 0.0439 degrés par pulsation. De plus, il possède également un canal pour obtenir un référentiel absolu. Ainsi, le contrôleur du moteur peut effectuer un tour complet et recevoir une pulsation lorsque l'encodeur est aligné sur sa position de référence (que l'on dénomme zéro).

Le moteur BLDC choisi est le modèle Keda 27-28, qui est un moteur typique pour applications de loisirs. Sa particularité est que son axe de rotation (qui est connecté à l'encodeur) ressort du même côté que le stator, ce qui permet d'avoir des éléments mobiles des deux côtés du moteur. En d'autres mots, le petit arbre du moteur est relié à l'encodeur, et le corps métallique du rotor est relié à la bobine qui contient le fil pour le tressage. La bobine du débobineur actif est montée sur le moteur BLDC et elle est conçue de manière à maximiser le volume total de matériau qui peut être stocké. Le volume de matériau maximal qui peut être installé est d'environ 80000 mm^3. Pour donner un ordre de grandeur, si on prend la masse volumique de la

fibre de carbone qui est autour de 1.78 grammes/cm^3, alors on obtiendrait une masse de fibre d'environ 142.4 grammes.

Finalement, un potentiomètre standard avec une résistance de $100k\Omega$ est utilisé comme système de rétroaction sur la variation du rayon effectif du fil. Il est connecté au CAN qui se trouve sur le BDDrive, et ce dernier transmet directement la mesure à l'ordinateur de bord en utilisant une interface de communication I2C. Le potentiomètre effectue la mesure du rayon effectif par l'intermédiaire d'une pièce maintenue en contact sur le fil. Il s'agit de la seule surface de frottement exercée sur le fil par le débobineur actif.

Système de contrôle sans fil

Ce sous-système est composé uniquement d'un ordinateur Raspberry Pi Zero W (RPi). Comme mentionné précédemment, cette composante a été choisie parce qu'elle possède une bonne puissance de calcul ainsi que beaucoup de ports de communication (I2C, SPI, USB, I/O, Bluetooth, WiFi, etc.). Le RPi utilise comme système d'exploitation une distribution de Linux — Raspbian — et il est possible de l'utiliser comme un ordinateur standard (avec une souris et un clavier) pour des fins de débogage. Il est aussi possible de le contrôler à distance (par WiFi) en utilisant une technologie VNC (*Virtual Network Computing*). Il est possible d'installer toutes les librairies Python qui sont requises pour contrôler le BDDrive et les divers modules d'acquisition des données.

Le RPi se connecte au WiFi local sur lequel se trouve le poste de contrôle de l'opérateur. Il utilise le protocole de communication MQTT et agit en tant que client. Le protocole MQTT consiste en un serveur (*brooker*) qui gère les interactions entre plusieurs clients. Chaque client peut s'abonner (*subscribe*) à plusieurs sujets (*topics*) et publier (*publish*) dans d'autres sujets. Par exemple, on pourrait avoir un débobineur actif qui publie à l'adresse IP du serveur MQTT au sujet "*/bm/carrier_1/response/*" et qui reçoit des instructions au sujet "*/bm/carrier_1/*". Les données sont transmises sous forme de chaîne de caractères, alors il faut effectuer, lors de la réception des instructions, un décodage adéquat. Une liste détaillée des instructions programmées que le débobineur peut interpréter est jointe dans l'Annexe K.

L'ordinateur de bord du débobineur actif agit comme un serveur en attente d'instructions. Suite au démarrage, il initialise la communication avec le BDDrive et se connecte au serveur MQTT qui fonctionne sur le poste de contrôle de l'opérateur. Par la suite, il attend des instructions à l'intérieur d'une boucle infinie faisant appel au concept du "*multithreading*" qui peut gérer les diverses fonctionnalités simultanément. Une liste détaillée du programme et des instructions est jointe dans l'Annexe K. En résumé, il peut effectuer la calibration initiale du moteur, le mettre en boucle fermée à différentes consignes de couple, lire diverses données (accélérations, voltage de la batterie, bras de levier, etc.) et les envoyer au poste de contrôle. Finalement, les données sont sauvegardées sur le disque à un intervalle de temps constant.

Poste de contrôle

Ce sous-système est composé d'un ordinateur qui est connecté au réseau WiFi local sur lequel sont connectés tous les débobineurs actifs. Il roule un serveur MQTT en arrière-plan et un programme simple est utilisé pour envoyer des chaines de caractères au débobineur actif. Ce logiciel gratuit (MQTT.fx) permet d'envoyer et de recevoir des messages à travers divers sujets. Il est possible d'envoyer des instructions à chaque débobineur manuellement, ou bien d'envoyer la même instruction à tous les débobineurs. Puisque le Raspberry Pi fonctionne de la même manière qu'un ordinateur de bureau, il fournit un affichage graphique à l'opérateur, il peut

ouvrir des applications, programmer dans divers langages, se déplacer graphiquement dans une hiérarchie de dossiers et fichiers, ouvrir des fichiers d'images, etc. Comme mentionné précédemment, il est possible pour l'opérateur de prendre le contrôle à distance l'ordinateur en utilisant la technologie VNC (*virtual network computing*).

4.7 Revue du concept final

Dans cette section, une revue critique sera effectuée sur le concept final du débobineur actif et chacun des requis techniques sera validé. Le Tableau 4.8 suivant effectue un rappel de chacun des requis techniques établis dans la section sur les spécifications techniques du produit. Le métrique qui s'y associe est également mentionné. La dernière colonne décrit comment chacun des requis techniques est satisfait.

On peut remarquer qu'il y a plusieurs fonctions qui ne sont pas validées dans le cadre de ce projet de recherche, telles que la FP-1 et la CO-3 parce qu'il n'y aura pas de tests sur la machine de tressage dans le cadre du projet de recherche. Il s'agit de fonctions qui, suite à une entente avec le client, ont été retirées du cadre de ce projet de recherche. Il y a certaines fonctions qui seront validées dans le prochain chapitre, caractérisation du débobineur actif, telles que la FP-3, FP-4 et CO-9. Finalement, on peut constater que la CO-1 n'est pas satisfaite parce que l'autonomie maximale théorique que la batterie peut offrir est inférieure au seuil de 6 h de fonctionnement. De plus, lors de la description du système de contrôle de la bobine, le volume maximal de matériau pouvant être embobiné sur la bobine du débobineur actif a été calculé à approximativement 80000 mm^3, et en comparant ce volume avec celui des débobineurs mécaniques déjà existants sur le marché (voir la Section 4.2 sur l'identification des besoins), on remarque que le volume de matériau pouvant être installé est grandement supérieur. Le db.SFCA peut accueillir 387415 mm^3 de matière, et le db.CTT peut en accueillir 513776 mm^3. Il se peut alors que le facteur limitant dans l'autonomie ne soit pas la batterie, mais plutôt la quantité de matière qui peut être installée sur le débobineur actif. Dans le cadre du projet de recherche, ce manquement n'empêche pas de caractériser le débobineur actif et de comparer ses performances avec les débobineurs mécaniques.

Tableau 4.8 Validations des fonctions du concept final

No.	Fonction	Métrique	Implémentation
FP-1	Transporter du filament embobiné pour tressage	Quantité de fil sur la bobine	Cette fonction sera validée lors de travaux futurs
FP-2	Maintenir le fil tendu durant le tressage	Longueur de fil que le débobineur peut rembobiner	Cette fonction sera validée par le prochain chapitre
FP-3	Contrôler la force de tension dans le fil	Plage d'opération pour la force de tension	Cette fonction sera validée par le prochain chapitre
FP-4	Produire une force de tension très stable dans le fil	Écart-type de la force de tension	Cette fonction sera validée par le prochain chapitre
FC-1	Sauvegarder en tout temps un historique de mesures durant l'opération	Utilisation d'un système d'acquisition de données	Une multitude de capteurs sont utilisés et les données sont sauvées sur le disque
FC-2	Contrôler le débobineur actif en temps réel	Temps requis pour varier la force de tension	Le temps de communication par WiFi avec le débobineur est inférieur à 1 seconde
FC-3	Contrôler le débobineur actif à distance	Nombres d'interventions physiques par l'opérateur pour configurer le débobineur	L'opérateur peut contrôler le débobineur à distance via des commandes avec MQTT.fx ou avec VNC
CO-1	Fonctionner durant un tressage complet	Autonomie du débobineur	L'autonomie théorique offerte par la batterie n'est pas satisfaisante
CO-2	Ne pas causer de collisions avec d'autres débobineurs sur la tresseuse du LabSFCA	Diamètre du cylindre le plus petit pouvant contenir le débobineur debout	Le débobineur possède un diamètre de 10 cm, qui est inférieur au maximum établi
CO-3	Fonctionner en milieu poussiéreux	Norme NEMA pour boîtiers électriques	Cette fonction sera validée lors de travaux futurs
CO-4	Être le moins cher possible	Coût de fabrication d'un prototype	Le coût du débobineur actif est inférieur a 500$ (voir plus de détails dans l'Annexe L)
CO-5	Être le plus léger possible	Masse totale à vide	Le débobineur actif pèse 1.3 kg, ce qui est inférieur au maximum établi
CO-6	Débobiner du ruban thermoplastique	Orientation de la bobine	La bobine de fil est horizontale
CO-7	Être simple à assembler	Jours requis pour fabriquer un prototype	L'assemblage d'un débobineur actif a été chronométré et a pris moins d'un jour à réaliser
CO-8	Prévenir la dégradation prématurée du fil causée par frottement	Nombre de surfaces en frottement avec le fil	La pièce en plastique connectée au système de mesure du rayon effectif du fil est la seule composante en frottement avec le fil
CO-9	S'adapter à plusieurs types de matériaux	Compatibilité avec divers matériaux	Cette contrainte de conception sera validée dans le prochain chapitre
CO-10	Détecter les défaillances	Le RPi utilise les divers capteurs pour mesurer des paramètres et affiche à l'opérateur lorsque des problèmes surviennent	

4.8 Conclusions sur le développement d'un débobineur actif

Dans ce chapitre, le développement d'un débobineur actif a été présenté en détails. En premier lieu, la méthodologie de design a été présentée, utilisant comme référence la méthode présentée dans le livre *Product Design and Development* [39]. Par la suite, l'identification des besoins a été effectuée, permettant de faire ressortir les aspects les plus importants que le débobineur actif devra combler. Pour suivre, des spécifications techniques ont été établies afin de poser un métrique quantifiable pour chacun des besoins. Ces métriques ont mené vers une génération de concepts sur plusieurs sous-systèmes indépendants du débobineur actif. La sélection du concept final a été présentée en utilisant une méthode d'élimination des solutions techniques les moins viables. Finalement, la solution finale a été détaillée et une première validation des requis techniques a été faite. Pour conclure, le deuxième objectif de recherche a été atteint parce qu'un débobineur actif a été conçu et fabriqué.

CHAPITRE 5 CARACTÉRISATION DU DÉBOBINEUR ACTIF

Ce chapitre traite du troisième objectif de recherche, soit caractériser le débobineur actif. Ce chapitre sert à valider les requis techniques en caractérisant les performances du débobineur actif et en se servant des performances des débobineurs mécaniques comme référence nominale. La méthodologie d'acquisition sera présentée en premier. Ensuite, les tests avec le débobineur actif seront effectués et une analyse des résultats sera présentée. Finalement, une comparaison avec les performances des débobineurs mécaniques sera faite ainsi qu'une deuxième validation des requis techniques du chapitre précédent.

5.1 Méthodologie d'acquisition pour la caractérisation du débobineur actif

La méthodologie d'acquisition pour les tests de caractérisation du débobineur actif est identique à celle présentée dans le Chapitre 3. Un rappel des points importants de cette méthodologie sera effectué ainsi qu'une spécification sur les modifications apportées dans le cadre des tests de caractérisation du débobineur actif. Il y aura également une sous-section qui décrira des tests supplémentaires qui ont été effectués dans le but de mieux évaluer les performances du débobineur actif et valider les requis techniques.

5.1.1 Paramètres de test

Les paramètres de test sont identiques à ceux du Chapitre 3, à l'exception de la modification qui suit. Le débobineur actif ne possède pas de ressorts, alors le paramètre **Type de ressort** est remplacé par le paramètre **Consigne de couple pour l'asservissement du débobineur actif**.

Le circuit de contrôle BDDrive peut asservir le moteur BLDC en couple en utilisant une approximation de la relation entre le couple et le courant dans le moteur. L'approximation utilisée est de la forme suivante : $T \approx K_t \cdot i$. Cette équation indique que le couple T [Nm] est approximé par une constante de couple K_t $[\frac{Nm}{A}]$ multipliée par le courant i [A] envoyé au moteur. La constante de courant peut être approximée par $K_t \approx \frac{8.27}{K_v}$ selon la documentation technique fournie par les créateurs du circuit de contrôle (ODrive Robotics). La constante 8.27 contient des unités qui concordent avec les constantes K_t et K_v. Dans cette équation, la constante K_v $[\frac{RPM}{V}]$ correspond à une propriété intrinsèque du moteur qui relie la vitesse de rotation du moteur au voltage introduit dans celui-ci. Le moteur choisi dans la solution finale utilise un moteur Keda 27-28 qui a une constante $K_v = 1000RPM/V$. Dans le cadre des tests expérimentaux, les consignes de couple (*torque setpoint*) choisis sont les suivants : 0, 0.01, 0.02, 0.04 et 0.07 Nm. Des tests préliminaires ont indiqué que pour réaliser une consigne de 0.07 Nm, la limite de courant que le BDDrive peut fournir est atteinte.

Le Tableau 5.1 ci-dessous regroupe tous les différents paramètres de tests qui sont utilisés dans la caractérisation du débobineur actif. Le débobineur actif est installé sur le banc de tests vis-à-vis le deuxième canal d'acquisition de la force et de mesure du rayon effectif.

Tableau 5.1 Tableau sommaire des paramètres de test

Consigne de couple (Nm)	**Vitesse de déroulement (mm/s)**	**Matériau du fil**	**Type de chargement**
0.0	25	Fil de nylon	Vitesse constante
0.01	50	Fibre de verre	Oscillatoire
0.02	100		
0.04	150		
0.07	250		

La FP-2 du débobineur actif indique qu'il doit être capable de rembobiner le fil lors du tressage pour la maintenir tendue en tout temps. Pour être capable de valider cette fonction, une courte série de tests a été mise au point dans laquelle le moteur du banc de tests engendre des oscillations dans la longueur de fil débobiné au lieu de débobiner à vitesse constante. L'objectif est de voir la capacité de rembobinage du débobineur. Durant ces tests, il sera possible de visualiser le comportement du débobineur actif. Les tests avec un chargement oscillatoire sont décomposés en trois types : oscillations lentes, oscillations rapides et oscillations stationnaires. Pour les oscillations lentes et rapides, il y a une vitesse de débobinage de 100 mm/s qui est superposée avec des déplacements oscillatoires qui suivent une fonction sinusoïdale dont l'amplitude est de 100 mm et la fréquence est de 45 degrés par seconde pour les oscillations rapides et de 10 degrés par seconde pour les oscillations lentes. Le test oscillatoire statique a une vitesse de débobinage de 0 mm/s et possède uniquement les oscillations rapides avec une amplitude de 100 mm et une fréquence de 45 degrés par seconde.

5.1.2 Modifications du banc de tests

Pour communiquer avec le débobineur actif, le programme de contrôle du banc de tests a été modifié afin qu'il puisse envoyer des instructions avec le protocole MQTT en utilisant le réseau WiFi local. Ainsi, lorsque le banc de tests débute un test de caractérisation, il envoi un message au débobineur actif pour le mettre en boucle fermée avec asservissement sur le couple du moteur selon la valeur entrée dans l'interface graphique. Outre cette modification, toute l'interface de contrôle du banc de tests est identique à celle utilisée pour réaliser les tests de caractérisation sur les débobineurs mécaniques. De plus, afin d'accélérer les tests de caractérisation du débobineur actif et pour prendre avantage de ses fonctionnalités, à la fin de chaque test de caractérisation, le banc de tests envoi une commande au débobineur actif pour le faire rembobiner le fil jusqu'à sa position de départ.

5.2 Résultats du débobineur actif

Cette section présente les résultats des tests de caractérisation du débobineur actif. La visualisation des résultats est identique à celle du Chapitre 3. Il est possible de retrouver tous les graphiques générés dans l'Annexe M. Les Figures 5.1 et 5.2 sont deux exemples des graphiques de résultats qui représentent bien le comportement global du débobineur actif. Le graphique superpose les trois échantillons pour chaque consigne de couple. Il est possible de voir sur les graphiques *a)* que la force dans le fil est constante durant le débobinage et il est également possible de lire dans la boîte de texte les moyennes ± l'écart-type pour chacune des

consignes de couple. Les distributions des résultats sur les graphiques *b)* se rapprochent beaucoup d'une distribution normale lorsque le débobineur actif possède une consigne de couple non-nulle. Sur les graphiques *c)*, il est possible de voir l'analyse spectrale de tous les tests avec le débobineur actif. On peut remarquer que certaines plages fréquentielles sont plus dominantes sur le système,outre la fréquence de 0 Hz qui est omise.

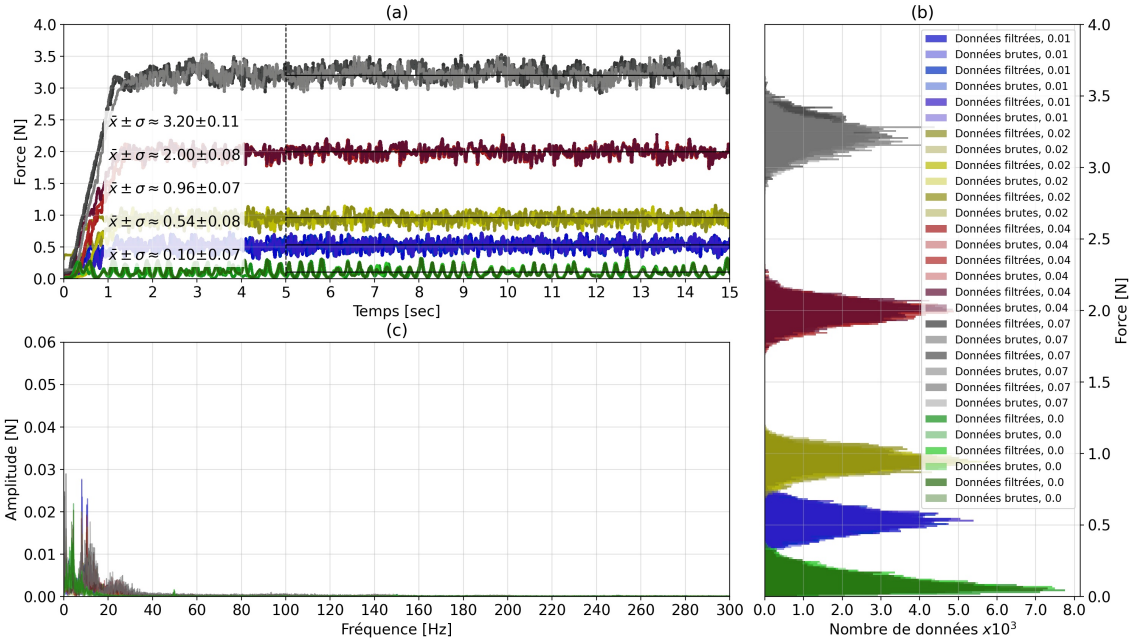


Figure 5.1. Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, tous les échantillons pour un débobinage à 50mm/s. Évolution de la force avec filtre médian (a), distribution des mesures brutes et filtrées (b), analyse spectrale sur les données filtrées entre 5 et 15 secondes (c).

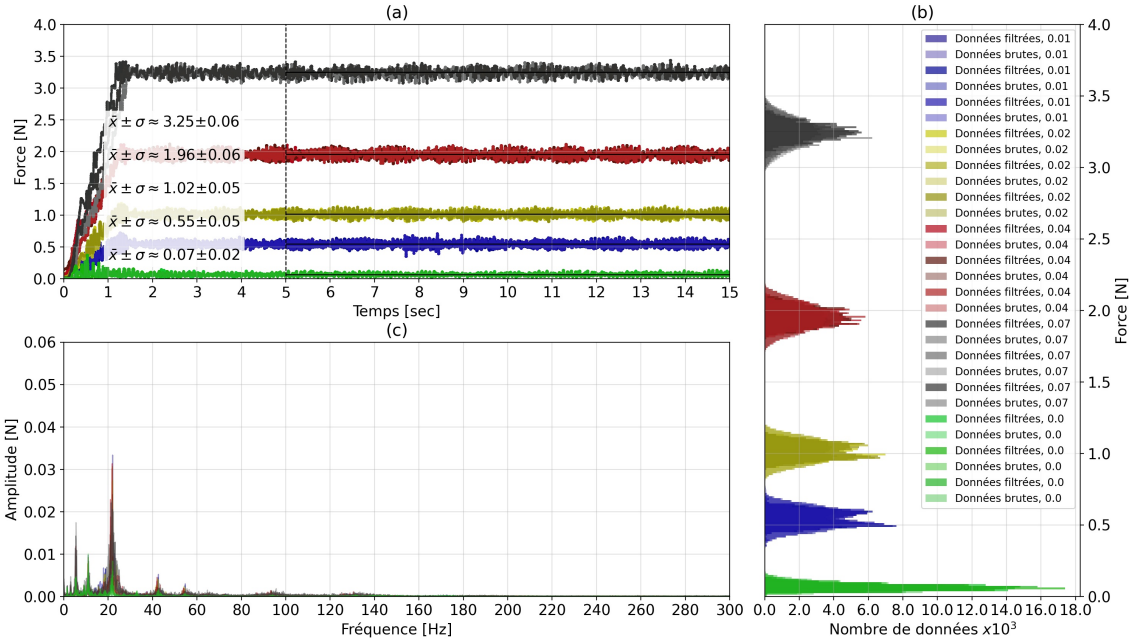


Figure 5.2. Toutes les consignes du db.ACT avec fibre de verre, tous les échantillons pour un débobinage à 250mm/s. Évolution de la force avec filtre médian (a), distribution des mesures brutes et filtrées (b), analyse spectrale sur les données filtrées entre 5 et 15 secondes (c).

5.2.1 Test avec chargement oscillatoire

Le même chargement oscillatoire que celui présenté dans la Section 3.4.2 du Chapitre 3 a été effectué sur le débobineur actif. Les Figures 5.3 à 5.5 présentent les résultats de tests pour ces chargements oscillatoires. Sur ces graphiques, la partie inférieure affiche l'évolution de la force durant le test. Simultanément, la partie supérieure illustre la longueur de fil embobinée par le banc de tests. En pointillé noir, il est possible de voir la longueur débobinée qui est calculée pour réaliser le chargement requis, et les autres courbes correspondent à la longueur réelle qui est mesurée. On peut constater que pour les courbes faisant appel à une consigne de couple plus élevée du débobineur actif, il se produit un déphasage entre la longueur calculée que le banc de tests doit réaliser et la longueur réelle mesurée. Ce comportement s'explique par le fait que le moteur du banc de tests doit exercer un plus grand couple pour compenser la force du débobineur actif. Il s'agit d'un retard de phase qui peut être attribué au comportement du contrôleur ODrive qui est utilisé sur le banc de tests.

On peut constater que pour des oscillations lentes, le débobineur actif est capable de maintenir une force dans le fil quasi-constante. On peut remarquer certaines zones qui subissent une diminution de la force de tension dans le fil, et ces emplacements sont alignés avec le graphique inférieur lorsque la longueur du fil atteint un plateau, c'est à dire que le moteur du banc de tests est arrêté momentanément en raison de la variation sinusoïdale du chargement. Ces creux pourraient être causés par la boucle de contrôle du débobineur actif qui ne permet pas au moteur de réagir instantanément, ce qui entraîne un léger délai dans la réaction du moteur.

En ce qui concerne les oscillations rapides, on peut constater que le banc de tests effectue des variations de

longueur dans le fil de nylon, et simultanément on peut voir que le débobineur actif tente de compenser. On peut constater que chacune des consignes d'asservissement en couple a exactement la même allure. Cela signifie que le comportement du moteur face à une variation de longueur dans le fil ne dépend pas de l'amplitude de la consigne donnée. Ce comportement pourrait être attribué à la boucle de contrôle interne du ODrive. Il se peut que le contrôleur utilisé ait un délai dans sa réaction, et que le comportement oscillatoire se produit à plus haute fréquence que la boucle d'asservissement. Les mêmes conclusions peuvent être tirées des graphique avec les oscillations stationnaires.

Sur ces graphiques, le fil est toujours en tension pour une consigne de couple supérieure à 0.01 Nm. Effectivement, le seul moment où la force dans le fil approche zéro est pour une consigne inférieure à 0.02 Nm. Ceci peut s'expliquer par le fait que la bobine de fil possède une inertie de rotation à laquelle le BDDrive doit compenser, mais avec une limitation du courant pour ne pas dépasser la consigne donnée. Le logiciel de contrôle du ODrive possède des paramètres de compensation inertielle pour le mécanisme en rotation, mais ces paramètres n'ont pas été explorés dans le cadre de ce projet de recherche parce qu'ils ont été implémentés plus tard dans la phase de conception par l'intermédiaire d'une mise à jour logicielle. L'exploration des paramètres de compensation inertielle fera partie de travaux futurs. Néamoins, il peut tout de même être conclu que le débobineur actif est capable de maintenir le fil tendu, peu importe le chargement auquel il est soumis. Il est possible de constater cependant que la force ressentie dans le fil est beaucoup moins constante que pour les tests de débobinage à vitesse constante.

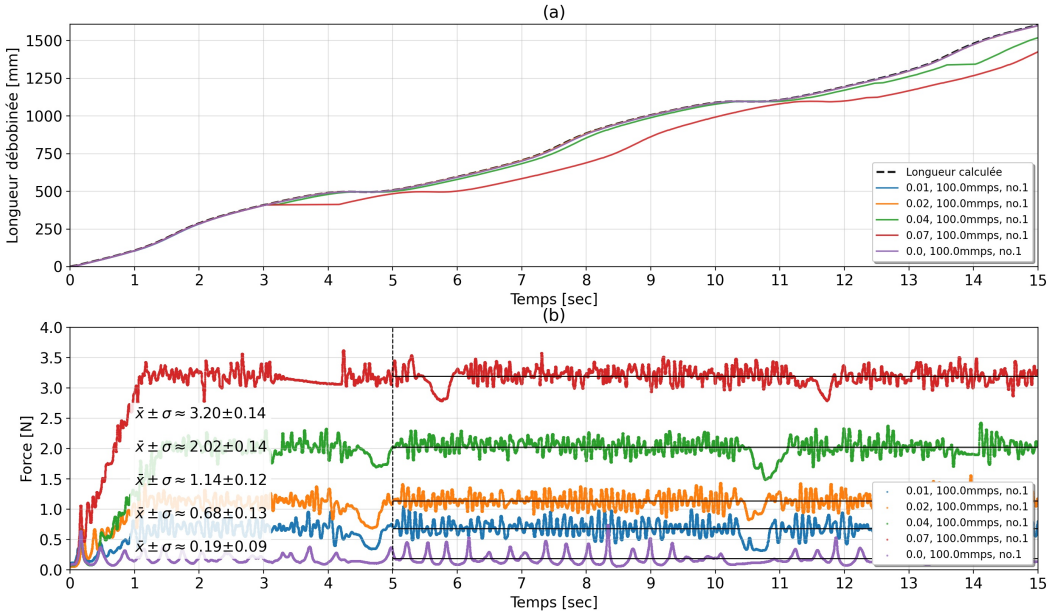


Figure 5.3. Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, un échantillon par consigne face à un chargement oscillatoire lent. Longueur de fil débobiné (a) et variation dans la tension du fil pendant le débobinage (b).

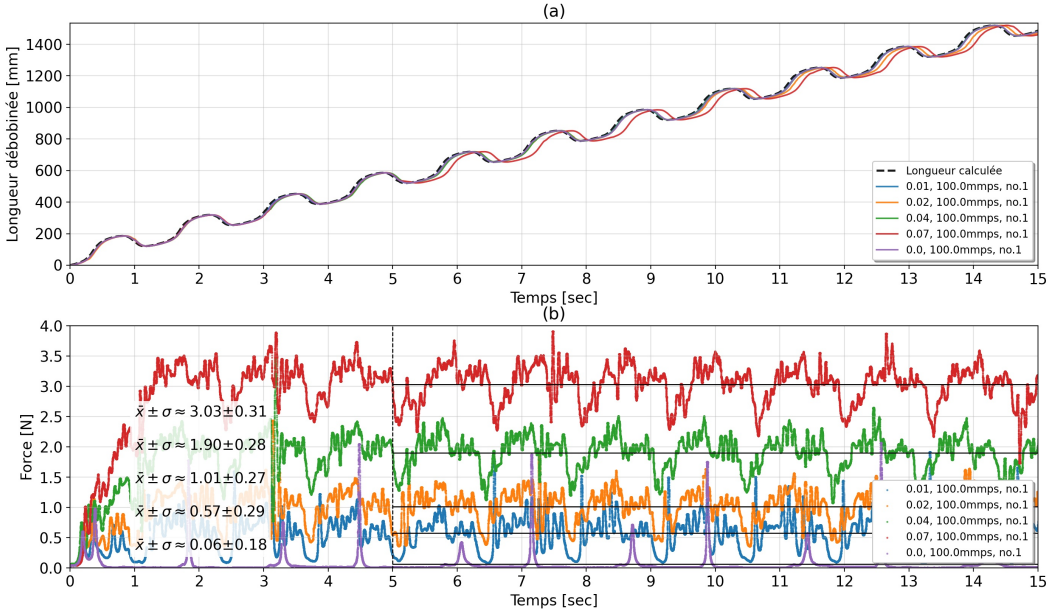


Figure 5.4. Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, un échantillon par consigne face à un chargement oscillatoire rapide. Longueur de fil débobiné (a) et variation dans la tension du fil pendant le débobinage (b).

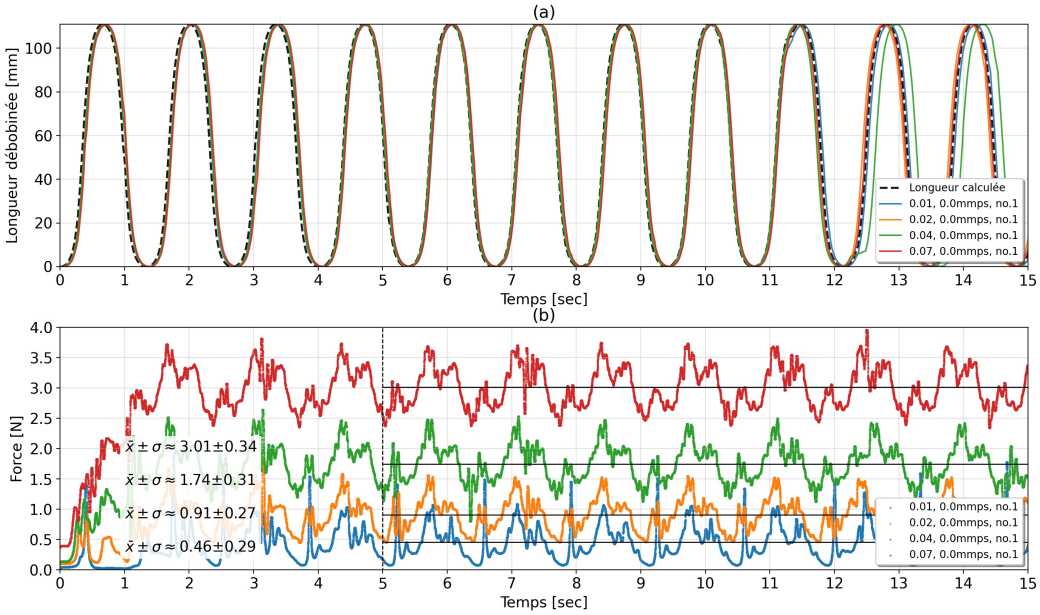
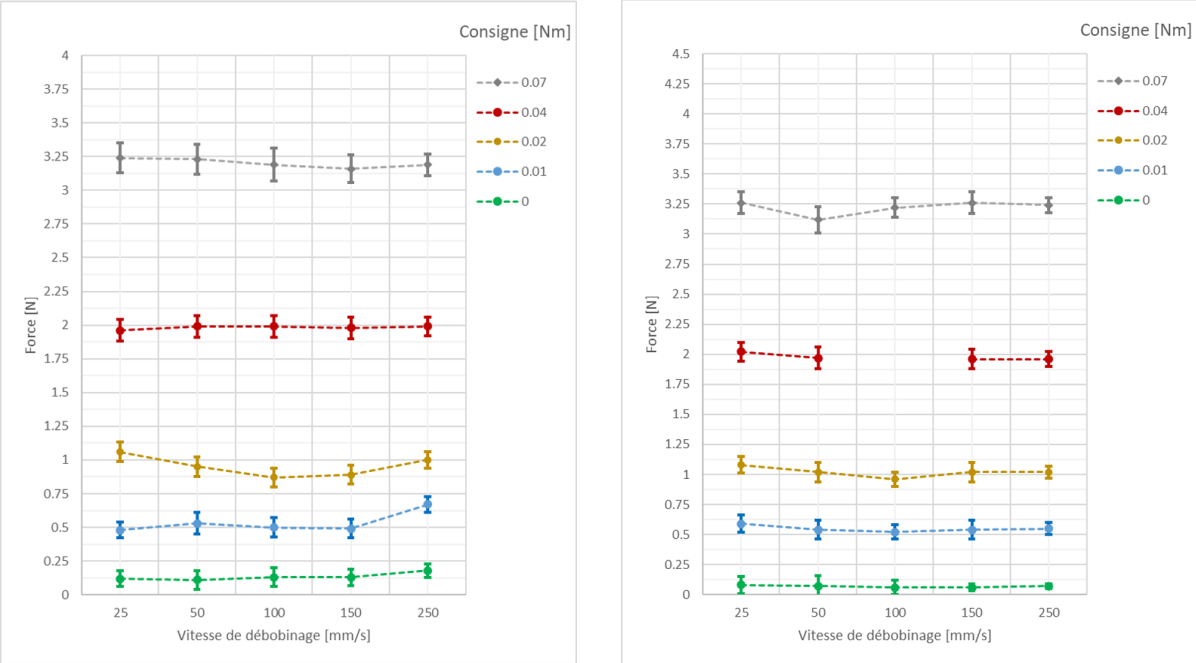


Figure 5.5. Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, un échantillon par consigne face à un chargement oscillatoire stationnaire. Longueur de fil débobiné (a) et variation dans la tension du fil pendant le débobinage (b).

5.3 Analyse des résultats

L'analyse des résultats est identique au Chapitre 3. Les tableaux sommaires des résultats sont présentés dans l'Annexe M. Les statistiques ont été calculées sur les données filtrées des trois tests pour chaque vitesse de débobinage. Sur la Figure 5.6 on peut apercevoir graphiquement les résultats regroupés dans des tableaux. Une anomalie peut être constatée pour la consigne de 0.04 Nm avec la fibre de verre à 100 mm/s. La donnée pour le débobinage à 100 mm/s avec un couple de 0.04 Nm pour la fibre de verre n'est pas disponible parce que les fichiers pour ces tests ont été corrompus et il a été impossible de reproduire exactement les mêmes conditions de tests. Il est possible de constater que l'écart-type est toujours constant indépendamment du type de matériau débobiné. On peut apercevoir qu'il y a plus de variations dans le fil lorsque la consigne d'asservissement en couple du moteur est basse (inférieure à 0.02 Nm) parce qu'on peut remarquer pour le fil de nylon que la consigne de 0.01 Nm induit plus de variations dans la force moyenne. Pendant les tests de débobinage, il était possible de voir que le fil de nylon n'était pas toujours embobiné de manière uniforme alors c'est possible que le système de mesure du rayon effectif ne compensait pas assez rapidement pour ces variations. De plus, lors des tests avec la fibre de verre, le bras de levier du système de mesure du rayon effectif était en contact avec toute la largeur de la fibre de verre et engendrait du frottement. Il était possible de voir, pendant le test de débobinage, des filaments de verre s'envoler.



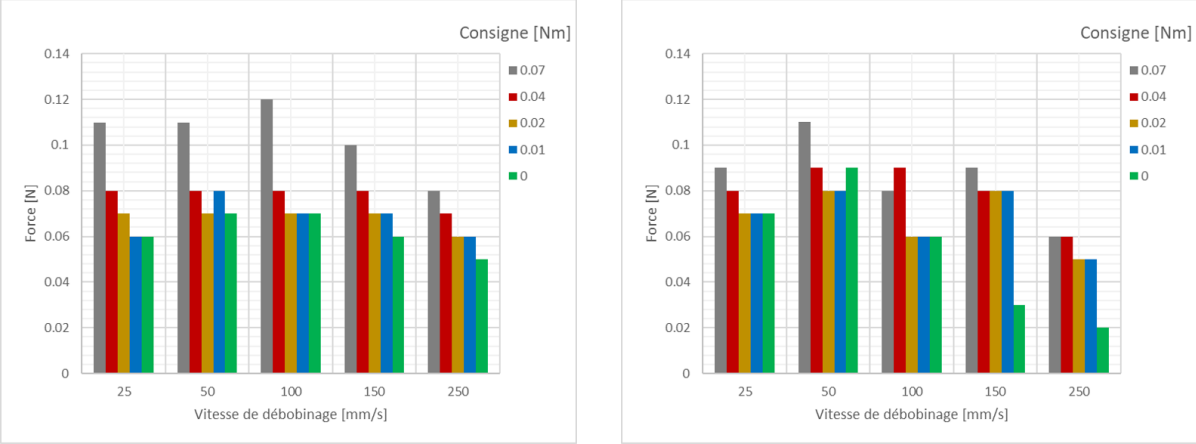
(a) db.ACT avec fil de nylon

(b) db.ACT avec fibre de verre

Figure 5.6. Sommaire de la moyenne et écart-type des tests de caractérisation du db.ACT

Sur la Figure 5.7 on peut apercevoir l'évolution de l'écart-type pour chacun des palier de vitesse de débobinage. La Figure 5.7a montre l'évolution de l'écart-type pour le db.ACT avec fil de nylon et la Figure 5.7b pour la fibre de verre. On peut constater que l'écart-type ne semble pas varier significativement avec le fil de nylon, et qu'il est contenu entre 0.05 N et 0.12 N. Pour la fibre de verre, il semblerait y avoir une diminution de

l'écart-type a 250 mm/s, mais on ne peut pas conclure à partir de ces tests. L'écart-type est dans la plage [0.07, 0.09] N pour 25 mm/s et [0.02, 0.06] N pour 250 mm/s.

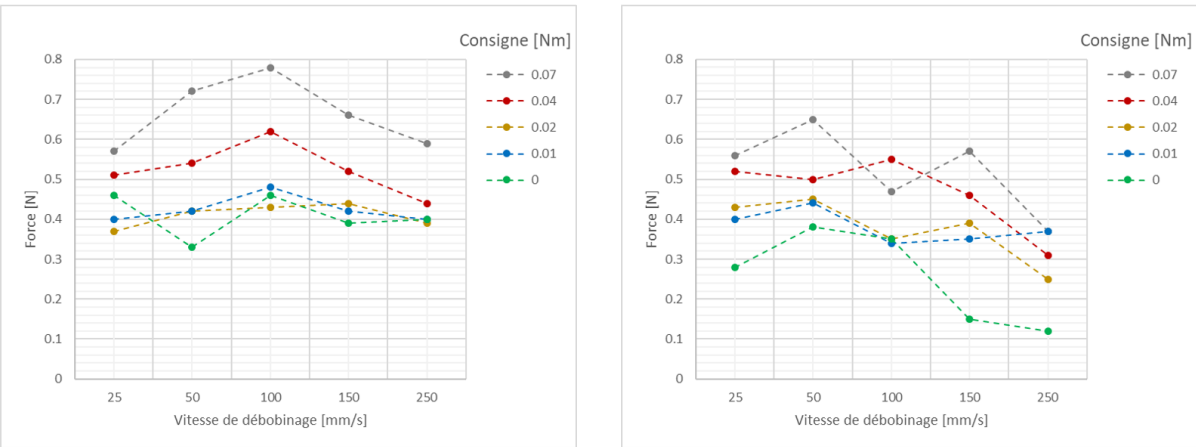


(a) db.ACT avec fil de nylon

(b) db.ACT avec fibre de verre

Figure 5.7. Sommaire de l'évolution de l'écart-type des tests de caractérisation du débobineur actif

Sur la Figure 5.8 on peut apercevoir l'évolution de l'écart-type pour chacun des palier de vitesse de débobinage. La Figure 5.8a montre l'évolution de l'écart-type pour le db.ACT avec fil de nylon et la Figure 5.8b pour la fibre de verre. On peut constater que pour le fil de nylon, l'écart entre la force maximale et minimale se trouve entre 0.32 N et 0.78 N. Pour la fibre de verre, l'écart entre la force maximale et minimale semble avoir tendance à diminuer légèrement lorsque la vitesse de débobinage augmente. L'écart est dans la plage [0.28, 0.56] N pour 25 mm/s et [0.12, 0.36] N pour 250 mm/s. Il faudrait effectuer plus de tests pour vérifier s'il y a effectivement une tendance à la baisse de l'écart en fonction de la vitesse de débobinage pour la fibre de verre.



(a) db.ACT avec fil de nylon

(b) db.ACT avec fibre de verre

Figure 5.8. Sommaire de l'écart entre la force minimale et maximale des tests de caractérisation du débobineur actif

5.4 Comparaison des performances des débobineurs

Cette section présente les conclusions sur les performances du débobineur actif en les comparant avec celles des deux débobineurs mécaniques. Par la suite, un retour sera effectué sur les requis techniques présentés dans le Chapitre 4 afin de valider les fonctions qui avaient besoin des résultats des tests. Finalement, une étude des points à améliorer dans le comportement du débobineur actif sera faite afin de faire ressortir des lacunes dans ce concept.

5.4.1 Conclusions sur les performances du débobineur actif

Le Tableau 5.2 regroupe les conclusions sur les performances des débobineurs mécaniques étudiés ainsi que du débobineur actif. La première colonne regroupe tous les paramètres utilisés comme base de comparaison. La dernière colonne indique si le débobineur actif apporte une amélioration pour le paramètre étudié. Ces conclusions sont tirées des Figures 3.17, 3.18, 3.19, 3.19, 5.6, 5.7 et 5.8. Certains champs pour le db.ACT ont été marquées par un * comme étant peu concluants. Il faut effectuer plus de tests de caractérisation avec le débobineur actif pour conclure à ces sujets.

Tableau 5.2 Tableau sommaire des paramètres de test

Paramètre	**db.SFCA**	**db.CTT**	**db.ACT**	**Amélioration**
Écart min-max	0.3 à 2.5 N	0.3 à 2.7 N	0.1 à 0.8 N	Oui
Écart-type	0.05 à 0.21 N	0.05 à 0.55 N	0.02 à 0.12 N	Oui
Moyenne influencée par la vitesse	Oui	Oui	Non	Oui
Écart min-max influencé par la vitesse	Oui	Oui	Peu concluant *	—
Écart-type influencé par la vitesse	Oui	Oui	Non	Oui
Moyenne influencée par le matériau	Oui	Oui	Non	Oui
Écart min-max influencé par le matériau	Oui	Oui	Peu concluant *	—
Écart-type influencé par le matériau	Oui	Oui	Non	Oui

Effectivement, les résultats des tests de caractérisation ont démontré que le comportement des débobineurs mécaniques était dépendant du matériau débobiné ainsi que de la vitesse de tressage. Ce n'est pas le cas pour le débobineur actif. De plus, l'écart entre la tension maximale et minimale ainsi que l'écart-type ont été

diminués par le débobineur actif. Cela signifie que durant le débobinage, les vibrations et les forces d'impact dans le fil sont grandement réduits, ce qui prévient la dégradation prématurée du fil durant le tressage. En somme, celui ci améliore tous les paramètres de caractérisation des débobineurs mécaniques.

5.4.2 Conclusions sur les requis techniques du débobineur actif

Il a été conclu que le débobineur actif produisait des performances identiques, invariant du type de matériau débobiné et de la vitesse de débobinage, ce qui satisfait la CO-9. Le débobineur offrait une force très constante, quantifiable par un écart-type inférieur à 0.1 N, ce qui satisfait la FP-4. En ce qui concerne la plage d'opération, la plus grande force que le débobineur actif pouvait générer dans le fil a été identifiée à 3.5 N. Il s'agit d'un problème qui a été détecté en cours de route. Ce problème sera détaillé dans la prochaine sous-section. Ainsi, la FP-3 est satisfaite en raison de la flexibilité que le client a accordé à cette fonction. Avec les tests oscillatoires effectués avec le débobineur actif, il a été prouvé que le débobineur était en mesure de rembobiner une longueur indéfinie de fil. D'ailleurs, pour la préparation des tests avec le débobineur actif, le fil brute a été embobinée sur la bobine en utilisant le débobineur actif plutôt que manuellement ou avec une machine. Ainsi, la FP-2 est satisfaite également. Ceci conclut la validation de toutes les fonctions du requis technique du débobineur actif.

5.4.3 Points à améliorer dans le comportement du débobineur actif

Durant tous les tests de caractérisation du débobineur actif, plusieurs comportements non-souhaités ont été identifiés. Tout d'abord, il faut préciser que le langage de programmation utilisé pour la réalisation de ce projet est Python, en raison de sa simplicité et de la grande quantité de documentation et de librairies disponibles pour contrôler tous les sous-systèmes. Il s'agit d'un langage de programmation qui est interprété, ce qui signifie qu'il n'y a pas de *multi-threading* réel qui se produit. La programmation du débobineur actif requiert implicitement de faire appel à du *multi-threading* pour interagir avec les divers composants. Ainsi, lors de l'acquisition des données (niveau de la batterie, rayon effectif du fil et accélérations ressenties par le débobineur), le langage de programmation produisait souvent des erreurs lorsque l'acquisition devait se faire à haute vitesse, surtout pour la mesure des accélérations. Il faut prendre en compte que durant le fonctionnement du débobineur actif, il y a toujours un *thread* qui s'exécute dans une boucle infinie pour assurer une communication avec le serveur MQTT. Pour les tests de caractérisation, l'acquisition des données a été établie à 1 seconde pour le rayon effectif du fil, à 10 secondes pour le voltage de la batterie, et les mesures des accélérations ont été supprimées parce qu'elles causaient souvent des problèmes. Il faudrait peut-être utiliser dans le futur un autre langage de programmation qui est compilé plutôt qu'interprété pour permettre du vrai *multi-threading* et pour augmenter la rapidité d'exécution du code.

En ce qui concerne la consigne en couple pour le débobineur actif, elle ne produit pas le même couple réel dans la bobine parce qu'à la base, l'asservissement par couple est approximé par une constante de couple théorique. Par exemple, lorsque le RPi demandait au BDDrive un couple de 0.04 Nm et que le bras de levier mesuré était de 25 mm, la force mesurée était de 2 N plutôt que de 1.6 N. Dans le cadre de travaux futurs, il faudra étalonner chaque débobineur actif pour pouvoir compenser pour ces écarts afin que la consigne demandée corresponde bel et bien à ce qui est exécuté.

Le circuit de contrôle BDDrive a été développé en utilisant les schémas *Open Source* du ODrive original, mais une modification majeure a été apportée : des résistances shunt plus grandes ont été choisies pour la mesure du courant dans les trois phases du moteur (initialement, les résistances shunt sur le ODrive étaient

de $500\mu\Omega$, mais le BDDrive utilise des résistances shunt de $15m\Omega$). Ce changement a été apporté dans le but d'augmenter la précision dans la lecture du courant et donc de permettre un meilleur contrôle des moteurs à bas courant. Cela a eu pour effet de diminuer la plage de lecture du courant de 90 A jusqu'à 8 A. Lorsque le mandat de développement du BDDrive a été lancé, une plage de lecture du courant allant jusqu'à 8 A a été jugée adéquate selon les tests préliminaires qui avaient été faits. Toutefois, avec le débobineur actif (et spécifiquement avec le moteur Keda 27-28), il a été possible de constater que la force maximale (contrôlable) que le débobineur peut produire est de 3.25 N. Même si des consignes plus élevées sont envoyées au BDDrive, ce dernier n'est pas capable de fournir plus de 8 A dans le moteur, ce qui se traduit par une force maximale de 3.25 N. Il faudrait donc envisager la possibilité de modifier les résistances shunt au besoin.

Finalement, un dernier point important à mentionner est la génération de chaleur dans le moteur durant son opération. Les tests de caractérisation étaient réalisés au complet du début à la fin sans prendre de pause entre chaque test. Arrivé à la fin du test, lorsque le moment était venu de remplacer la bobine avec fil de nylon par la bobine avec fibre de verre, le moteur était brulant et donc impossible à toucher. Il était suffisamment chaud pour dépasser la température de transition vitreuse du plastique (PLA) de la bobine qui était en contact avec le moteur. Cette chaleur a déformé légèrement la bobine. Ainsi, lors de travaux futurs, il faudrait prévoir des solutions pour diffuser la chaleur du moteur. Des tests préliminaires ont été faits avec d'autres types de moteurs BLDC. Ces moteurs étaient plus gros, alors ils ne présentaient pas de problèmes thermiques. Cependant, en raison de leur plus grande taille, ils produisaient des vibrations dans le fil à cause de l'embobinage interne du cuivre qui utilisait du fil grossier. Il semble donc y avoir un compromis à faire entre la diminution des vibrations du moteur et la dissipation de chaleur.

5.5 Conclusions sur la caractérisation du débobineur actif

Ce chapitre a traité des tests de caractérisation du débobineur actif. La même méthodologie et le même matériel ont été utilisés pour caractériser les débobineurs mécaniques et le débobineur actif. Un test oscillatoire a été soumis au débobineur actif et celui-ci a été capable de maintenir le fil tendu pour des consignes supérieures à 0.01 Nm. Des paramètres de compensation inertielle seront optimisés lors de travaux futurs. Une analyse des résultats a été faite et elle démontre que le débobineur actif offre des performances supérieures aux débobineurs mécaniques. La force moyenne dans le fil, contrôlable en temps réel par technologie WiFi, peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 N et 3.5 N. L'écart-type varie entre 0.02 N et 0.1 N et il est invariant du type de matériau débobiné. Les performances entres les débobineurs ont été comparées et les requis techniques du débobineur actif ont été validés. Les besoins du client sont globalement atteints, à l'exception de certains requis techniques qui demandent plus de tests (tel que l'autonomie du débobineur). Ceux-ci feront partie de travaux futurs. Finalement, une courte discussion de points à améliorer a été faite dans le but d'encadrer des travaux futurs potentiels. Parmi ces points à améliorer, la surchauffe du moteur pour des longues durées d'utilisation est un problème majeur qui doit être adressé.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

Ce projet de recherche est composé de trois objectifs principaux : la caractérisation de débobineurs mécaniques, le développement d'un débobineur actif et la caractérisation du débobineur actif. La revue de littérature a identifié plusieurs enjeux sur les procédés de tressage circulaire et 3D. Les débobineurs mécaniques engendrent du frottement et des vibrations dans le fil, ce qui l'use de manière prématurée. La force de tension est ajustable manuellement par des ressorts à l'intérieur de chacun des débobineurs. Le mécanisme de relâchement de la fibre avec le bras de levier engendre des coups d'impact dans le fil, et cette énergie est absorbée par le fil, ce qui peut causer le bris des filaments les plus faibles. Les débobineurs traditionnels ne peuvent pas rembobiner suffisamment de fibre pour effectuer adéquatement du tressage 3D. La force de tension dans la fibre influence les principaux paramètres de tressage — le ratio de couverture et l'angle de tressage — et le contrôle de ces paramètres est important pour obtenir des pièces avec des propriétés mécaniques optimales.

Le premier objectif de recherche — la caractérisation de débobineurs mécaniques — a été atteint parce qu'il a été possible d'étudier le comportement des débobineurs. Plus précisément, il a été possible de quantifier la variation de la force durant le débobinage par une moyenne, un écart-type ainsi qu'un écart entre la force minimale et maximale. Le db.SFCA avec les différents ressorts pouvait produire des tensions moyennes allant de 0.25 N jusqu'à 1.4 N. L'écart-type se trouvait entre 0.05 N et 0.21 N, et l'écart entre la force minimale et maximale était entre 0.3 N et 2.5 N. Le db.CTT pouvait produire avec les différents ressorts une tension moyenne entre 0.75 N et 3.75 N. L'écart-type se trouvait entre 0.05 N et 0.55 N, et l'écart entre la force minimale et maximale était entre 0.3 N et 2.7 N. Il a été conclu que le paramètre principal qui déterminait la variation de la tension durant le débobinage est le type de ressort utilisé. D'autres facteurs d'influence ont été identifiés, mais il n'était pas possible d'isoler leur importance sur le comportement général.

Le second objectif de recherche — le développement d'un débobineur actif — a été atteint parce qu'un prototype de débobineur actif a été fabriqué. Une méthodologie de design adaptée a été utilisée pour monter les requis techniques du débobineur actif. Les besoins du client ont été identifiés et associés à des métriques. Ces métriques ont servi à mettre au point des fonctions principales, complémentaires et contraintes. Finalement, une méthode de génération de concepts a été employée pour faire ressurgir la solution finale. Les critères principaux dans l'obtention du concept final étaient la facilité d'intégration des composantes et la réduction des coûts matériels. Le développement du débobineur actif a permis le dépôt d'un brevet sur la technologie.

Le troisième objectif de recherche — la caractérisation du débobineur actif — a été atteint parce qu'il a été possible d'étudier le comportement du prototype, de valider le cahier des charges et de comparer ses performances avec les débobineurs mécaniques. Le même plan d'expérience a été suivi pour la caractérisation. Il a été possible de conclure que le comportement du débobineur actif était entièrement indépendant du type de matériau déroulé et de la vitesse de débobinage. Il était possible de commander par WiFi la consigne en couple du moteur pour réaliser des forces moyennes de tension entre 0 N et 3.5 N. L'écart-type se trouvait entre 0.02 N et 0.12 N, et l'écart entre la force minimale et maximale se trouvait entre 0.1 N et 0.8 N. Lors des tests de débobinage avec un chargement oscillatoire, le débobineur actif était capable de rembobiner autant de fil que nécessaire pour le maintenir tendu. Finalement, le cahier des charges a été validé avec les résultats de la caractérisation.

6.1 Limitations du projet de recherche

Bien que ce projet de recherche ait suivi une méthodologie rigoureuse basée sur la littérature scientifique, plusieurs limitations et hypothèses ont été imposées afin de réduire l'ampleur du projet. Ces limitations ont été choisies dans le but de réduire les couts matériels et temporels liés au projet de recherche. Elles ouvrent également la porte à des travaux futurs.

Tout d'abord, dans le premier objectif de recherche — la caractérisation des débobineurs mécaniques — uniquement deux modèles de débobineurs traditionnels ont été mis à disposition pour ce projet. Il existe dans l'industrie plusieurs modèles différents qui peuvent être utilisés sur des machines de tressage alors les conclusions tirées sur la caractérisation des débobineurs mécaniques ne s'appliquent pas forcément à tous les types de débobineurs. Il pourrait exister un type de débobineur traditionnel qui n'a pas été identifié lors de la revue de littérature, et qui pourrait offrir des performances supérieures à celles des deux débobineurs étudiés.

De plus, uniquement deux matériaux ont été testés : le fil de nylon et de la fibre de verre. Il a été conclu lors de la caractérisation des débobineurs traditionnels que les forces de frottement pouvaient varier selon le type de matériau, ce qui pouvait affecter l'allure temporelle de la variation de la tension. Il est donc possible qu'avec d'autres matériaux, il puisse y avoir des conclusions différentes.

Concernant le débobineur actif, le concept final possède plusieurs limitations. La masse du débobineur est environ trois fois supérieure à celle des débobineurs traditionnels — 1.4 kg versus 0.4 à 0.5 kg. Cela peut engendrer des contraintes mécaniques dans le boitier du débobineur qui pourraient affecter ses performances ou engendrer des bris. Étant donné que l'objectif du projet de recherche était le développement d'un nouveau concept de débobineur, il n'était pas demandé de valider le fonctionnement du débobineur dans une machine de tressage. Il n'est donc pas possible de conclure s'il peut réellement produire des pièces tressées ayant de meilleures propriétés mécaniques que les débobineurs traditionnels. De plus, des calculs théoriques ont démontré que la batterie choisie ne produisait pas une autonomie minimale de 6 heures, tel que demandé par le client. Le concept a été retenu malgré tout parce qu'il faut effectuer des tests sur une machine de tressage pour valider le requis sur l'autonomie du débobineur.

Lors des tests de caractérisation du débobineur actif, un problème de chauffe du moteur a été détecté. Effectivement, après plusieurs tests consécutifs, le moteur du débobineur actif devenait chaud au point où le plastique de la bobine de fibre atteignait sa température de transition vitreuse et commençait à se déformer. Ce phénomène indésirable peut être problématique parce que si le moteur devient assez chaud pour déformer la bobine en PLA (*polylactic acid*) après une dizaine de minutes, alors il est clair qu'après plusieurs heures de fonctionnement, le moteur risque de brûler. Le concept final a été réalisé malgré le problème de dissipation de chaleur. Ce problème sera remédié lors de développements futurs.

Finalement, les tests de caractérisation du débobineur actif ont été réalisés en contrôlant un seul débobineur à la fois. Bien que la technologie de communication sans fil permette le contrôle en temps réel de plusieurs débobineurs simultanément, cela n'a pas été testé. Effectivement, pour valider cette contrainte de conception, il aurait fallu effectuer des tests de tressage sur une tresseuse avec plusieurs débobineurs actifs fonctionnant simultanément. Il n'est donc pas possible de conclure sur la latence et sur les performances du contrôle sans fil des débobineurs.

6.2 Travaux futurs

Lors de travaux futurs, il sera primordial de tester les débobineurs actifs sur la machine de tressage maypole du LabSFCA. Effectivement, à travers ces tests, il sera possible de vérifier l'autonomie des débobineurs ainsi que le comportement de celui-ci en opération. Plusieurs matériaux pourront être testés afin de conclure sur les performances du débobineur et plusieurs vitesses de tressage pourront être utilisées. Il faudra tout d'abord trouver une solution technique pour résoudre le problème de chauffe du moteur avant de procéder à des tests. Il sera possible de fabriquer des échantillons avec les débobineurs actifs et de comparer leur propriétés mécaniques avec des échantillons fabriqués avec les débobineurs traditionnels. De plus, il sera possible d'effectuer un tressage avec force variable durant le procédé afin d'analyser un nouveau type d'échantillons.

À partir de ce point, le design du débobineur actif pourra être optimisé et par la suite envoyé en production. La détention du brevet sur le débobineur actif permettra à des partenaires industriels de se l'approprier pour optimiser le concept encore plus et développer des nouveaux procédés de fabrication. Concernant l'aspect logiciel du débobineur, des optimisations pourront être effectuées. Effectivement, le langage de programmation Python n'est pas le plus rapide et ne permet pas d'effectuer du multi-threading pour gérer tous les processus simultanément (lecture des accélérations, lecture du bras de levier effectif, lecture du voltage de la batterie, exécution du client MQTT pour la communication sans-fil, etc.). Cela implique de devoir développer une architecture informatique plus optimisée. De plus, le circuit électrique de contrôle du moteur BLDC pourra être optimisé pour regrouper plus de composants et ainsi réduire la complexité du câblage électrique.

Pour finir, il faudra mettre au point un logiciel de contrôle des débobineurs actifs pour l'opérateur. Un poste de travail devra être fabriqué ainsi que l'infrastructure informatique sans fil. Le poste de travail sera annexé à la machine de tressage du LabSFCA pour que l'opérateur puisse contrôler les débobineurs pendant le tressage adéquatement. Durant le procédé de tressage, le logiciel de contrôle devra effectuer l'acquisition de données et les sauvegarder dans une base de données pour des fins d'analyse après la fabrication. L'analyse des données post-fabrication permettra de détecter des motifs qui pourront réaliser des pièces avec des meilleures performances, et ainsi optimiser les paramètres pour la machine. Ces bases de données permettront d'ouvrir les portes à des optimisation faisant appel à des algorithmes d'intelligence artificielle.

RÉFÉRENCES

[1] G. Ma, D. J. Branscomb et D. G. Beale, “Modeling of the tensioning system on a braiding machine carrier,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 47, n°. 1, p. 46–61, 2012. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.08.008

[2] A. E. Bogdanovich, *1 - An overview of three-dimensional braiding technologies.* Woodhead Publishing, 2016, p. 3–78. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004074000016

[3] M. Lengersdorf et T. Gries, *3 - Three-dimensional (3D)-maypole braiding.* Woodhead Publishing, 2016, p. 89–105. [En ligne]. Disponible : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008100407400003X

[4] Y. Liu, Q. Fang et Y. Ke, “Modeling of tension control system with passive dancer roll for automated fiber placement,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, 2020, automated placements ;Disturbances attenuation ;Maximum acceleration ;Mixed sensitivity ;Real-time compensations ;Tension control systems ;Tension disturbance ;Velocity variations ;. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1155/2020/9839341

[5] S. Maidl *et al.*, “Investigating the unwinding behavior of technical yarns and development of a new sensor system for the braiding process,” dans *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, vol. 406. Institute of Physics Publishing, 2018, Conference Proceedings. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/406/1/012065

[6] *Raspberry Pi 4 model B*, RaspberryPi Foundation. [En ligne]. Disponible : https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/

[7] F. Ko, C. Pastore et A. Head, *Atkins & Pearce Handbook of Industrial Braiding.* Atkins & Pearce, 1990. [En ligne]. Disponible : https://books.google.ca/books?id=XugKGwAACAAJ

[8] K. Bilisik, “Three-dimensional braiding for composites : A review,” vol. 83, n°. 13, p. 1414–1436, 2013. [En ligne]. Disponible : https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0040517512450766

[9] F. Schreiber, *2 - Three-dimensional hexagonal braiding.* Woodhead Publishing, 2016, p. 79–88. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004074000028

[10] A. Bogdanovich et D. Mungalov, “A novel 3-d braiding technology, complex shape preforms and composites,” dans *2002 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 17, 2002 - November 22, 2002*, ser. American Society of Mechanical Engineers, Textile Engineering Division (Publication) TED, vol. 2. American Society of Mechanical Engineers, Conference Proceedings, p. 31–36.

[11] Y. J. Zhang *et al.*, “Modeling and analysis of carbon fiber carrier tension systems used in 3d braiding machine,” *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 14, 2019.

[12] P. Potluri *et al.*, “Geometrical modelling and control of a triaxial braiding machine for producing 3d preforms,” dans *ICMAC 2001. International Conference for Manufacturing of Advanced Composites, 26-27 Sept. 2001*, ser. Compos. A, Appl. Sci. Manuf. (UK), vol. 34A. Elsevier, Conference Proceedings, p. 481–92. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00061-7

[13] W. Li, M. Hammad et A. El-Shiekh, “Effect of braiding process on the damage tolerance of 3-d braided graphite/epoxy composites,” dans *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*, vol. 34. Publ by SAMPE, Conference Proceedings, p. 2109–2117.

[14] S. Yan *et al.*, “Effect of braiding angle on the impact and post-impact behavior of 3d braided composites,” *Strength of Materials*, vol. 49, n°. 1, p. 198–205, 2017. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1007/s11223-017-9858-4

[15] D.-S. Li *et al.*, “Influence of braiding parameters on the dynamic compressive properties and failure mechanism of 3d braided composites,” *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 21, n°. 9, p. 716–721, 2014. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1080/15376494.2012.707300

[16] S. S. Roy, W. Zao et P. Potluri, *Influence of braid carrier tension on carbon fibre braided preforms*, ser. Recent Developments in Braiding and Narrow Weaving. Springer International Publishing, 2016, p. 91–102. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-29932-7_9

[17] Q. Zhang, D. Beale et R. M. Broughton, “Analysis of circular braiding process, part 1 : Theoretical investigation of kinematics of the circular braiding process,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 121, n°. 3, p. 345–350, 1999. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1115/1.2832687

[18] Q. Zhang *et al.*, “Analysis of circular braiding process, part 2 : Mechanics analysis of the circular braiding process and experiment,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 121, n°. 3, p. 351–359, 1999. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1115/1.2832688

[19] A. K. Pickett, J. Sirtautas et A. Erber, “Braiding simulation and prediction of mechanical properties,” *Applied Composite Materials*, vol. 16, n°. 6, p. 345–64, 2009. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1007/s10443-009-9102-x

[20] C. Ebel, A. Mierzwa et K. Kind, *13 - Yarn damage during braiding of reinforcement fibers for composites.* Woodhead Publishing, 2016, p. 319–354. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004074000132

[21] M. Bulat *et al.*, *15 - Braided carbon fiber composites.* Woodhead Publishing, 2016, p. 383–394. [En ligne]. Disponible : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004074000156

[22] W. Zhiqiang *et al.*, “No-tension sensor closed-loop control method with adaptive pi parameters for two-motor winding system,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, p. 1851845 (14 pp.), 2018. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1155/2018/1851845

[23] R. Czichos *et al.*, “Influence of process induced defects for biaxial carbon fiber braids,” dans *IOP Conf. Ser., Mater. Sci. Eng. (UK)*, vol. 406. IOP Publishing, 2018, Conference Proceedings, p. 012047 (10). [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/406/1/012047

[24] S. T. Peters, *6.2 The Filament Winding Machine System.* ASM International. [En ligne]. Disponible : https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009IA433/composite-filament-winding/filament-winding-machine

[25] X. Xiao-Ming *et al.*, “Design and analysis of a novel tension control method for winding machine,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 31, n°. 1, p. 101 (16 pp.), 2018. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1186/s10033-018-0304-8

[26] P. Mertiny et F. Ellyin, “Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites,” *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, n°. 12, p. 1615–1622, 2002. [En ligne]. Disponible : http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00209-9

[27] R. Sheng-le *et al.*, “A new fiber winding precisiong tension control system,” dans *2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Conference Proceedings, p. 233–236.

[28] W. Podsiedlik et J. Wojtysiak, “Multi-barrier electromagnetic tensioner for control of yarn tension in processing,” ser. Fibres and Textiles in Eastern Europe, vol. 14. Institute of Biopolymers and Chemical Fibres, Conference Proceedings, p. 125–128.

[29] T. Von Reden, *Erweiterung der Systemgrenzen der Flechttechnik durch elektronisch gesteuerte Klöppel.* Verlag Dr. Hut, 2015.

[30] K. B. Gries T., Reimer V., *Self-optimisation of the Radial Braiding Process.* RWTH Publications, 2015.

[31] “Calculator for round wire helical springs.” [En ligne]. Disponible : https://www.tribology-abc.com/calculators/t14_1.htm

[32] “Music wire - astm a 228 - spring wire properties.” [En ligne]. Disponible : https://optimumspring.com/technical_resources/materials/carbon_steels/music_wire_228_spring_wire.aspx

[33] *Very Low Noise, 24-Bit Analog-to-Digital Converter*, Texas Instruments, 2003, rev. K. [En ligne]. Disponible : https://www.ti.com/product/ADS1256

[34] *ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator*, Texas Instruments, 2009, rev. D. [En ligne]. Disponible : https://www.ti.com/product/ADS1115

[35] *Raspberry Pi OS*, RaspberryPi Foundation. [En ligne]. Disponible : https://www.raspberrypi.com/software/operating-systems/

[36] “Calculator for round wire helical springs,” 2017. [En ligne]. Disponible : https://www.agy.com/wp-content/uploads/2017/06/2017-Tech-Prod-Guide.pdf

[37] “Fourier transforms (scipy.fft) - scipy v1.7.1 manual.” [En ligne]. Disponible : https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/tutorial/fft.html

[38] J. W. Cooley et J. W. Tukey, “An algorithm for the machine calculation of complex fourier series,” *Mathematics of computation*, vol. 19, n°. 90, p. 297–301, 1965.

[39] K. T. Ulrich et S. D. Eppinger, *Product design and development*, 6e éd. McGraw-Hill Education, 2016.

[40] *ODrive - High performance motor control*, ODrive Robotics. [En ligne]. Disponible : https://odriverobotics.com/

ANNEXE A COMMUNICATION SPI

Le protocole de communication SPI s'effectue sur quatre fils (connections) :

- *CS, Chip select* : le maître applique un signal logique pour indiquer au composant qu'il y aura un début de communication
- *SCLK, Slave Clock* : le maître applique un signal carré périodique constant pour synchroniser l'horloge durant la communication
- *MOSI, Master Output Slave Input (aussi dénommé DIN,* Data IN : le maître envoi une ou plusieurs séquences d'octets qui correspond à des commandes prédéfinies et interprétables par le circuit esclave
- *MISO, Master Input Slave Output (aussi dénommé DOUT,* Data OUT : l'esclave envoi une ou plusieurs séquences d'octets qui correspond à la réponse aux commandes du maître

Pour donner un exemple concret de ce protocole, voici une séquence classique qui se produit lors de l'acquisition. L'ordre de grandeur de la vitesse de transfert de l'information par SPI est de 2MHz. La seule particularité de ce module d'acquisition est qu'il utilise le port *DRDY - Data Ready* - pour indiquer au maître que les données sont prêtes à être envoyées. La Figure A.1 présente les étapes de communication décrites par la liste qui suit.

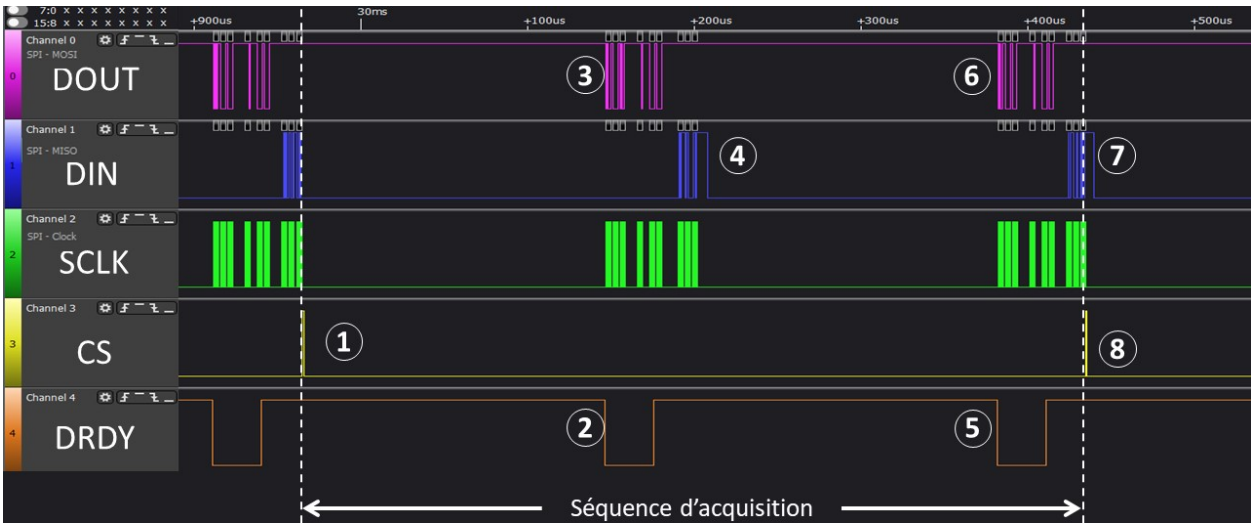


Figure A.1. Séquence de communication par SPI entre le ADS1256 et un ordinateur maître pour la lecture de deux canaux différentiels

1. Le maître applique un changement logique de 5V à 0V sur le port CS du CAN
2. Le maître attend que l'esclave engendre un changement logique sur le port DRDY de 5V à 0V (cela indique que des données sont prêtes à être envoyées)
3. Le maître envoi une commande pour choisir un canal différentiel pour la **prochaine** lecture
4. L'esclave envoi au maître les données lues lors de l'étape 2

5. Le maître attend que l'esclave engendre un changement logique sur le port DRDY de 5V à 0V (cela indique que des données sont prêtes à être envoyées)
6. Le maître envoi une commande pour choisir un canal différentiel pour la **prochaine** lecture
7. L'esclave envoi au maître les données lues lors de l'étape 5
8. Lors de la fin de la séquence d'acquisition, le maître applique un changement logique de 0V à 5V sur le port CS du CAN pour indiquer la fin de la communication

On peut constater la particularité pour la lecture de deux canaux différentiels : il y a un décalage entre la sélection du canal à lire (étapes 3 et 6) et les données lues (étapes 4 et 7). Ce décalage est présenté plus en détails dans la fiche technique du ADS1256 [33]. Une fois que l'échange est terminé, l'ordinateur de contrôle se charge de traiter les données. Cette étape sera présentée plus loin dans cette sous-section.

ANNEXE B RESSORTS HERZOG

Un extrait de la fiche technique des ressorts du db.CTT (débobineur de marque Herzog) est affichée sur la Figure B.1. Les ressorts qui sont utilisés pour les tests de caractérisation sont surlignés en jaune. On remarque que les informations données sont le diamètre du fil métallique, le nombre de spires du ressort ainsi que la force de tension en grammes dans la fibre produite (statique et dynamique) par les débobineurs de marque IFDA80 et IFDA100. Le débobineur fourni par le Groupe CTT est le IFDA100.

			stat.	dyn.	stat.	dyn.				
23	1.25	61			850	800	5018	Türkisblau	cyan blue	bleue-turquoise
22	1.25	59			800	750	1021	Rapsgelb	rape yellow	jaune colza
21	1.25	57			600	550	1014	Elfenbein	ivory	ivoire
17	1.25	64			950	900	2000	gelborange	yellow-orange	jaune-orange
16	0.8	90			250	160	7032	hellgrau	light gray	gris clair
15	1.25	58			700	650	4006	Verkehrspurpur	traffic purple	poupre
14	0.9	100			350	220	3015	rosa	pink	rose
13	1.25	56			500	450	1028	Melonengelb	Melon yellow	Jaune melon
11	0.8	110			200	140	8001	hellbraun	light brown	brun clair
10	0.7	90			130	115	3003	dunkelrot	dark red	rouge fonce
9	0.7	106			115	90	6002	dunkelgrün	dark green	vert fonce
8	0.63	95	140	90	100	70	9006	silber	silver	agent
7	0.63	106	120	75	90	65	6018	hellgrün	light green	vert clair
6	0.6	99	100	55	80	40	5012	hellblau	light blue	bleu clair
5	0.6	119	80	50	65	30	5002	dunkelblau	dark blue	bleu fonce
4	0.5	71	70	40			9005	schwarz	black	noir
3	0.5	91	55	35			2002	hellrot	light red	rouge clair
2	0.5	136	35	25			1012	gelb	yellow	jaune
1	0.4	107	20	15			9001	weiß	white	blank
Pos. item Pos.	Drahtstärke thickness of wire Ø du fil metallique	Windungen windings nombre de spiraux	IFDA80		IFDA100		Kennfarbe nach RAL colours acc. RAL couleurs ci-dessus selon RAL			
			Zugkraft am Faden in g tension load traction au fil							

Figure B.1. Extrait de la fiche technique du débobineur IFDA100 par Herzog

ANNEXE C ÉQUATION APPROXIMATIVE DU PARCOURS D'UN DÉBOBINEUR

Une équation mathématique a été trouvée pour approximer le déplacement des débobineurs traditionnels dans la machine de tressage du LabSFCA. Cette machine possède un modèle 3D déjà fait et il est donc possible de connaitre les divers paramètres géométriques de la machine. La Figure C.1 montre le CAD de la machine de tressage avec des débobineurs ainsi que des flèches pour identifier les divers mouvements possibles. L'équation C.1 présente une approximation du parcours réel des débobineurs. On y voit notamment v_0 la vitesse de tressage [mm/s], h la distance verticale entre les débobineurs et le point de tressage [mm], r_0 et r_1 les deux rayons caractéristiques du circuit *maypole* [mm] et ω_0 la vitesse angulaire de tressage [deg/sec]. On retrouve également le pas de temps k [sans unités], L_0 la longueur initiale [mm], T_s le temps de discrétisation [sec], b le paramètre d'aplatissement des fonctions trigonométriques [sans unités] et n le nombre de débobineurs installés dans la machine.

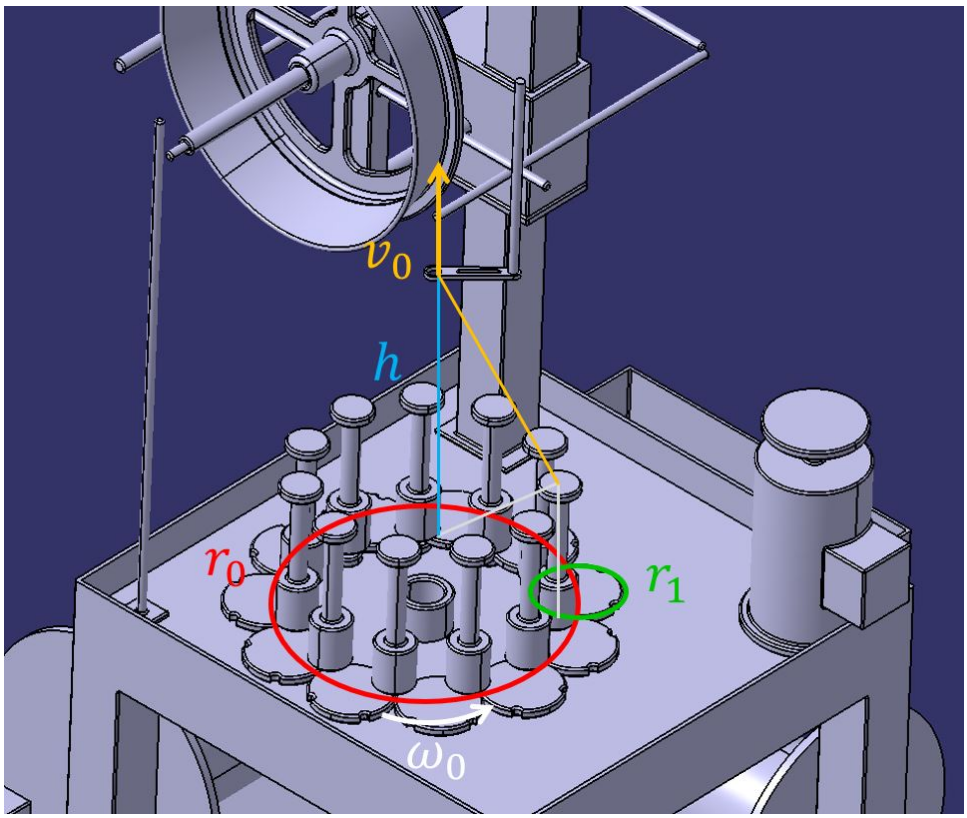
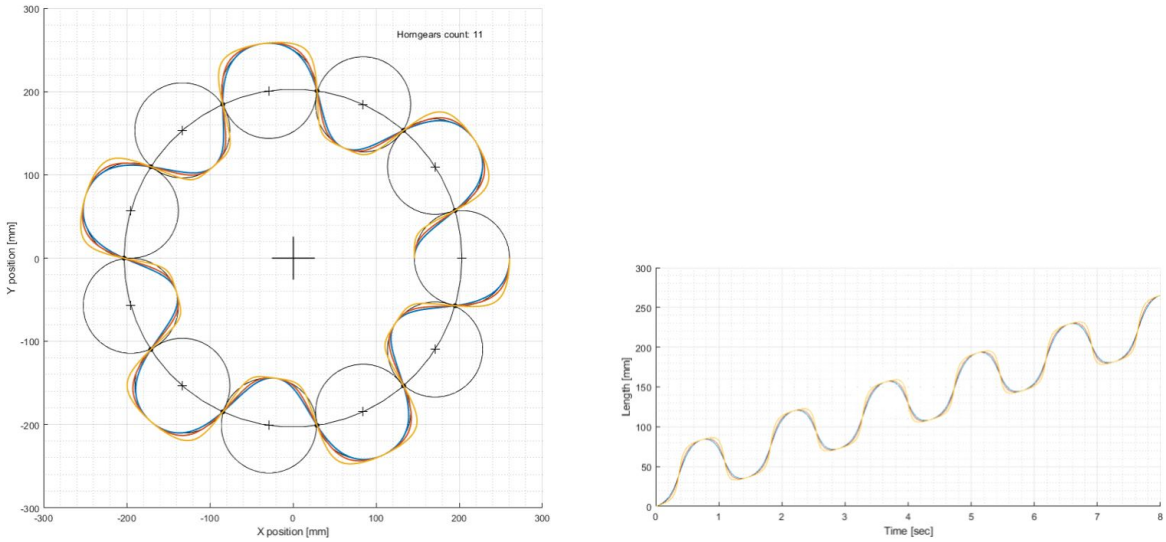


Figure C.1. Vue isométrique du déplacement des débobineurs dans la machine du LabSFCA

$$L(kT_s) = \sqrt{h^2 + \left(r_0 - r_1 \cdot \cos\left(\frac{\omega_0 k T_s n}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{1+b^2}{1+b^2 \cdot \cos^2(\frac{\omega_0 k T_s n}{2})}}\right)^2} + v_0 k T_s - L_0 \tag{C.1}$$

La Figure C.2a montre les courbes calculées avec divers coefficients b et la Figure C.2b montre la variation de longueur dans la fibre qui est engendrée.



(a) Courbes approximatives du parcours *maypole* des débobineurs

(b) Variation de la longueur de débobinage

Figure C.2. Diagrammes fonctionnels du capteur de force dans la fibre

ANNEXE D MÉTHODOLOGIE D'ACQUISITION

Avant le début de la séance de tests

L'opérateur doit suivre la procédure suivante lors du commencement d'une séance de tests :

1. Démarrer l'ordinateur de travail ainsi que l'ordinateur de contrôle du banc de tests
2. Brancher le boitier d'alimentation du banc de tests au mur (110-220V)
3. S'assurer que l'ordinateur de travail et celui du banc de tests aient la version la plus récente des fichiers
4. Démarrer l'interface graphique du banc de tests

Avant le début d'un test

L'opérateur doit suivre la procédure suivante lors du commencement d'un seul test :

1. Vérifier dans l'interface graphique que le moteur du banc de tests effectue adéquatement sa calibration d'encodeur initiale
2. Vérifier que le bon débobineur est installé et qu'il possède une bobine de fibre (ou de fil de nylon) bien garnie
3. Attacher le fil du débobineur sur l'axe motorisé du banc de tests
4. Ajuster dans l'interface graphique tous les paramètres de test (couleur du ressort, vitesse de débobinage, numéros du capteur de force et de rayon, type de débobineur, durée du test et le numéro du test)
5. Effectuer un premier test préliminaire pour valider que le fonctionnement est adéquat et pour s'assurer qu'il y a quelques tours de fibre déjà embobinés sur l'axe du moteur
6. Effacer les fichiers *.csv* pour le test préliminaire
7. Tourner légèrement le moteur du banc de tests pour que la fibre soit *molle* dans le système de mesure de la force
8. Peser sur un bouton de calibration pour remettre la force mesurée à zero (tel que pour une balance) et suite au message de confirmation tourner le moteur à nouveau pour que la fibre ne soit plus *molle*
9. Valider une dernière fois dans l'interface graphique que tous les paramètres de test (couleur du ressort, vitesse de débobinage, numéros du capteur de force et de rayon, type de débobineur, durée du test et le numéro du test) sont adéquats
10. Peser sur le bout *start* pour débuter le test

Pendant un test

L'opérateur doit suivre la procédure suivante pendant que le banc de tests effectue un test de caractérisation :

1. Regarder le chiffre indiquant le progrès dans l'interface graphique et la rotation du moteur
2. Préparer le curseur sur le bouton *stop* de l'interface graphique
3. Si le moteur arrête de tourner, mais que le chiffre indiquant le progrès continue d'augmenter, il faut arrêter le test et redémarrer l'interface graphique
4. Si la fibre brise, ou s'il y a une irrégularité lors du test, il faut l'arrêter, redémarrer l'interface graphique et ensuite refaire le test

5. S'il y a d'autres irrégularités, il faut débrancher le boitier d'alimentation du banc de tests et redémarrer l'interface graphique

À la fin d'un test

L'opérateur doit suivre la procédure suivante à la fin d'un test de caractérisation :

1. Attendre que l'écriture du fichier *.csv* et que la sauvegarde de l'image du test s'effectue (peut prendre jusqu'à 1 minute)
2. Vérifier l'allure de l'image du test. S'il y a des irrégularités, il faut refaire le test
3. Vérifier que la fibre et que le débobineur n'ont pas d'irrégularités (fibre cassée ou qui ne passe plus au travers des poulies tel que prévu)
4. Suivre la procédure pour la réalisation du prochain test

À la fin d'une séance de tests

L'opérateur doit suivre la procédure suivante à la fin d'une séance de tests :

1. Débrancher le boitier d'alimentation du banc de tests
2. Synchroniser les fichiers de tests sur *GitLab* entre l'ordinateur du banc de tests et l'ordinateur de travail
3. Éteindre l'ordinateur du banc de tests
4. Enlever la fibre rembobinée (facultatif)

ANNEXE E RÉSULTATS DE CARACTÉRISATION DES DÉBOBINEURS TRADITIONNELS

Dans cette section, on présente tous les graphiques qui ont été générés à partir des résultats de tests. La présentation des résultats se fera selon la structure suivante :

- Résultats du débobineur du LabSFCA
  - Résultats avec fil de nylon
    - Présentation des graphiques et descriptions des points importants sur les graphiques
  - Résultats avec fibre de verre
    - Présentation des graphiques et descriptions des points importants sur les graphiques
- Résultats du débobineur du CTT
  - Résultats avec fil de nylon
    - Présentation des graphiques et descriptions des points importants sur les graphiques
  - Résultats avec fibre de verre
    - Présentation des graphiques et descriptions des points importants sur les graphiques

Résultats du db.SFCA avec fil de nylon

Les Figures E.1 à E.5 illustrent la variation de la force pour chaque couleur de ressort en superposant un test par vitesse de débobinage avec le fil de nylon.

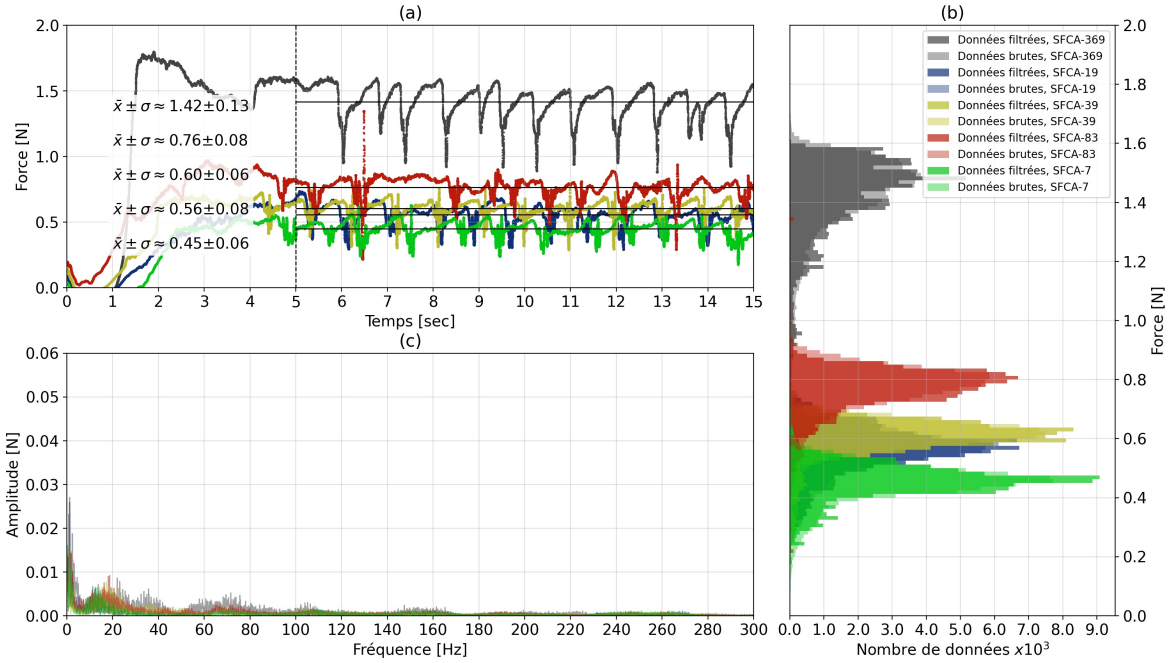


Figure E.1. Tous les ressorts du db.SFCA avec fil de nylon, un test par échantillon pour un débobinage de 25mmps

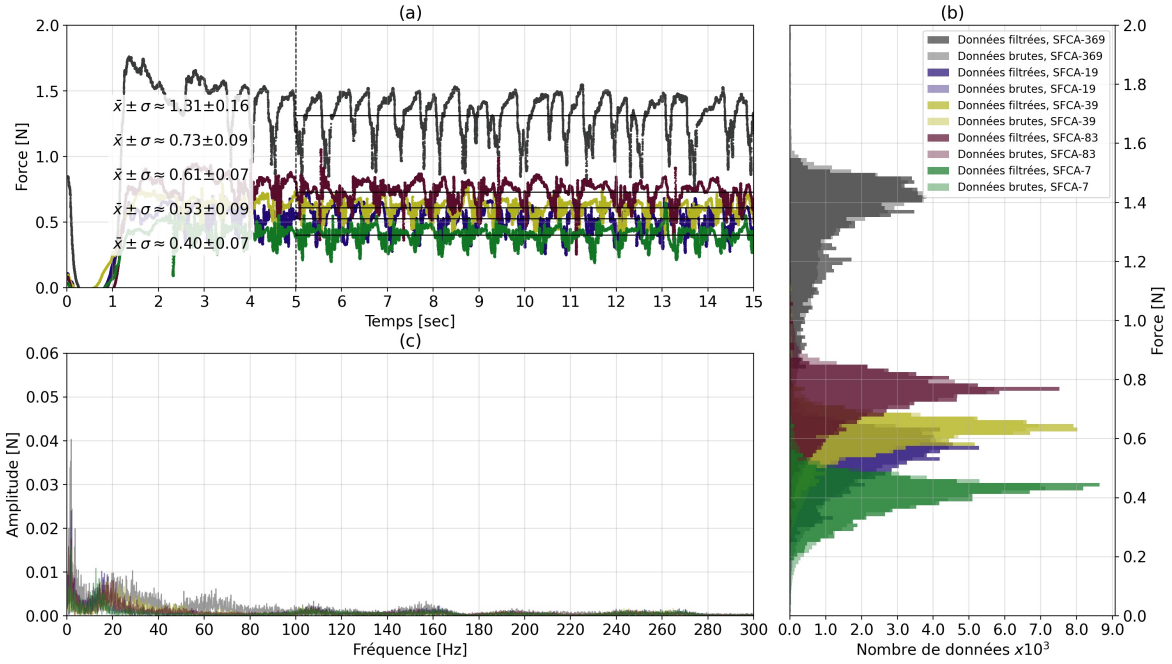


Figure E.2. Tous les ressorts du db.SFCA avec fil de nylon, un test par échantillon pour un débobinage de 50mmps

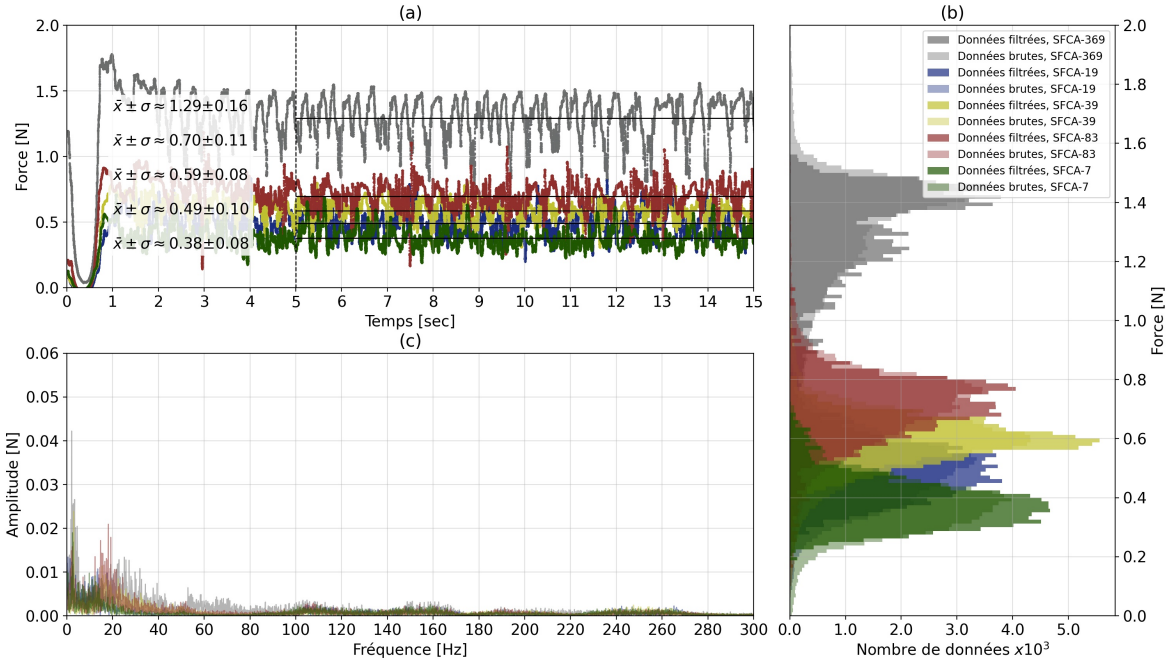


Figure E.3. Tous les ressorts du db.SFCA avec fil de nylon, un test par échantillon pour un débobinage de 100mmps

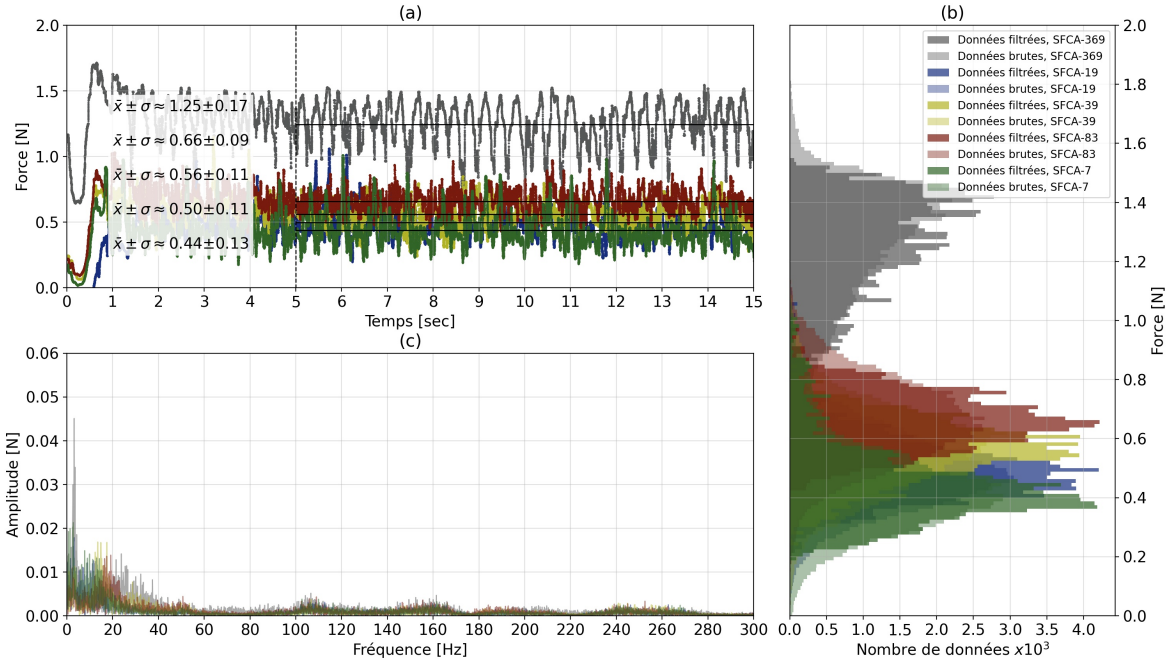


Figure E.4. Tous les ressorts du db.SFCA avec fil de nylon, un test par échantillon pour un débobinage de 150mmps

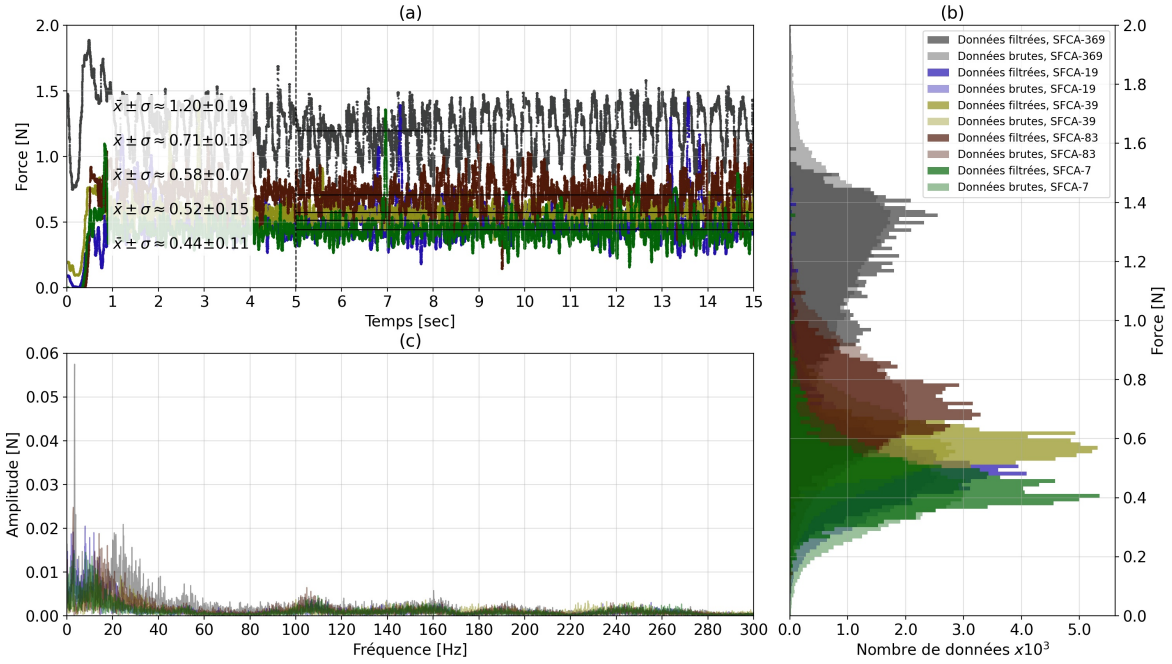


Figure E.5. Tous les ressorts du db.SFCA avec fil de nylon, un test par échantillon pour un débobinage de 250mmps

Les Figures E.6 à E.10 superposent les trois échantillons pour chaque ressort pour chaque vitesse de débobinage.

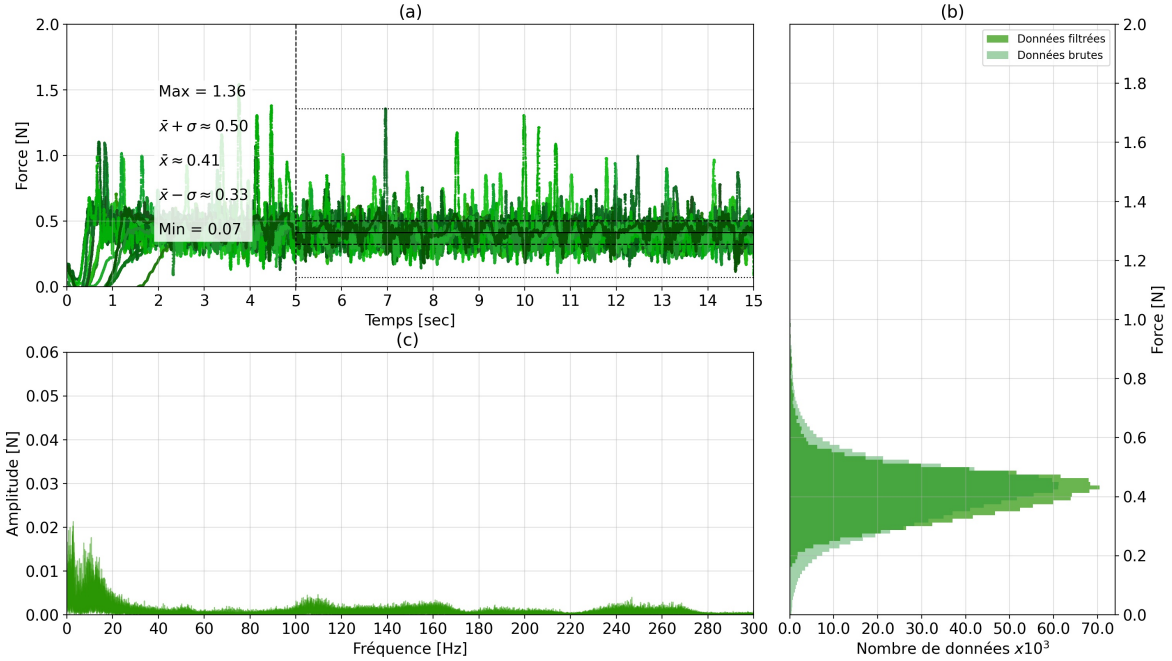


Figure E.6. Ressort vert pour db.SFCA avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

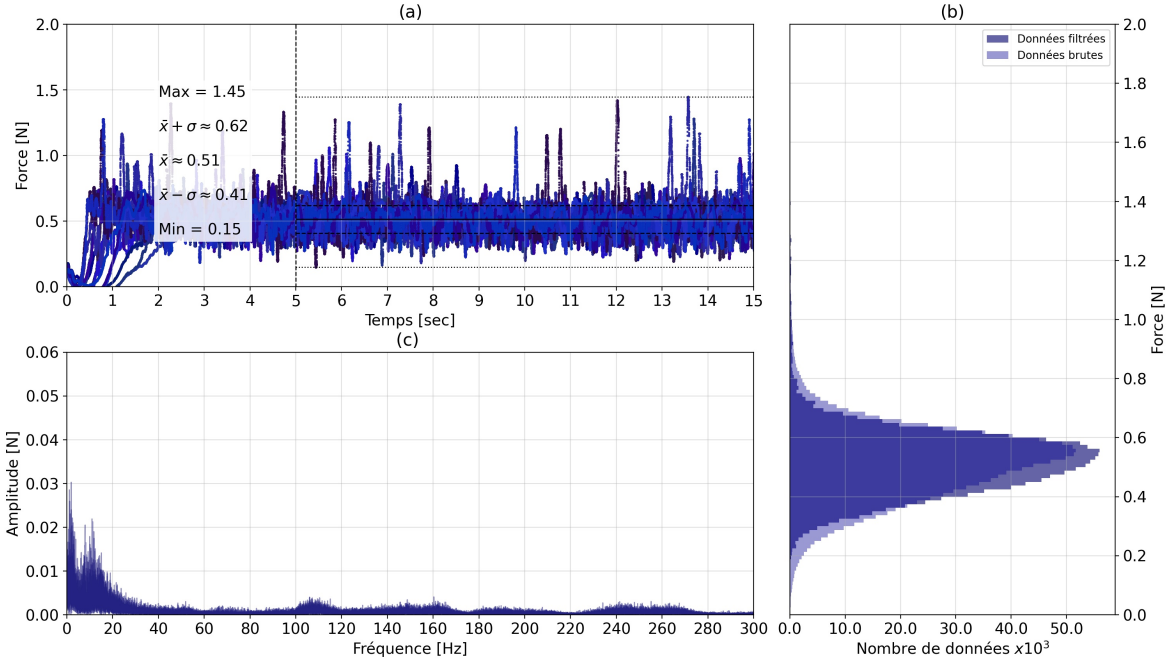


Figure E.7. Ressort bleu pour db.SFCA avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

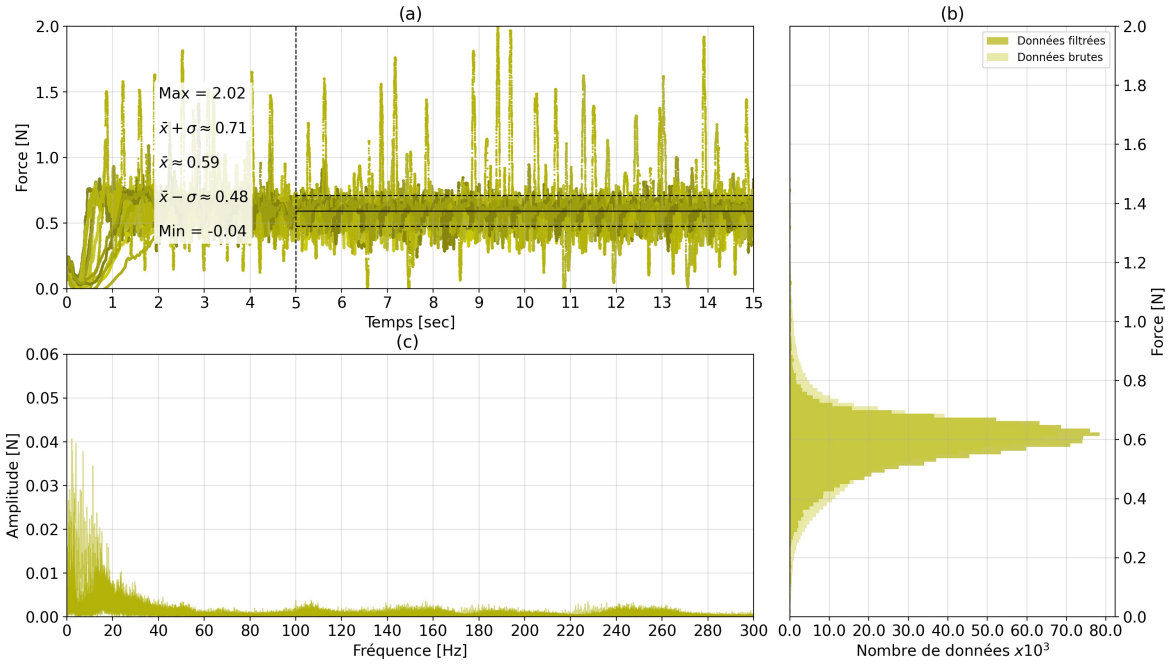


Figure E.8. Ressort jaune pour db.SFCA avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

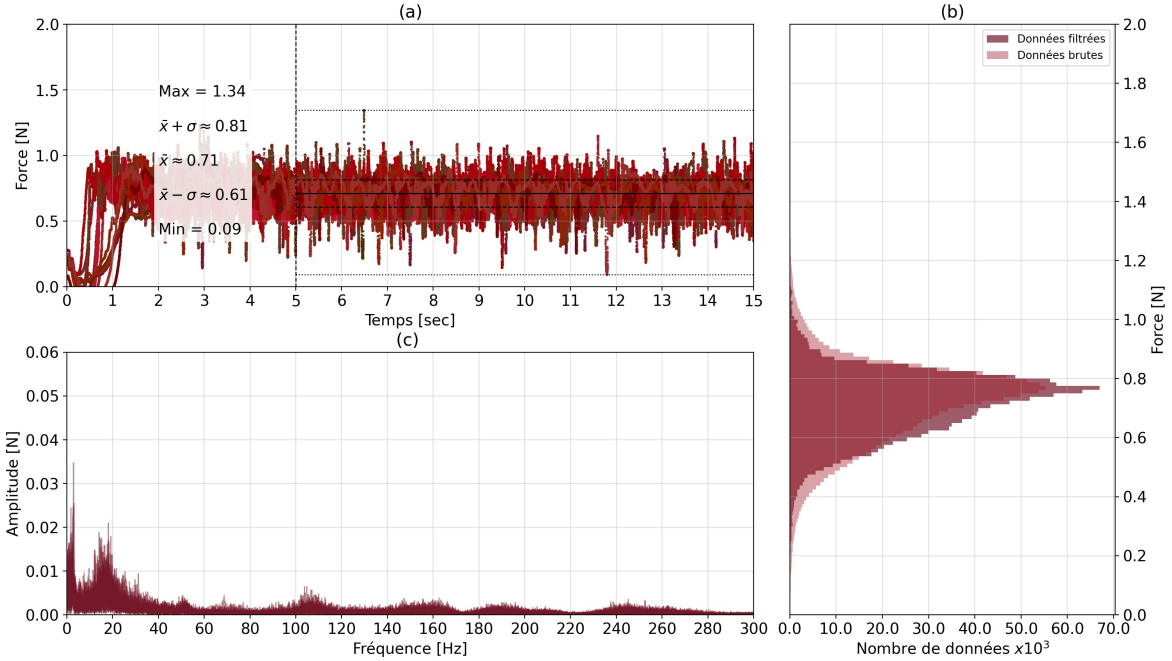


Figure E.9. Ressort rouge pour db.SFCA avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

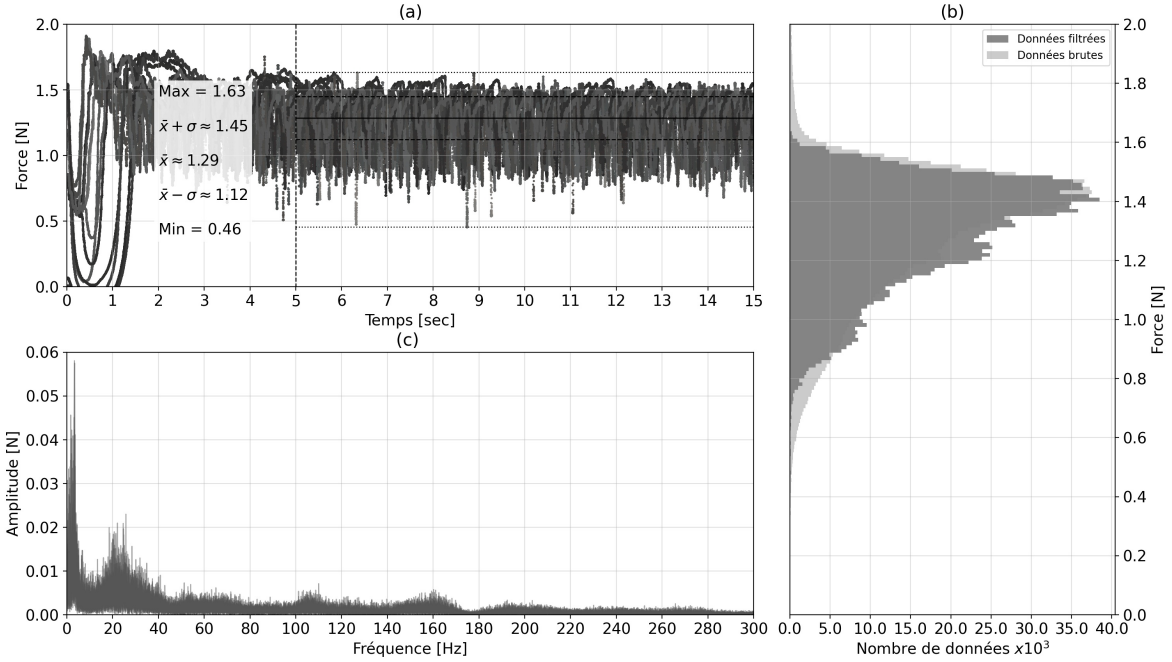


Figure E.10. Ressort blanc pour db.SFCA avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

Résultats du db.SFCA avec fibre de verre

Les Figures E.11 à E.15 illustrent la variation de la force pour chaque couleur de ressort en superposant un test par vitesse de débobinage avec la fibre de verre.

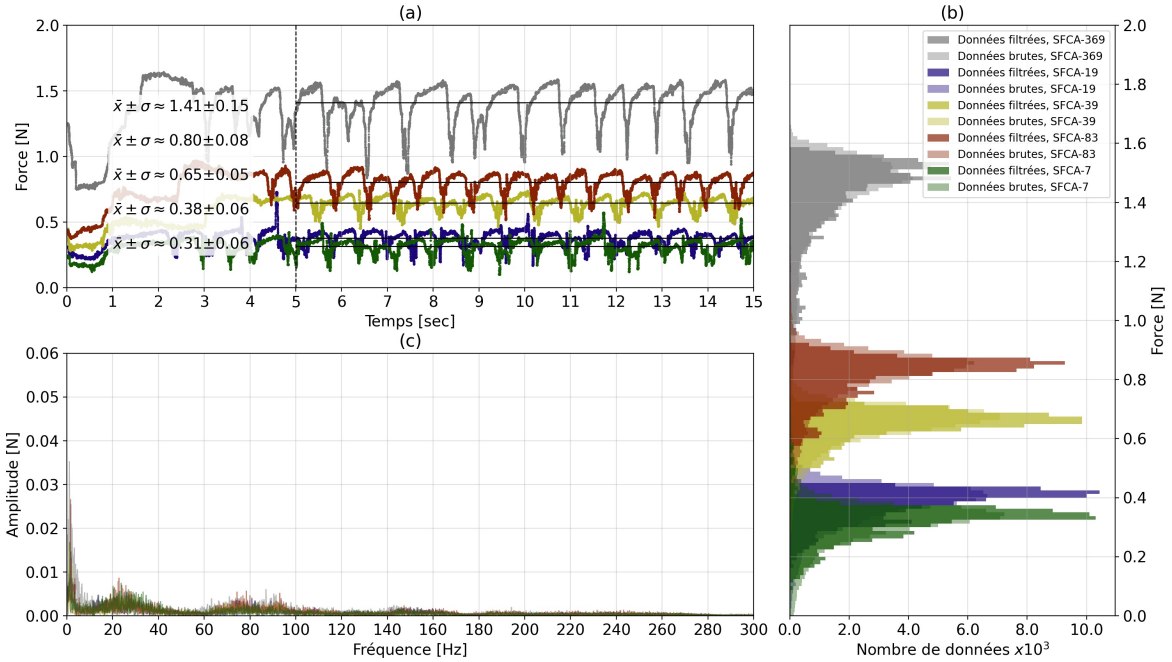


Figure E.11. Tous les ressorts du db.SFCA avec fibre de verre, un test par échantillon pour un débobinage de 25mmps

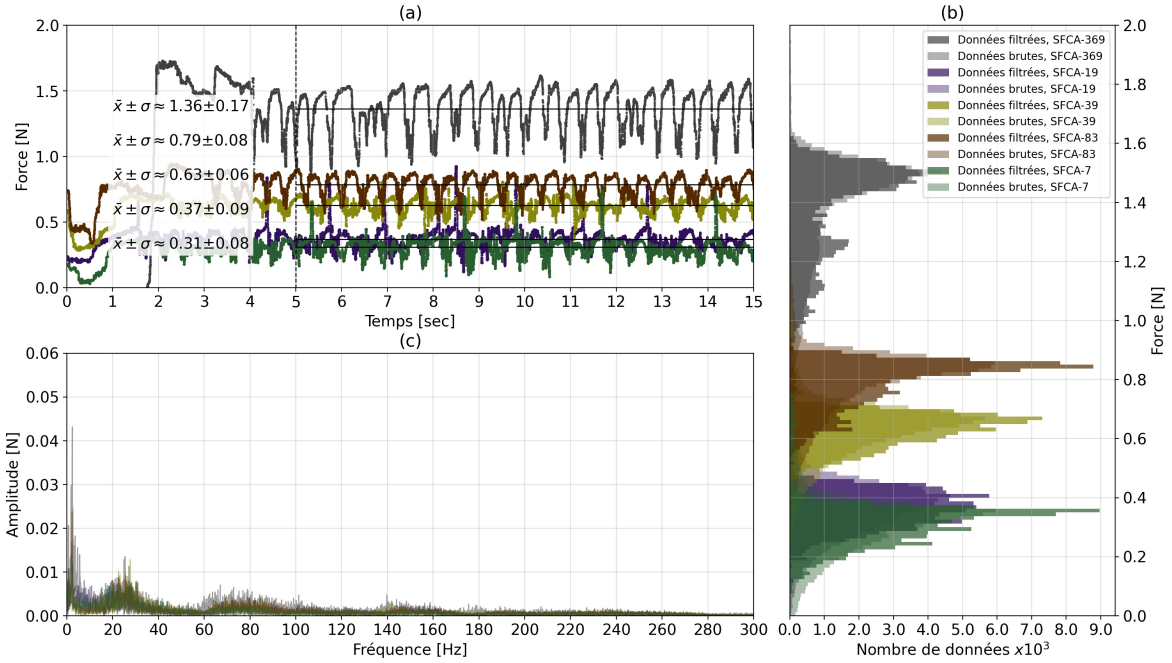


Figure E.12. Tous les ressorts du db.SFCA avec fibre de verre, un test par échantillon pour un débobinage de 50mmps

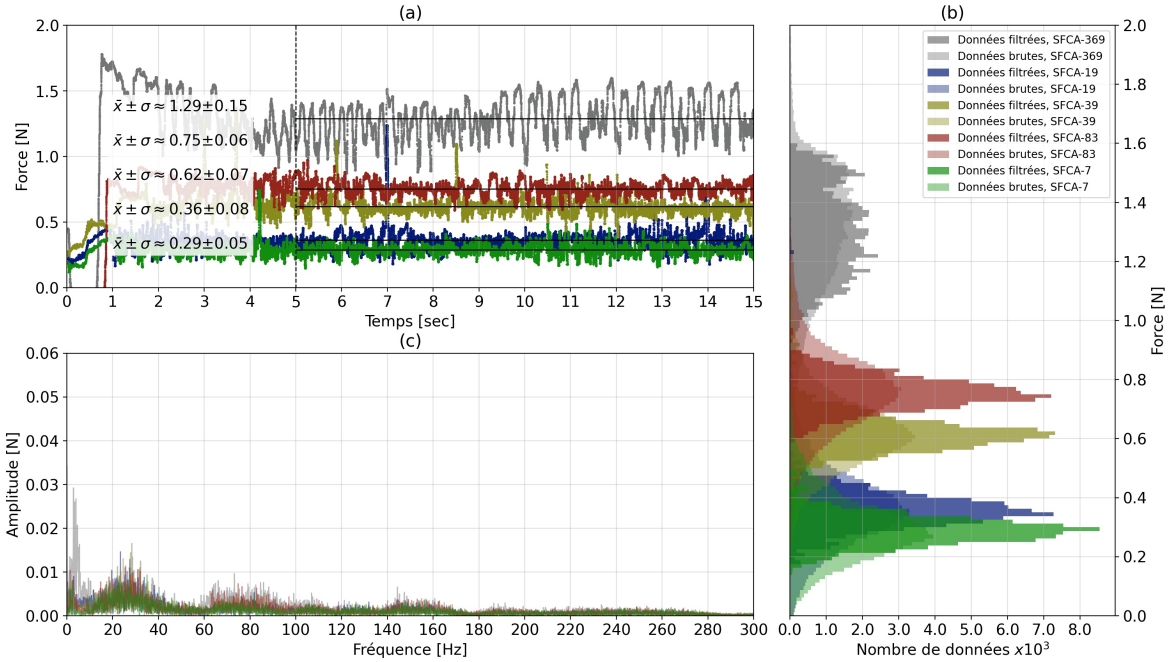


Figure E.13. Tous les ressorts du db.SFCA avec fibre de verre, un test par échantillon pour un débobinage de 100mmps

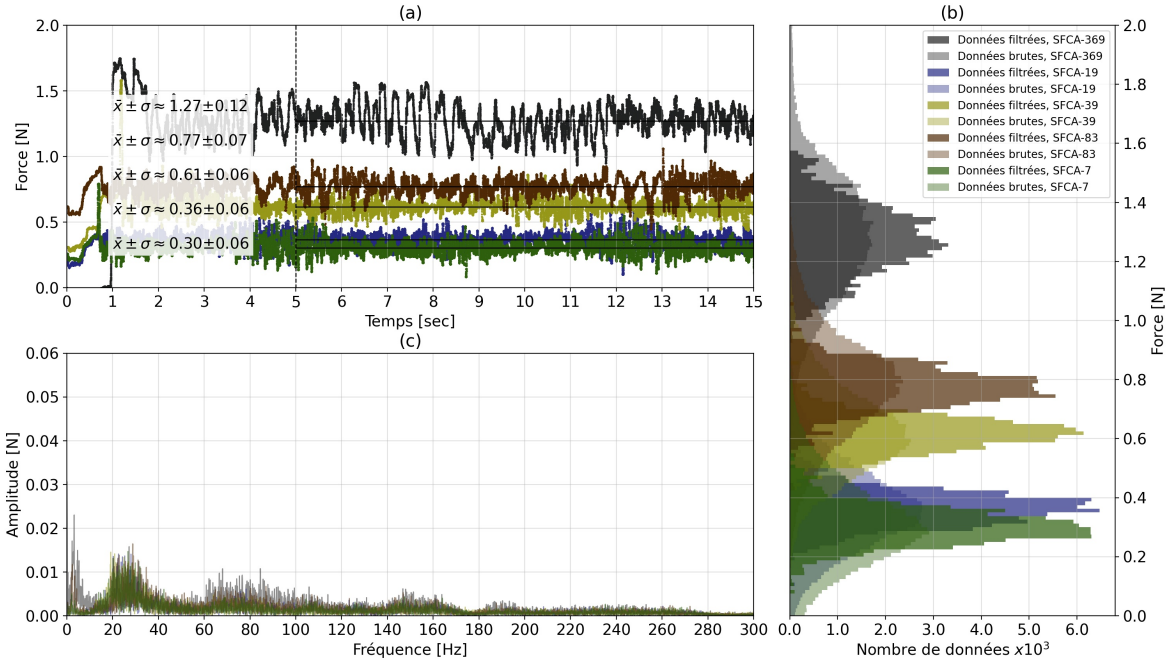


Figure E.14. Tous les ressorts du db.SFCA avec fibre de verre, un test par échantillon pour un débobinage de 150mmps

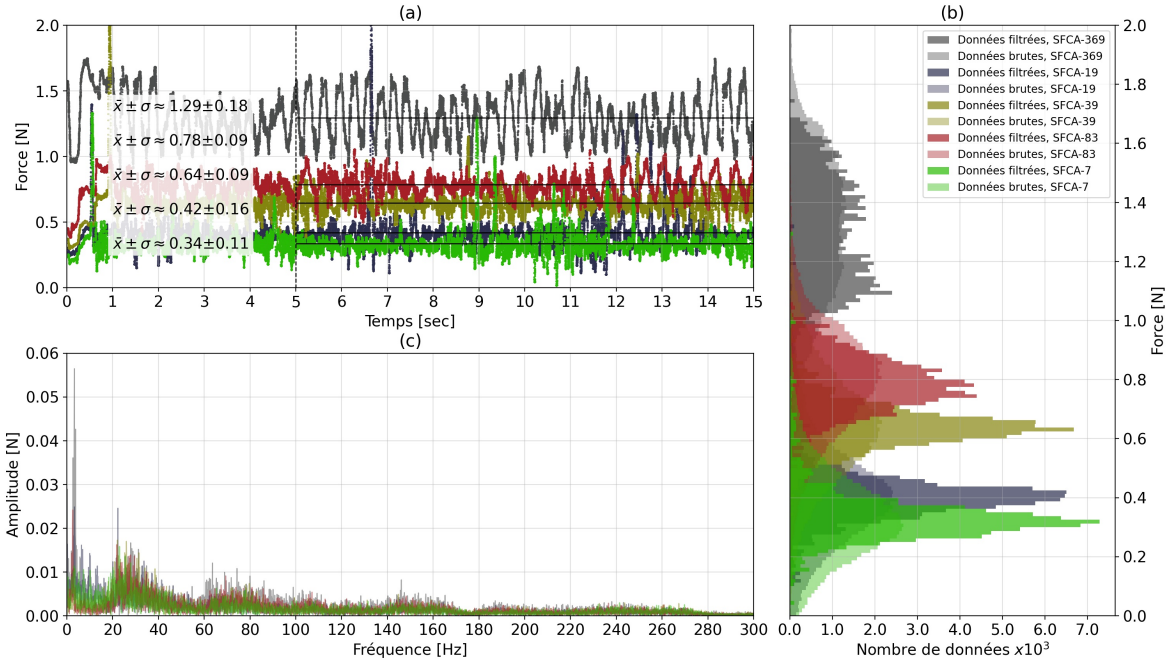


Figure E.15. Tous les ressorts du db.SFCA avec fibre de verre, un test par échantillon pour un débobinage de 250mmps

Les Figures E.16 à E.20 illustrent la variation de la force pour chaque couleur de ressort en superposant tous les échantillons pour chaque vitesse de débobinage.

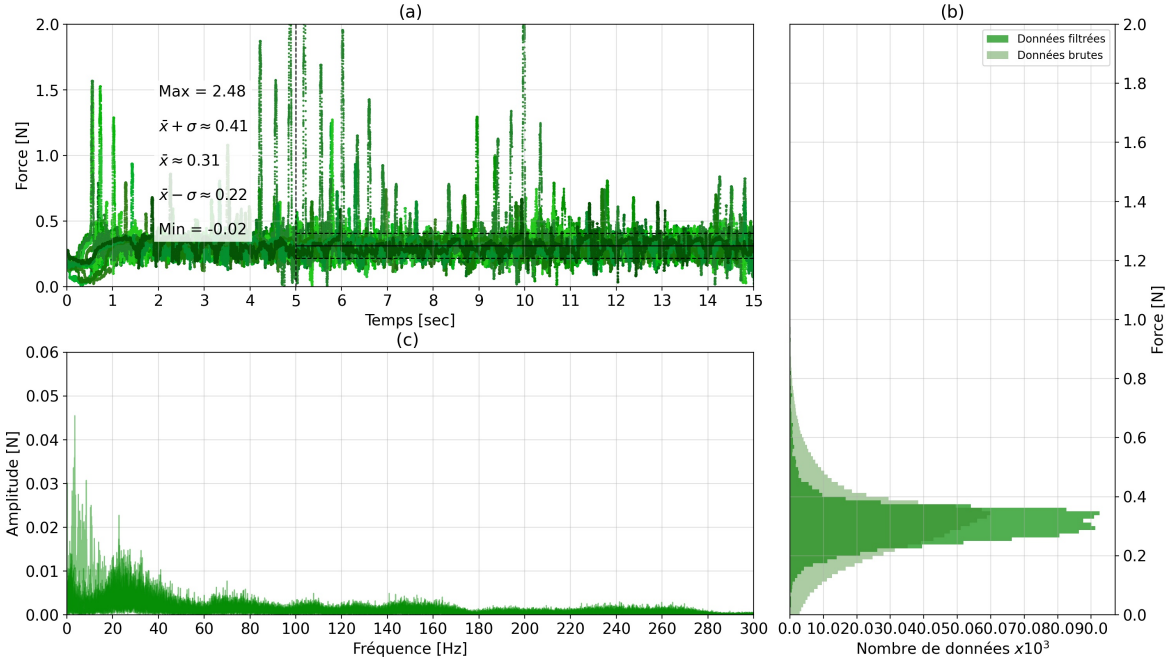


Figure E.16. Ressort vert pour db.SFCA avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

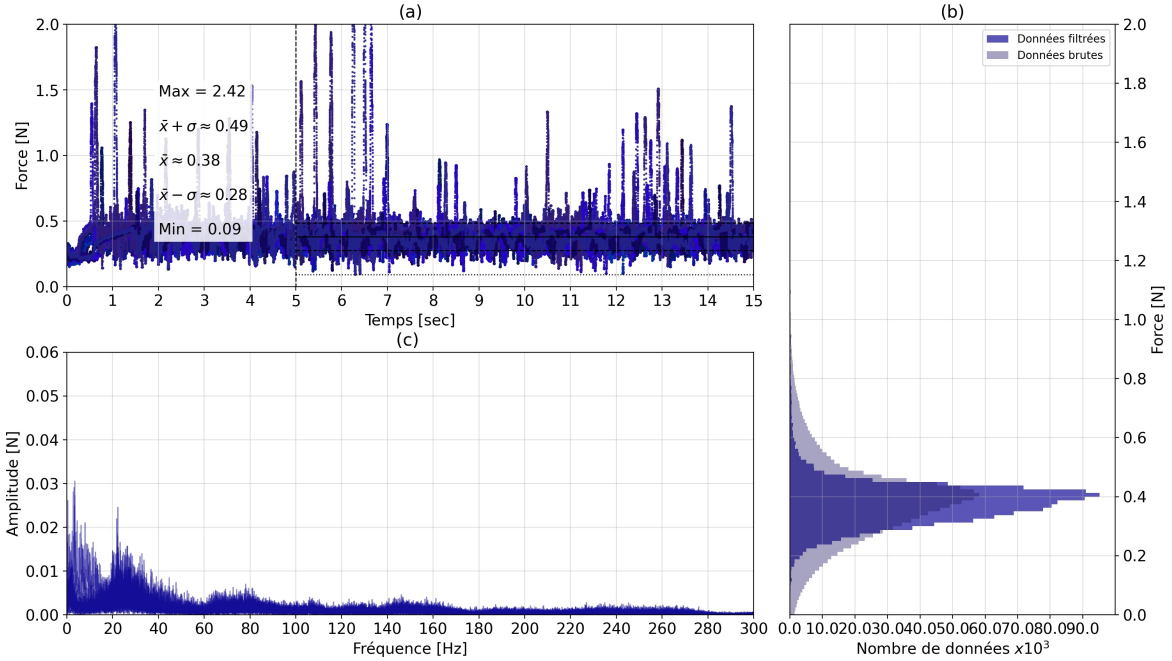


Figure E.17. Ressort bleu pour db.SFCA avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

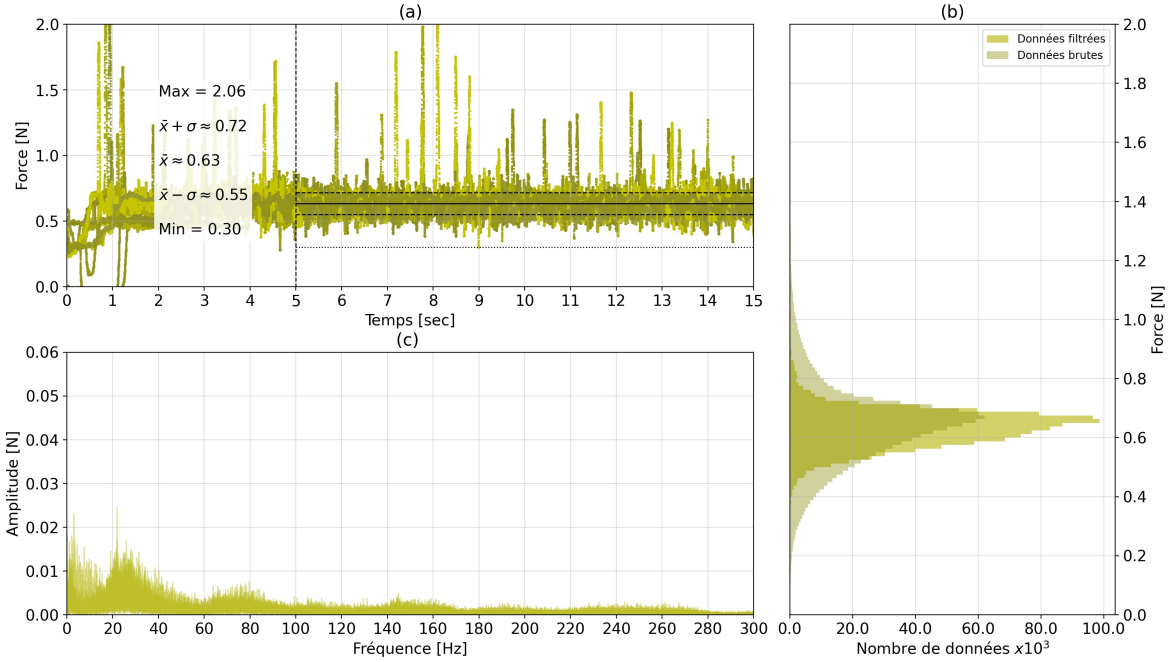


Figure E.18. Ressort jaune pour db.SFCA avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

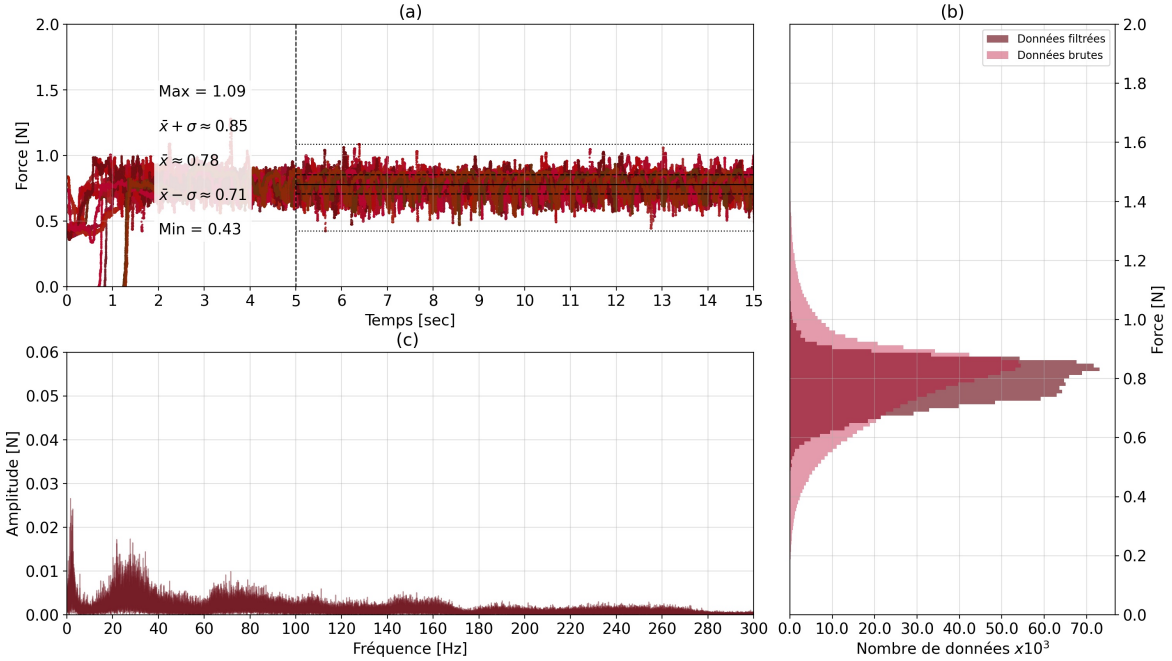


Figure E.19. Ressort rouge pour db.SFCA avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

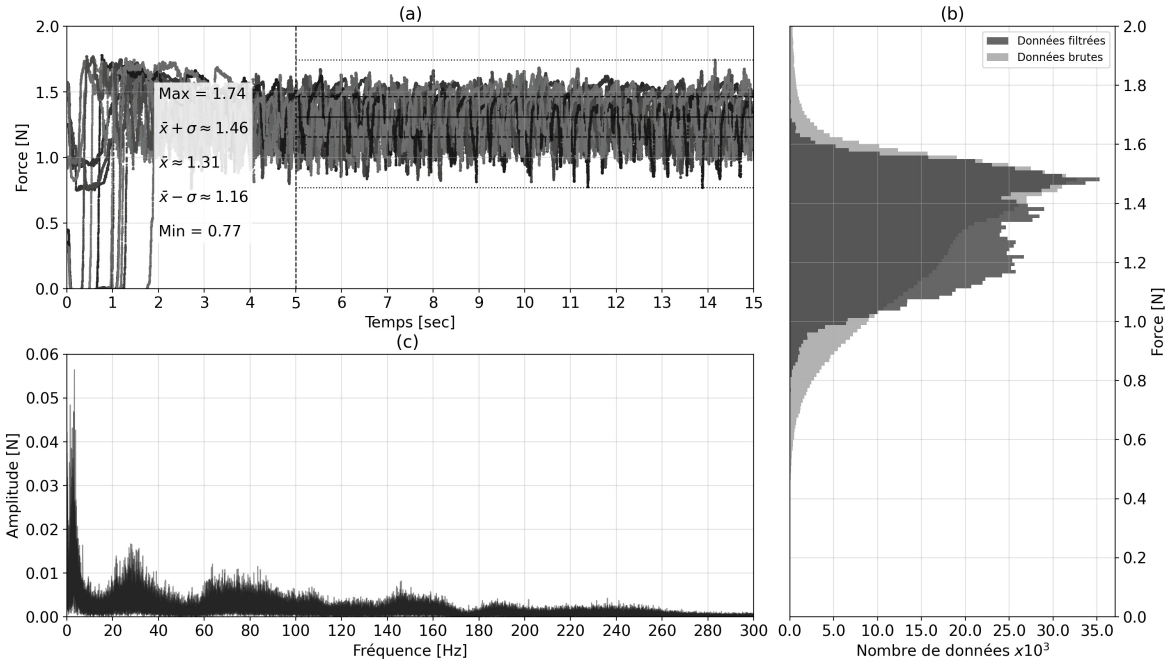


Figure E.20. Ressort blanc pour db.SFCA avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

Résultats du db.CTT avec fil de nylon

Les Figures E.21 à E.25 présentent les résultats de tests pour un échantillon par couleur de ressort à chaque palier de vitesse.

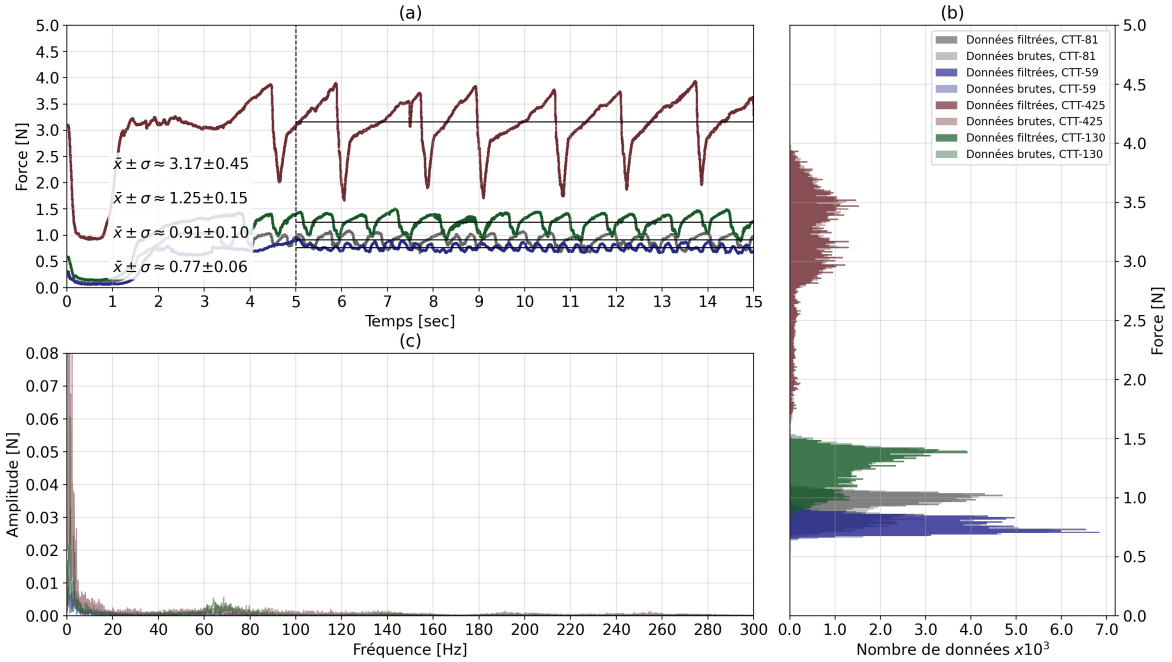


Figure E.21. Tous les ressorts du db.CTT avec fil de nylon, un test par échantillon pour un débobinage de 25mmps

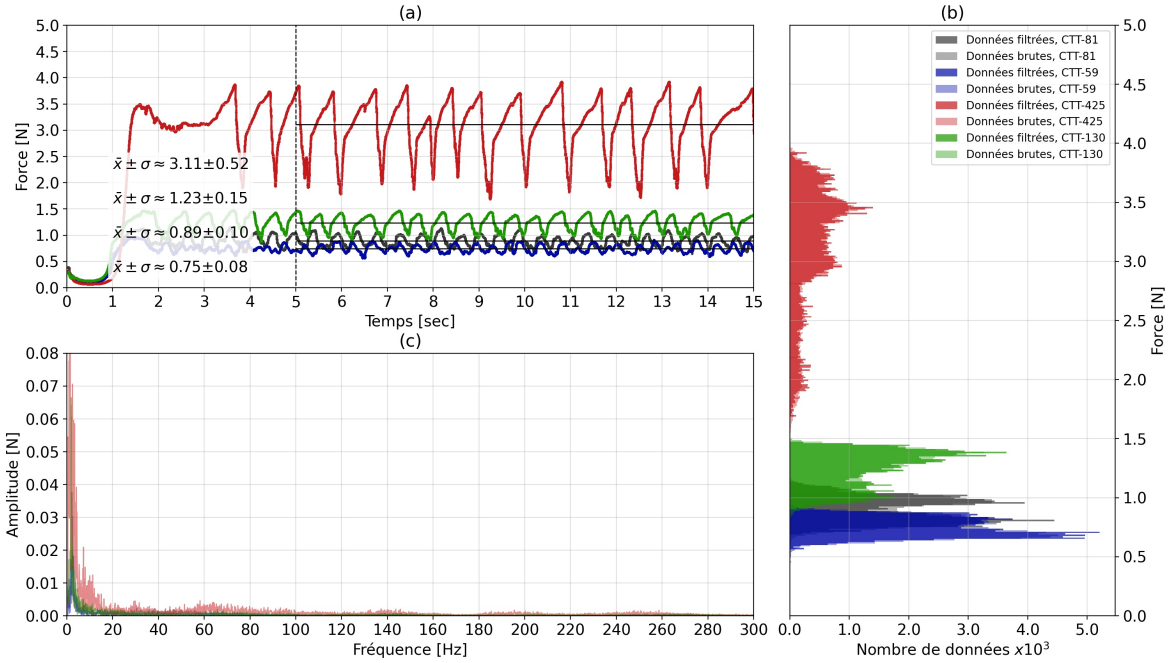


Figure E.22. Tous les ressorts du db.CTT avec fil de nylon, un test par échantillon pour un débobinage de 50mmps

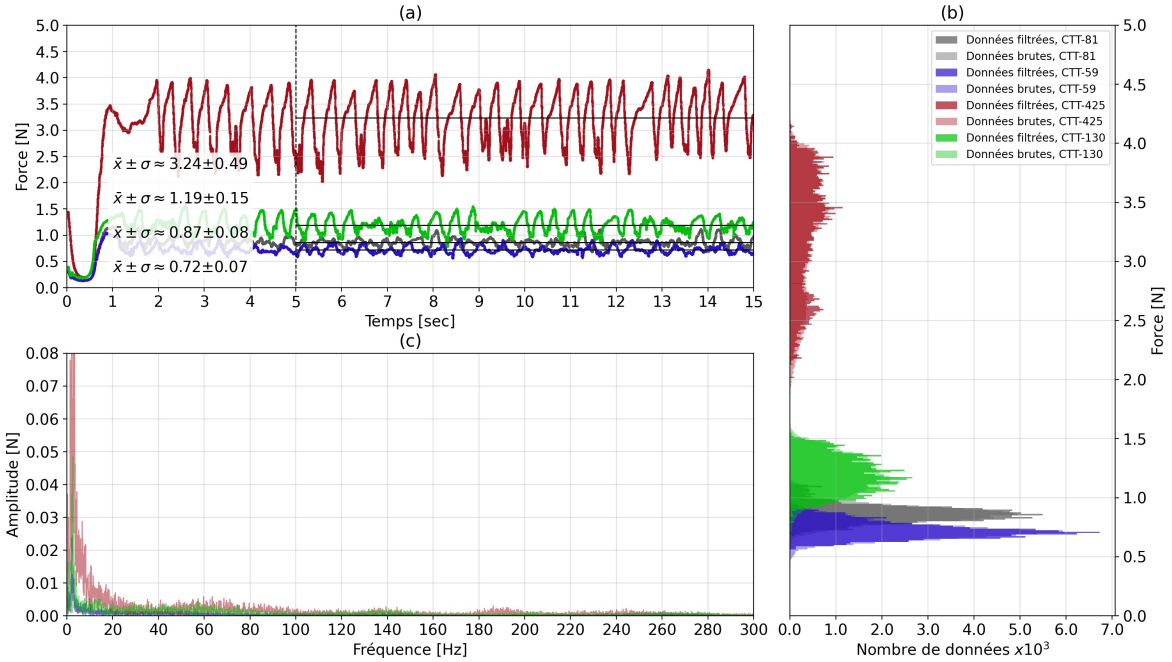


Figure E.23. Tous les ressorts du db.CTT avec fil de nylon, un test par échantillon pour un débobinage de 100mmps

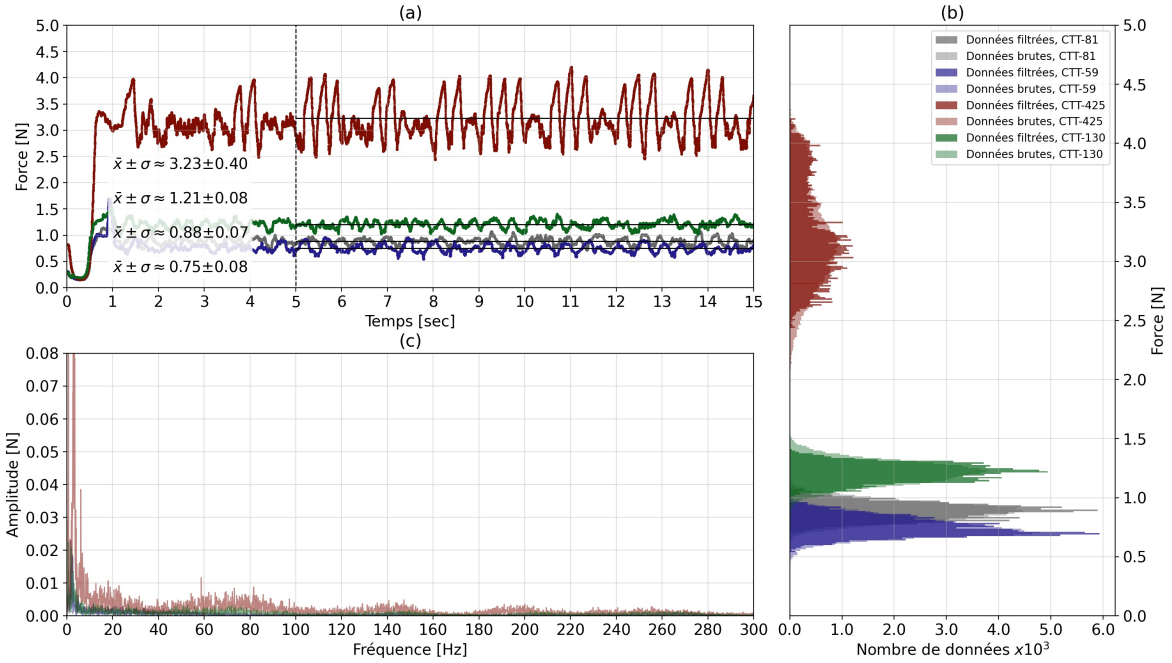


Figure E.24. Tous les ressorts du db.CTT avec fil de nylon, un test par échantillon pour un débobinage de 150mmps

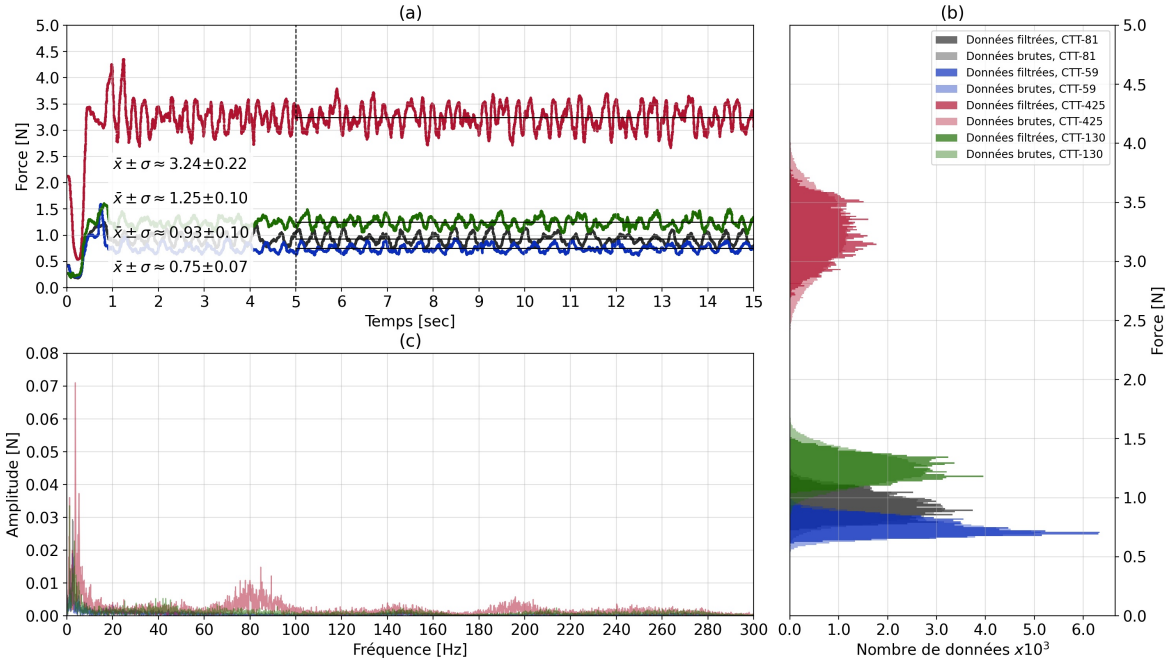


Figure E.25. Tous les ressorts du db.CTT avec fil de nylon, un test par échantillon pour un débobinage de 250mmps

Les Figures E.26 à E.29 illustrent la variation de la force pour chaque type de ressort en superposant tous les échantillons pour chacune des vitesses de débobinage.

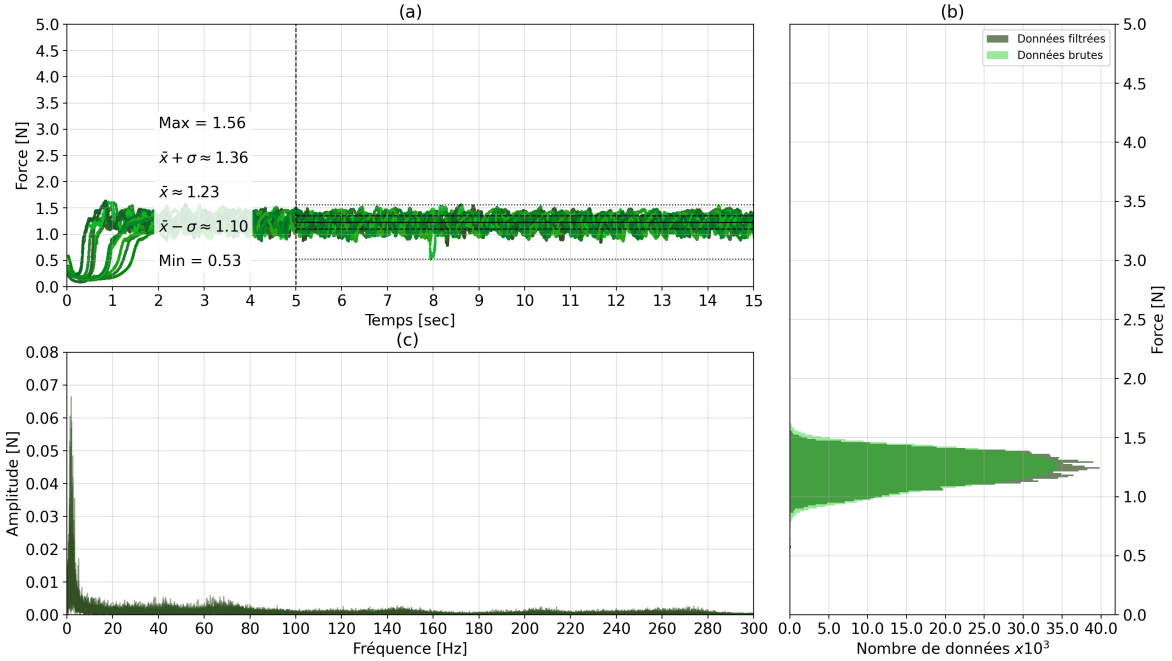


Figure E.26. Ressort vert foncé pour db.CTT avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

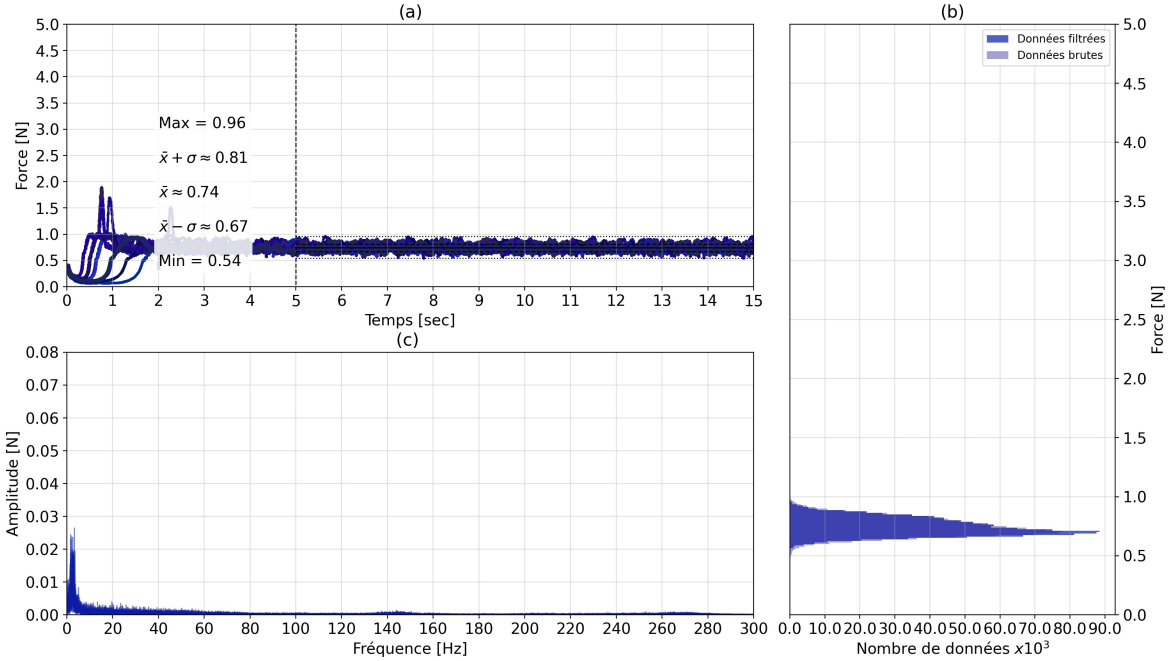


Figure E.27. Ressort bleu pour db.CTT avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

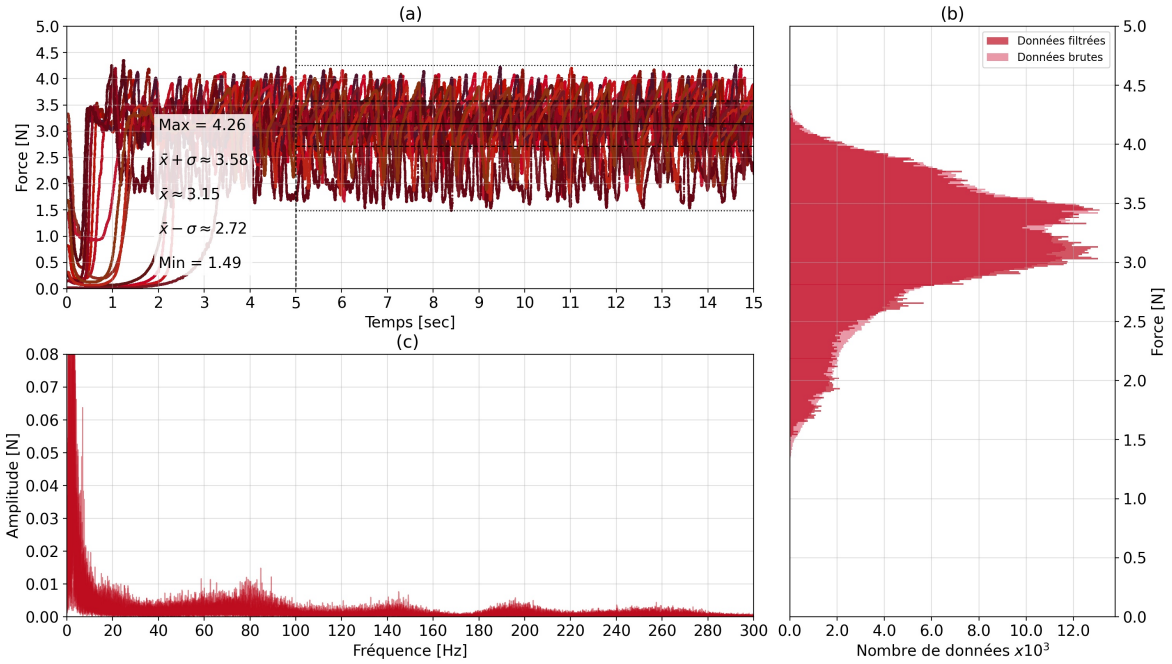


Figure E.28. Ressort rose pour db.CTT avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

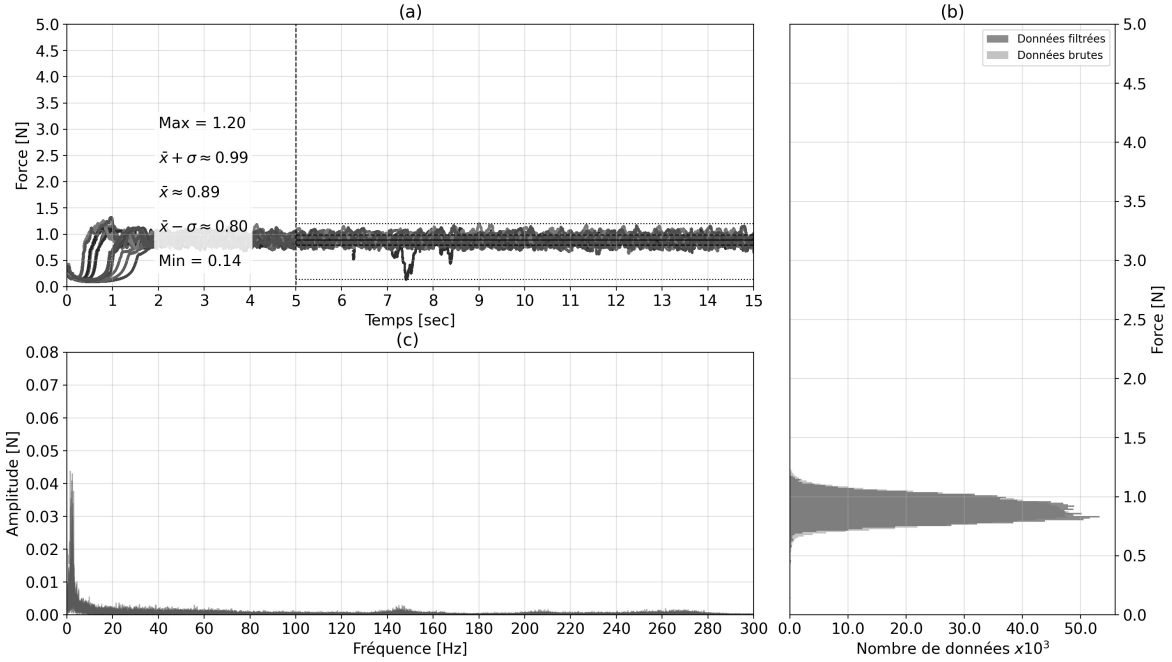


Figure E.29. Ressort vert clair pour db.CTT avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

Résultats du db.CTT avec fibre de verre

Les Figures E.30 à E.34 présentent les résultats de tests pour un échantillon par couleur de ressort à chaque palier de vitesse.

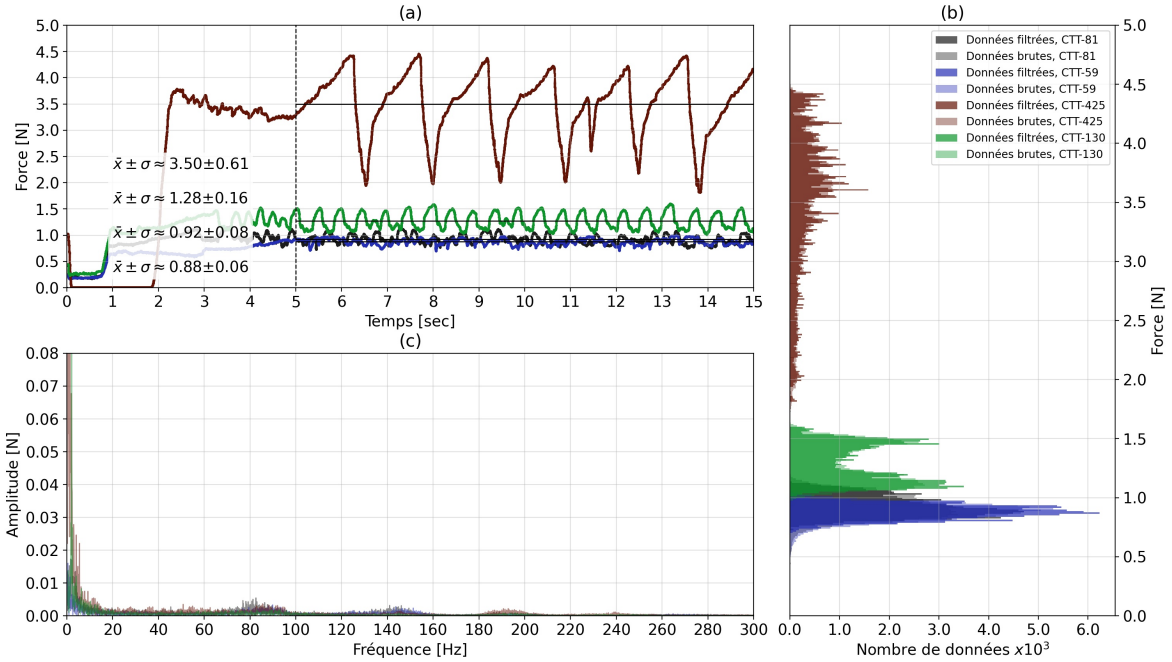


Figure E.30. Tous les ressorts du db.CTT avec fibre de verre, un test par échantillon pour un débobinage de 25mmps

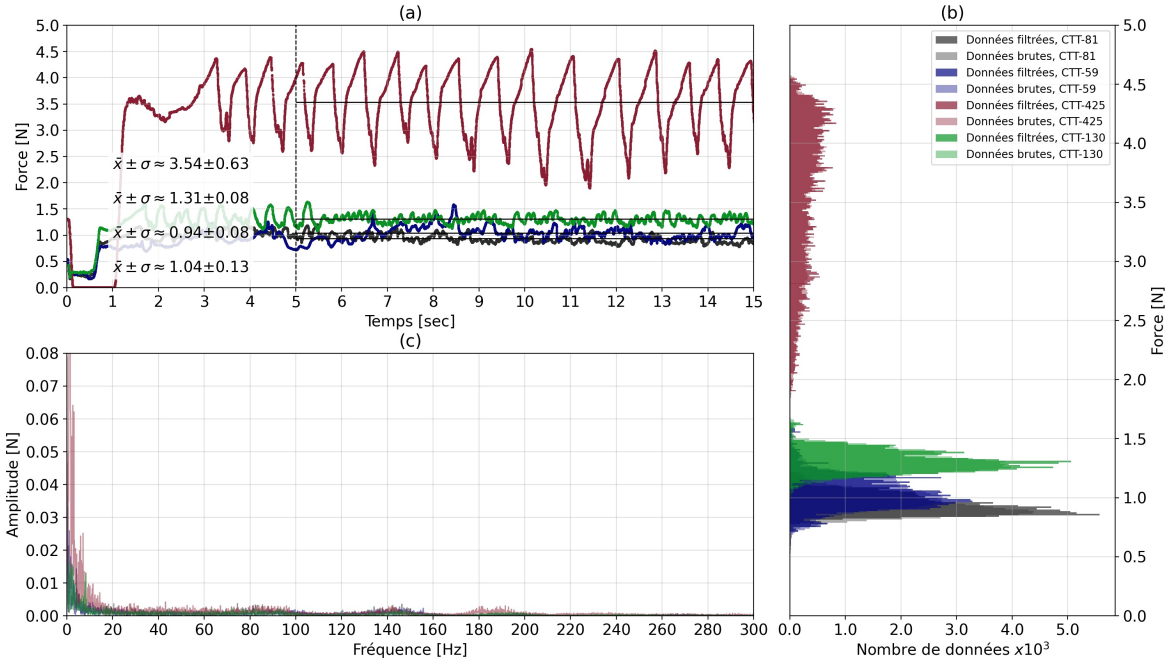


Figure E.31. Tous les ressorts du db.CTT avec fibre de verre, un test par échantillon pour un débobinage de 50mmps

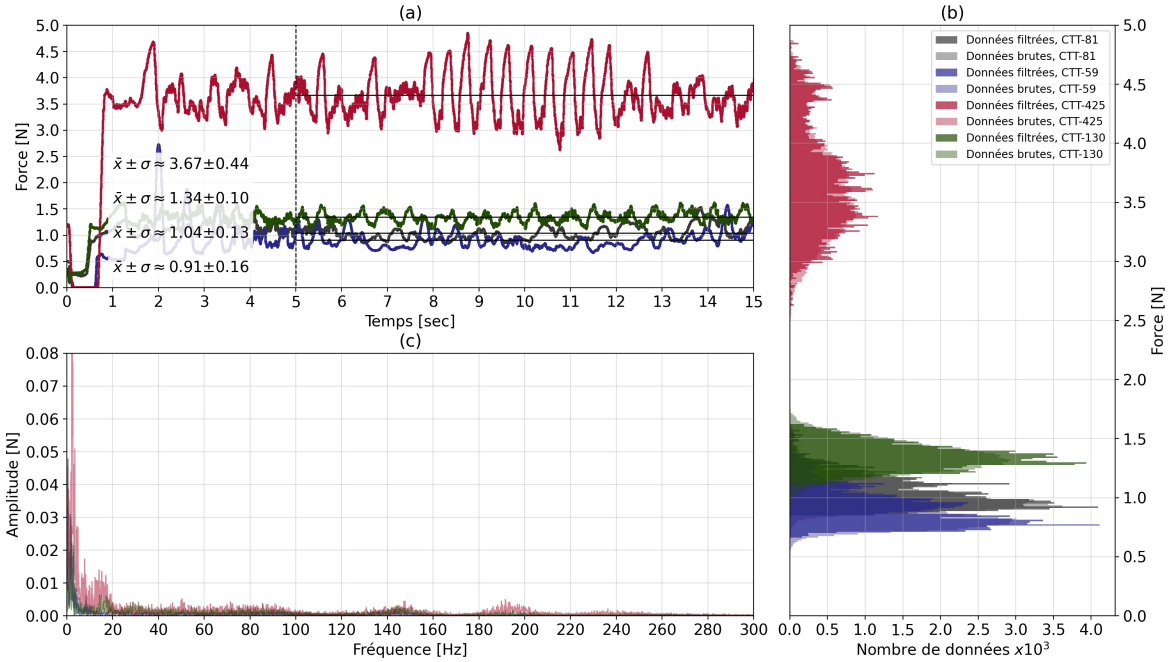


Figure E.32. Tous les ressorts du db.SFCA avec fibre de verre, un test par échantillon pour un débobinage de 100mmps

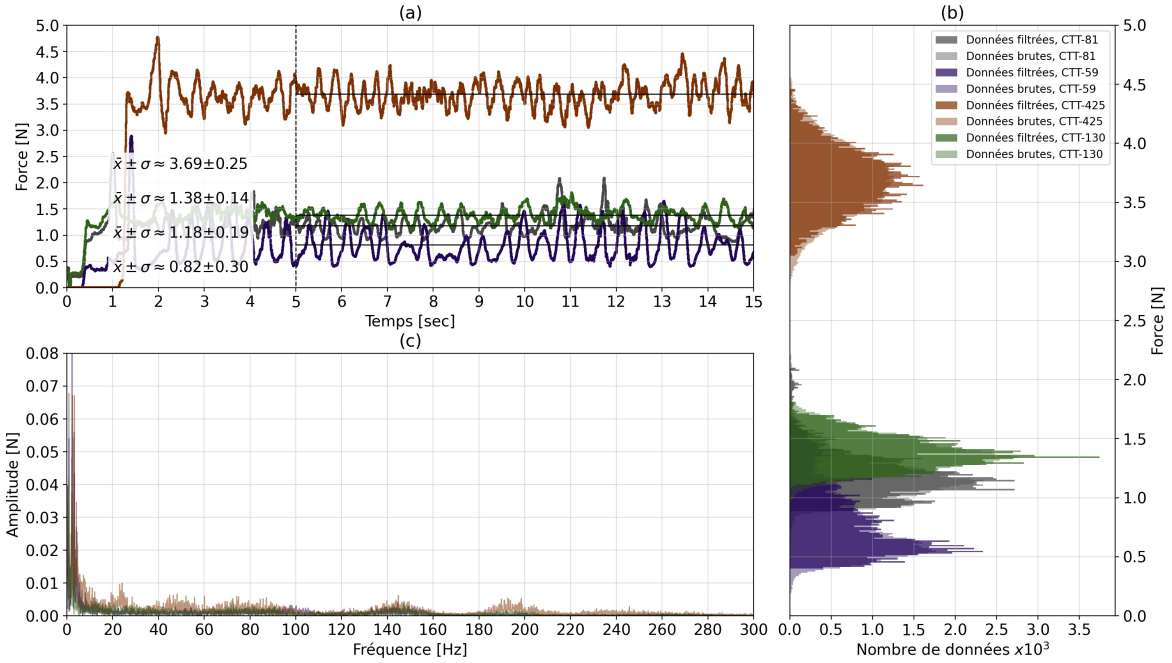


Figure E.33. Tous les ressorts du db.CTT avec fibre de verre, un test par échantillon pour un débobinage de 150mmps

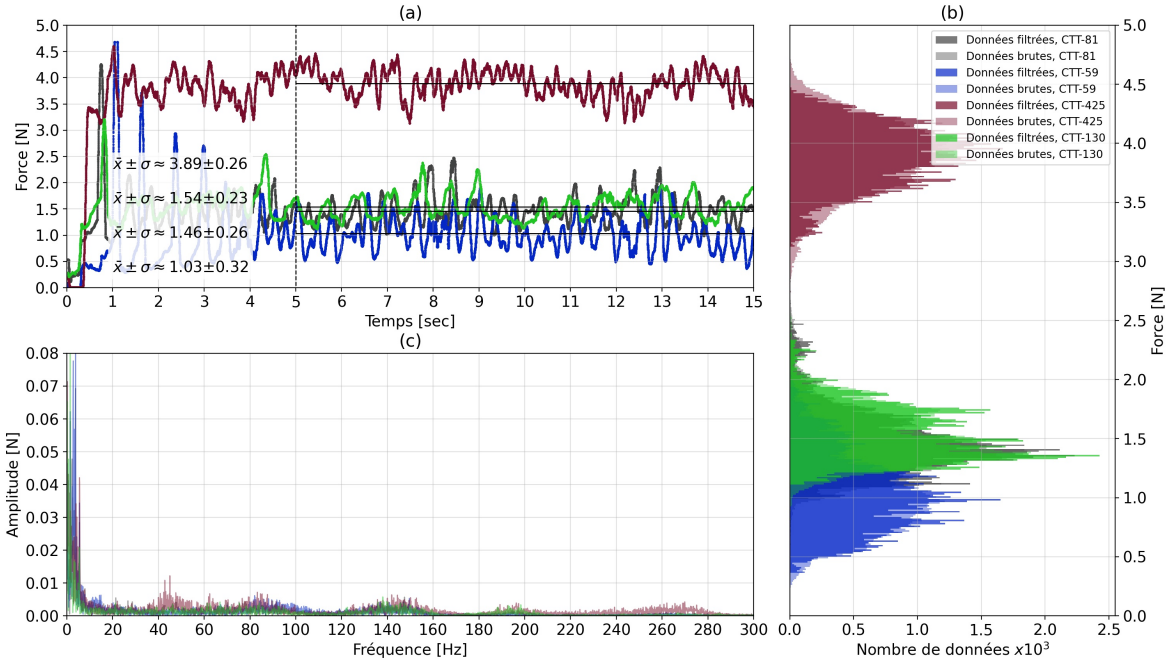


Figure E.34. Tous les ressorts du db.CTT avec fibre de verre, un test par échantillon pour un débobinage de 250mmps

Les Figures E.35 à E.38 illustrent la variation de la force pour chaque type de ressort en superposant tous les échantillons pour chacune des vitesses de débobinage.

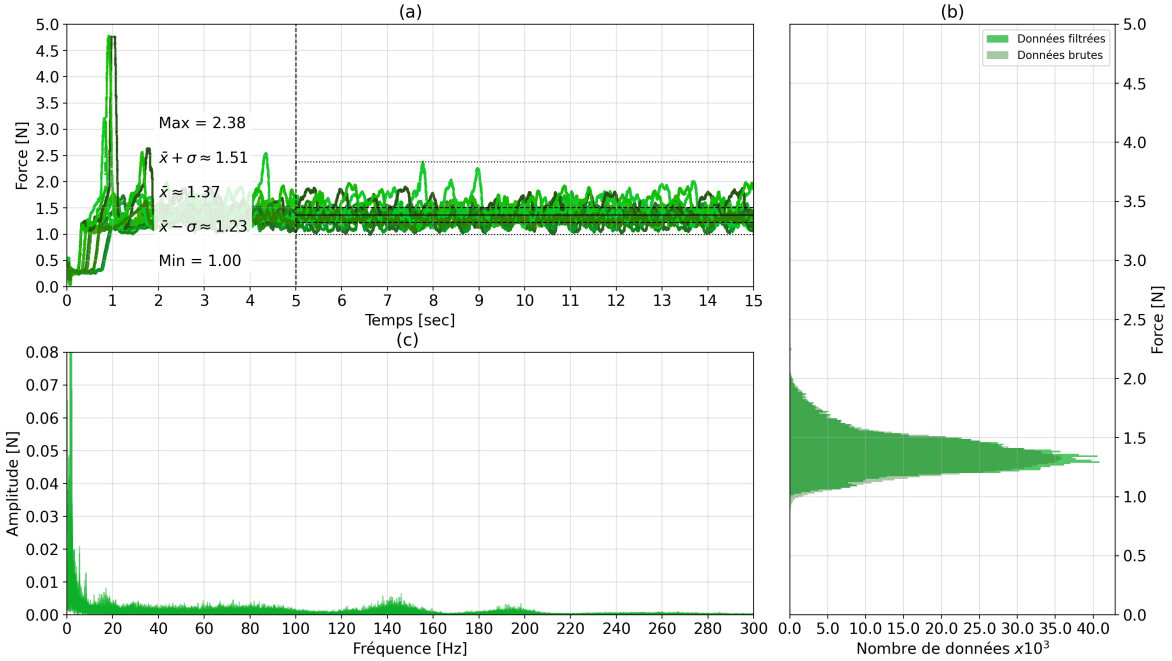


Figure E.35. Ressort vert foncé pour db.CTT avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

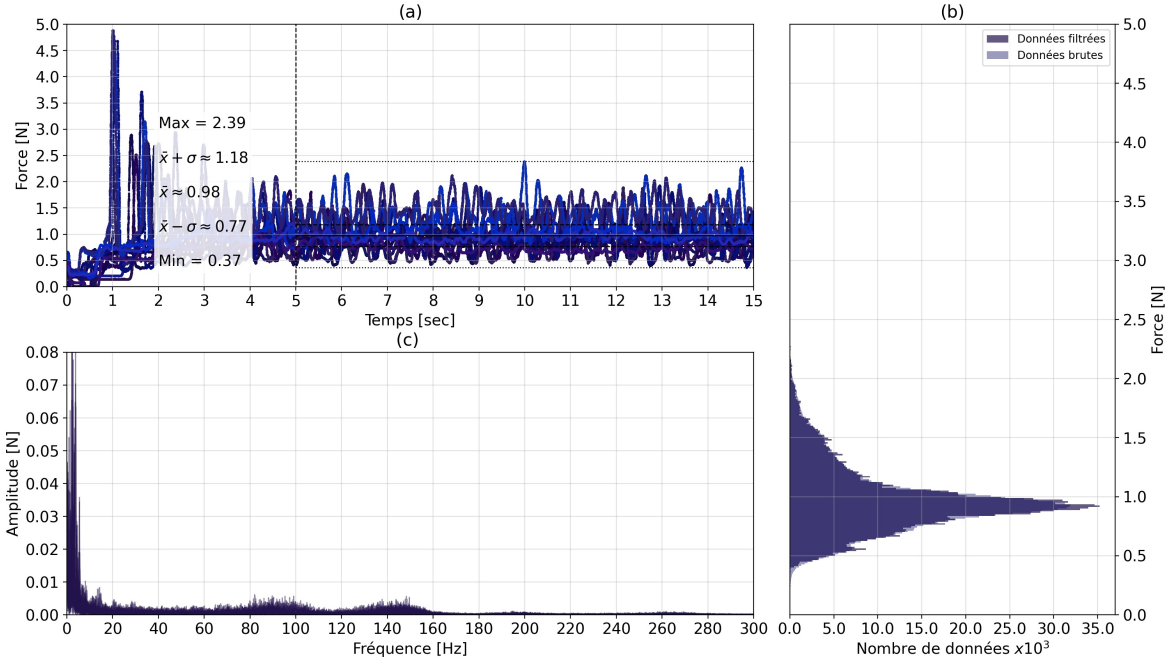


Figure E.36. Ressort bleu pour db.CTT avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

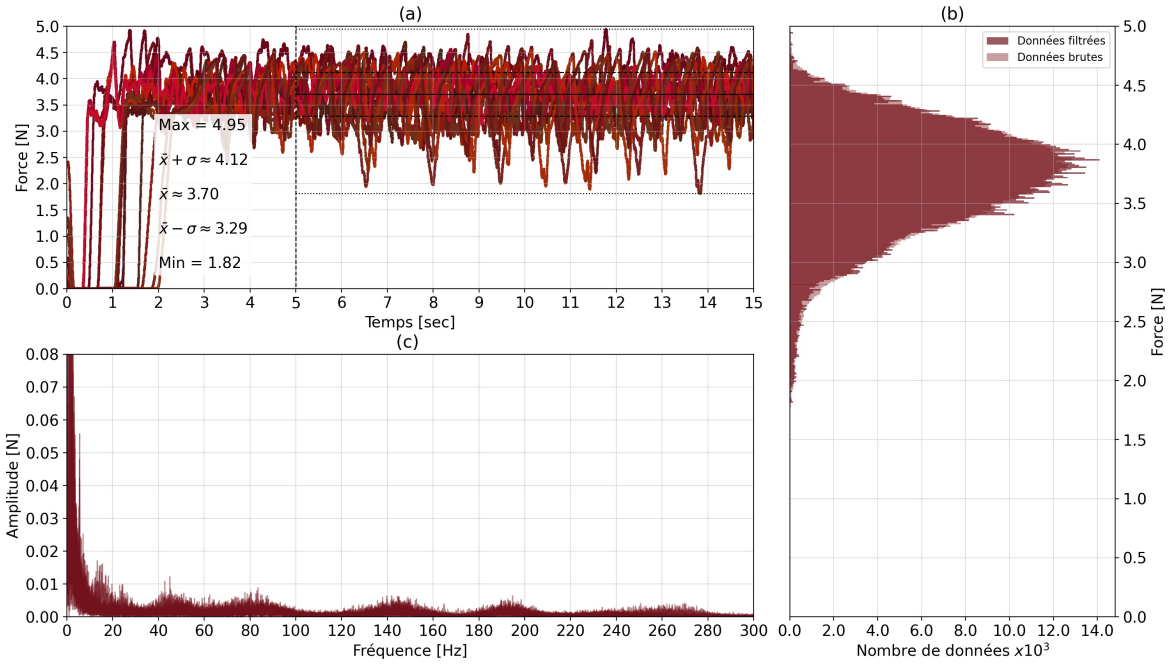


Figure E.37. Ressort rose pour db.CTT avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

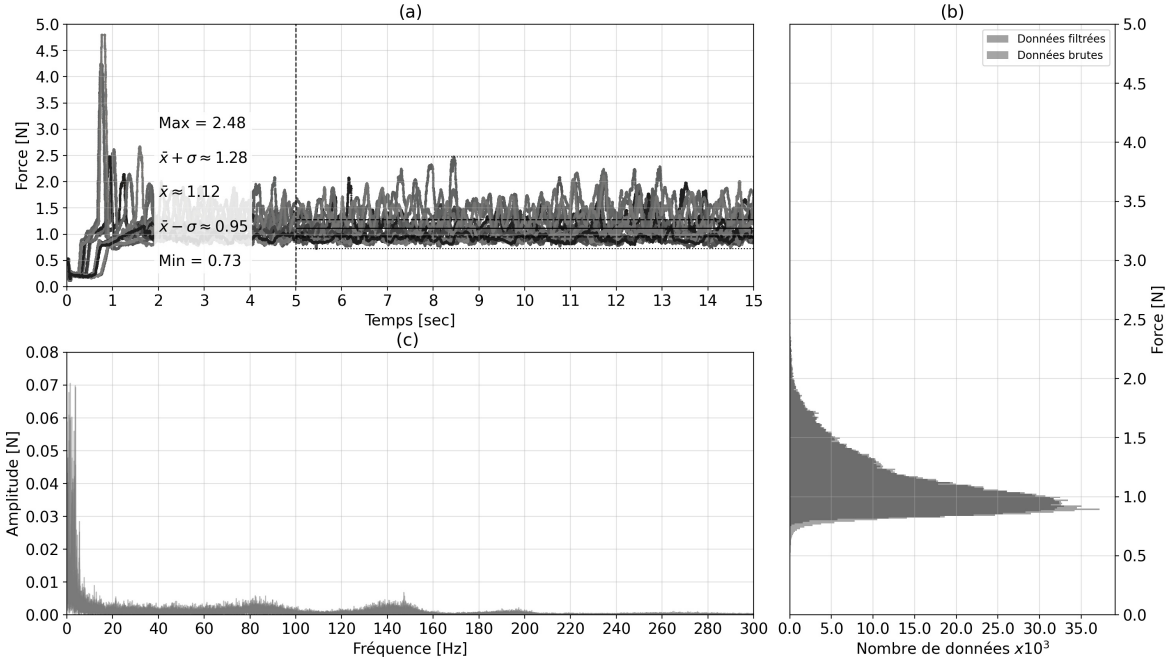


Figure E.38. Ressort vert clair pour db.CTT avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

ANNEXE F ANALYSE DES RÉSULTATS DES DÉBOBINEURS MÉCANIQUES

Les tableaux qui suivent présentent les données sommaires des tests de caractérisation pour le db.SFCA et db.CTT.

	Débobineur: db.SFCA	Vitesse de débobinage				
	Matériau: Nylon	25.0 mm/s	50.0 mm/s	100.0 mm/s	150.0 mm/s	250.0 mm/s
Ressort	Statistique					
SFCA-369	Maximum [N]	1.63	1.57	1.63	1.56	1.63
	Moyenne [N]	1.41	1.32	1.26	1.24	1.20
	Écart-type [N]	0.13	0.16	0.17	0.17	0.18
	Minimum [N]	0.84	0.73	0.46	0.70	0.56
SFCA-83	Maximum [N]	1.34	1.09	1.15	0.97	1.13
	Moyenne [N]	0.76	0.73	0.69	0.66	0.72
	Écart-type [N]	0.08	0.10	0.10	0.09	0.14
	Minimum [N]	0.22	0.09	0.17	0.39	0.15
SFCA-39	Maximum [N]	0.78	0.78	0.81	1.00	2.02
	Moyenne [N]	0.60	0.60	0.59	0.58	0.60
	Écart-type [N]	0.07	0.07	0.07	0.10	0.21
	Minimum [N]	0.28	0.28	0.26	0.24	-0.04
SFCA-19	Maximum [N]	0.74	0.79	0.92	1.28	1.45
	Moyenne [N]	0.55	0.52	0.49	0.49	0.52
	Écart-type [N]	0.08	0.09	0.10	0.11	0.14
	Minimum [N]	0.27	0.22	0.19	0.16	0.15
SFCA-7	Maximum [N]	0.76	0.67	0.71	1.01	1.36
	Moyenne [N]	0.45	0.41	0.38	0.41	0.42
	Écart-type [N]	0.06	0.07	0.08	0.10	0.12
	Minimum [N]	0.14	0.11	0.17	0.18	0.07

TABLEAU F.1 Sommaire de résultats du db.SFCA avec nylon

	Débobineur: db.SFCA	Vitesse de débobinage				
	Matériau: FibVerre	25.0 mm/s	50.0 mm/s	100.0 mm/s	150.0 mm/s	250.0 mm/s
Ressort	Statistique					
SFCA-369	Maximum [N]	1.62	1.62	1.60	1.66	1.74
	Moyenne [N]	1.38	1.33	1.29	1.26	1.28
	Écart-type [N]	0.15	0.16	0.16	0.13	0.17
	Minimum [N]	0.82	0.77	0.87	0.90	0.87
SFCA-83	Maximum [N]	0.95	0.93	0.98	1.06	1.09
	Moyenne [N]	0.80	0.79	0.76	0.77	0.78
	Écart-type [N]	0.07	0.08	0.06	0.07	0.09
	Minimum [N]	0.49	0.47	0.54	0.43	0.48
SFCA-39	Maximum [N]	0.74	0.88	1.35	1.55	2.06
	Moyenne [N]	0.64	0.63	0.62	0.62	0.66
	Écart-type [N]	0.05	0.06	0.08	0.07	0.13
	Minimum [N]	0.42	0.37	0.39	0.40	0.30
SFCA-19	Maximum [N]	0.60	0.93	1.24	0.97	2.42
	Moyenne [N]	0.38	0.37	0.36	0.37	0.43
	Écart-type [N]	0.05	0.08	0.08	0.07	0.19
	Minimum [N]	0.13	0.12	0.17	0.10	0.09
SFCA-7	Maximum [N]	0.74	0.94	1.25	0.60	2.48
	Moyenne [N]	0.31	0.30	0.29	0.31	0.35
	Écart-type [N]	0.06	0.07	0.06	0.06	0.17
	Minimum [N]	0.10	0.04	0.12	0.08	-0.02

TABLEAU F.2 Sommaire de résultats du db.SFCA avec fibre de verre

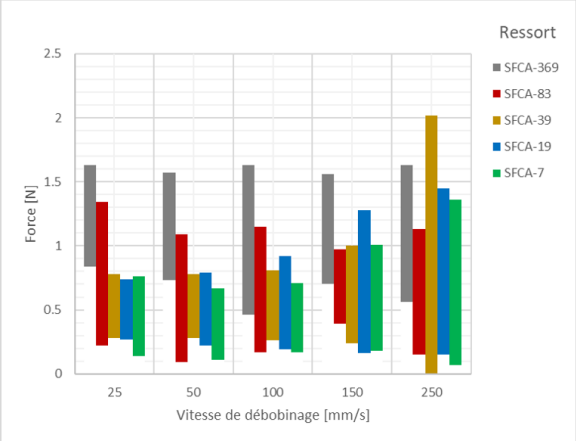
Ressort	Débobineur: db.CTT Matériau: Nylon Statistique	Vitesse de débobinage 25.0 mm/s	50.0 mm/s	100.0 mm/s	150.0 mm/s	250.0 mm/s
CTT-425	Maximum [N]	3.93	4.01	4.19	4.26	3.90
	Moyenne [N]	3.17	3.15	3.29	3.23	2.88
	Écart-type [N]	0.44	0.50	0.48	0.40	0.30
	Minimum [N]	1.67	1.69	2.02	2.36	1.49
CTT-130	Maximum [N]	1.50	1.51	1.55	1.56	1.54
	Moyenne [N]	1.26	1.22	1.20	1.22	1.24
	Écart-type [N]	0.14	0.16	0.13	0.08	0.10
	Minimum [N]	0.88	0.86	0.79	1.00	0.53
CTT-81	Maximum [N]	1.09	1.13	1.12	1.07	1.20
	Moyenne [N]	0.91	0.89	0.86	0.88	0.93
	Écart-type [N]	0.10	0.10	0.09	0.07	0.10
	Minimum [N]	0.67	0.62	0.14	0.70	0.65
CTT-59	Maximum [N]	0.94	0.92	0.94	0.96	0.96
	Moyenne [N]	0.76	0.74	0.72	0.73	0.75
	Écart-type [N]	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07
	Minimum [N]	0.60	0.57	0.54	0.54	0.55

Tableau F.3 Sommaire de résultats du db.CTT avec nylon

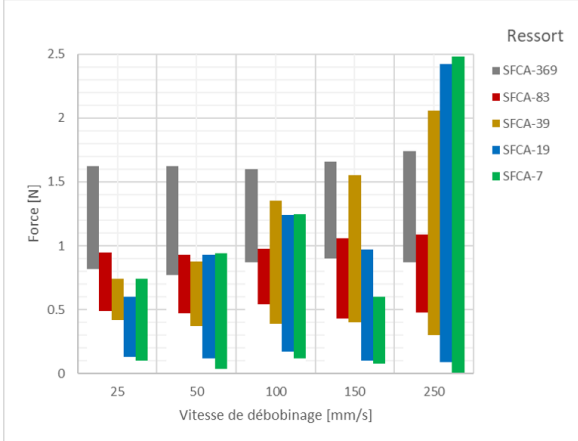
Ressort	Débobineur: db.CTT Matériau: FibVerre Statistique	Vitesse de débobinage 25.0 mm/s	50.0 mm/s	100.0 mm/s	150.0 mm/s	250.0 mm/s
CTT-425	Maximum [N]	4.46	4.63	4.85	4.95	4.57
	Moyenne [N]	3.63	3.62	3.63	3.84	3.80
	Écart-type [N]	0.50	0.56	0.41	0.26	0.25
	Minimum [N]	1.82	1.89	2.63	3.05	3.00
CTT-130	Maximum [N]	1.60	1.65	1.66	1.82	2.38
	Moyenne [N]	1.29	1.30	1.35	1.38	1.53
	Écart-type [N]	0.16	0.08	0.10	0.13	0.20
	Minimum [N]	1.00	1.07	1.10	1.10	1.09
CTT-81	Maximum [N]	1.16	1.22	1.77	2.09	2.48
	Moyenne [N]	0.92	0.94	1.07	1.21	1.43
	Écart-type [N]	0.08	0.08	0.13	0.20	0.25
	Minimum [N]	0.73	0.78	0.85	0.89	0.91
CTT-59	Maximum [N]	1.12	1.59	1.58	1.96	2.39
	Moyenne [N]	0.92	0.91	0.89	0.87	1.28
	Écart-type [N]	0.06	0.10	0.16	0.31	0.28
	Minimum [N]	0.70	0.61	0.48	0.40	0.37

Tableau F.4 Sommaire de résultats du db.CTT avec fibre de verre

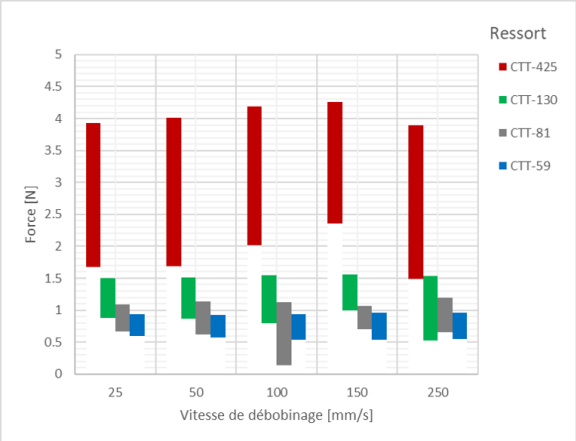
Sur la Figure F.1 on peut apercevoir l'évolution de l'écart entre la force maximale et minimale pour chacun des palier de vitesse de débobinage. La Figure F.1a montre l'évolution pour le db.SFCA avec fil de nylon et la Figure F.1b pour la fibre de verre. La Figure F.1c montre la même évolution, mais pour le db.CTT avec le fil de nylon et la Figure F.1d pour la fibre de verre.



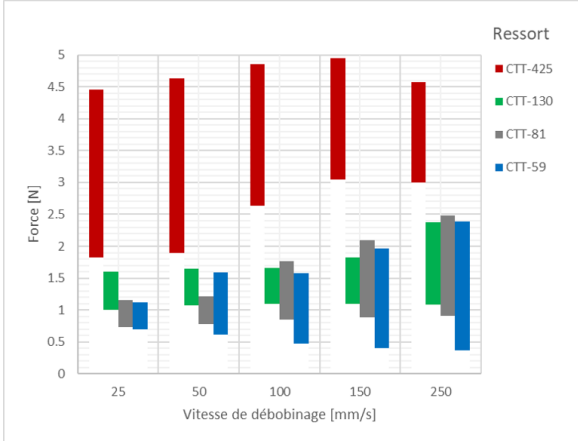
(a) db.SFCA avec fil de nylon



(b) db.SFCA avec fibre de verre



(c) db.CTT avec fil de nylon



(d) db.CTT avec fibre de verre

Figure F.1. Sommaire de l'écart entre la force minimale et maximale des tests de caractérisation

ANNEXE G IDENTIFICATION DES BESOINS DU CLIENT

Le Tableau G.1 présente un regroupement d'interactions avec le client. Le sujet de référence est le débobineur mécanique du LabSFCA. Ainsi, l'identification des besoins du débobineur mécanique servira de base pour les besoins du débobineur actif.

Tableau G.1 Collecte d'informations du client

Questions	Commentaire du client	Interprétation du besoin
Utilisation typique	Il y a des débobineurs rouges et des débobineurs verts (qui sont identiques, mais de géométrie miroir) qui doivent être installés dans la tresseuse maypole, selon s'ils effectuent le parcours horaire ou anti-horaire	Éviter des collisions lors du tressage maypole
	Selon le type de matériau qui est tressé, il faut changer le ressort interne pour ajuster la force de tension dans la fibre lors du tressage	Ajuster la force de tension dans la fibre lors du tressage
	Des poulies en céramique sont utilisées pour rediriger la fibre vers le point de tressage	Réduire les forces de frottement dans la fibre pendant le débobinage
	Des bobines de fibre sont embobinées sur une embobineuse à partir de la bobine de matériel brute et par la suite elles sont installées dans le débobineur mécanique	Embobiner de la fibre brute sur les bobines
	Un bras de levier doté d'une poulie en céramique pivote de haut en bas pour ainsi récupérer une petite longueur de fibre pour assurer qu'elle soit toujours tendue	Maintenir la fibre en tension, même lorsque la longueur de fibre varie durant le parcours maypole lors du tressage
Qualités du débobineur actuel	Il a une structure qui résiste aux changements de direction brusques durant le tressage maypole	Résister aux changements de direction brusques dans le tressage
	Le débobineur mécanique coûte peu et possède beaucoup de pièces de remplacement	Faciliter la maintenance du débobineur
	Le débobineur mécanique peut supporter une quantité de fibre pour que la tresseuse puisse fonctionner pendant 6 heures d'opération	Effectuer un tressage pendant au moins 6 heures
Défauts du débobineur actuel	Il faut changer tous les ressorts dans les 24 à 48 différents débobineurs de la machine de tressage selon le matériau qui est utilisé, ce qui prend énormément de temps	Contrôler rapidement et simplement la force dans la fibre de plusieurs débobineurs simultanément
	Le débobineur actuel ne peut pas être installé sur une tresseuse 3D parce qu'il n'est pas en mesure de rattraper une longue distance de fibre lors de grands déplacements du débobineur	Rembobiner une plus grande quantité de fibre que ce qui est possible avec les débobineurs mécaniques
	Le débobineur actuel ne peut pas effectuer un tressage avec du tape thermoplastique parce que la bobine est verticale et pour tresser avec du tape il faut qu'elle soit horizontale	Effectuer un tressage avec du tape thermoplastique
Améliorations suggérées	Il serait pratique de pouvoir contrôler en temps-réel la force dans la fibre pour effectuer un tressage non-linéaire	Contrôler la force selon des commandes en temps réel
	Il serait pratique de pouvoir sauvegarder des données lors du tressage pour optimiser le procédé et pour détecter des défauts de tressage	Implémenter un système de collecte de données de divers paramètres lors du tressage

ANNEXE H IDENTIFICATION DE SOLUTIONS TECHNIQUES POUR CHAQUE SOUS-SYSTÈME

Puisque chaque sous-système est indépendant l'un de l'autre, il est possible de rechercher des solutions technique pour chaque sous-système, et par la suite de les combiner ensemble pour réaliser un concept. Dans cette sous-section, des solutions techniques seront identifiées pour chaque sous-système, de manière à satisfaire chacun des requis techniques.

Système d'alimentation électrique

Il y a plusieurs moyens de fournir de l'électricité au débobineur actif. Tel que mentionné précédemment, il n'est pas possible d'alimenter le débobineur avec des fils, alors il faut donc que le système d'alimentation électrique soit entièrement embarqué. Il ne peut pas y avoir par exemple un boitier d'alimentation externe qui achemine l'électricité par des câbles. En tenant compte de ces informations, on peut obtenir la liste suivante qui décrit plusieurs idées.

1. Alimentation électrique par induction
   - Tel que pour certains téléphones intelligents qui peuvent se faire recharger par induction, sans qu'ils soient connectés avec un fil, le débobineur actif pourrait peut-être se faire alimenter de cette manière.
   - Pour que ce concept fonctionne, il faut que la machine de tressage soit dotée d'un système d'alimentation électrique par induction.
   - Il faut également que le système électrique du débobineur puisse gérer l'absence d'alimentation électrique lorsque le débobineur se déplace d'une bobine inductive envers une autre. Effectivement, le champ électromagnétique est le plus puissant lorsque la bobine qui reçoit l'énergie est directement au dessus de la bobine qui transmet l'énergie. Lors du passage d'une bobine à une autre, il y a des points morts qui ne reçoivent pas d'énergie.
2. Alimentation électrique par batteries
   - Dans le domaine des drones, avions téléguidés et autres robots sans fil, l'alimentation électrique se fait par des batteries Lithium-Polymère. Ce type de batteries permet d'emmagasiner des grandes quantités d'énergie.
   - Pour que ce concept fonctionne, il faut que le système électrique du débobineur puisse s'adapter à la diminution du voltage engendré par la batterie durant sa décharge.
   - Lors de la décharge des batteries Li-Po, le voltage de ces dernières baisse significativement (de manière non-linéaire). Il faut que le débobineur puisse fonctionner malgré ce phénomène.
3. Alimentation électrique par rails électriques
   - Certains tramways ou wagons de métro se font alimenter électriquement à l'aide de rails électrifiés. Ils possèdent des électrodes qui frottent sur ces rails, et par leur contact constant, permettent le transfert de l'électricité.

— Pour que ce concept fonctionne, il faut que la machine de tressage soit dotée de rails électrifiés. Il faut également s'assurer que les rails électrifiés soient à l'abri de la poussière de carbone pour éviter des court-circuits.

— En raison du déplacement maypole du débobineur, les emplacements ou se trouvent les intersections des débobineurs ne peuvent pas posséder de rails parce que cela pourrait engendrer des court-circuits. Ainsi, il faut que le système électrique soit capable de compenser pour ces points morts.

Système de contrôle de la bobine

Précédemment, une suite logique de raisonnements a été décrite. Cette suite logique est arrivée à la conclusion qu'un moteur devait être utilisé pour contrôler la bobine du débobineur actif. Le système de contrôle de la bobine doit donc prendre en considération le type de moteur ainsi que le type de contrôleur qui peut être utilisé. Il faut également prendre en considération le système de rétroaction qui permet de fermer la boucle et d'asservir le moteur. En premier lieu seront étudiés les systèmes de rétroaction du moteur.

1. Force électromagnétique de résistance (*back-EMF*)
   — Lors de la rotation d'un moteur, les bobines créent un champ électromagnétique qui résulte en une force qui crée une rotation de l'axe du moteur. Lorsque l'axe du moteur tourne, les aimants du stator (ou du rotor) se déplacent à l'intérieur du champ magnétique. Ce déplacement engendre une force électromagnétique qui s'oppose à la rotation, et cette dernière est traduite par un courant induit dans les bobines du moteur.
   — Pour que ce système de rétroaction fonctionne, il faut utiliser un circuit de conditionnement complexe qui est capable de détecter et de quantifier ce courant induit pour le traduire en rétroaction sur l'angle de rotation.
   — Ce type de système est principalement utilisé pour des applications où le moteur doit tourner à haute vitesse. Dans ce type d'applications (par exemple, pour des drones), il est important d'asservir la vitesse de rotation et non la position angulaire du moteur. Ce système est peu précis pour mesurer la position, surtout pour une application à basse vitesse.
2. Encodeur incrémental
   — La majorité des applications sur le marché qui utilisent des moteurs font appel à des encodeurs incrémentaux pour mesurer la position angulaire des moteurs. Ces encodeurs permettent de générer des pulsations électriques mesurables qui se produisent à des moments spécifiques. Par exemple, pour un tour complet (360 degrés), un encodeur incrémental peut produire 600 pulsations, ce qui résulte en une précision de 600 pulsations pour 360 degrés.
   — Pour que ce système fonctionne, il faut que le contrôleur du moteur soit suffisamment rapide pour que chacune des pulsations de l'encodeur soit lue et interprétée dans la boucle de contrôle. De plus, il faut toujours prendre en considération un décalage (*offset*) ou calibration qui correspond à la position angulaire initiale de l'axe de rotation du moteur.
   — Ce type de système est très courant (par exemple, dans les machines à commande numérique) et possède un coût qui est proportionnel à la précision désirée.
3. Encodeur absolu

- Il existe des applications sur le marché qui requièrent de connaitre la position angulaire exacte en tout temps. Un encodeur absolu retourne comme rétroaction un signal unique pour chaque degré de rotation du moteur.
- Pour que ce système fonctionne, il faut déterminer quelle est la précision minimale requise sur le contrôle de la bobine du débobineur. Ce système fonctionne bien à basse vitesse, mais il requiert plus de puissance de calcul de la part du contrôleur parce que pour obtenir la position angulaire.
- Ce type de système est plus rare dans l'industrie parce qu'il coute extrêmement cher, et le coût augmente de manière exponentielle si la précision désirée augmente. Ce système ne requiert pas de décalage (*offset*) ou calibration parce qu'il connait en tout temps la vraie position angulaire du moteur.

Maintenant que l'on a identifié différents dispositifs de rétroaction sur la rotation du moteur, on peut procéder à la recherche de différents types de moteurs qui peuvent satisfaire les requis techniques du système de contrôle de la bobine. Il faut noter que chacun des moteurs présentés ci-dessous fait appel a un type de contrôleur (*motor driver*) spécifique, il n'y aura donc pas de section pour discuter diverses solutions techniques pour les contrôleurs des moteurs.

1. Moteur à courant continu avec brosse (*brushed DC motor*)
   - Ce type de moteur est très courant dans diverses applications (par exemple, dans les avions ou voitures téléguidés, dans des électroménagers, etc.).
   - Pour que ce système fonctionne, il faut que le moteur ne permette pas l'infiltration de poussière (de carbone) qui puisse nuire au contact entre la brosse et les électrodes d'alimentation.
   - De plus, il faut que le contrôleur soit capable de moduler les pulsations du voltage continu (*pulse-width modulation - PWM*) pour faire varier la vitesse de rotation et d'inverser le voltage aux bornes du moteur (pour que le moteur puisse tourner dans les deux sens, et ainsi pouvoir rembobiner la fibre).
2. Moteur à courant continu sans brosse (*brushless DC motor - BLDC*)
   - Ce type de moteur est très courant dans des applications qui requièrent un peu plus de précision. Il n'y a aucun contact entre le stator et le rotor. Le contrôleur du moteur engendre un champ électromagnétique dans les trois phases du moteur, ce qui fait tourner le rotor qui est composé d'aimants permanents.
   - Pour que ce concept fonctionne, il faut que le contrôleur du moteur soit capable de générer trois tensions sinusoïdales déphasées de 120 degrés. Il faut donc employer un type de contrôleur plus sophistiqué que pour un moteur DC avec brosse.
   - La position angulaire peut être obtenue plus précisément avec ce type de moteur parce que le déphasage de chacune des trois phases est directement reliée à l'angle de rotation du rotor.
3. Moteur pas-à-pas (*stepper motor*)
   - Ce type de moteur est très courant dans des applications qui requièrent une grande précision dans la position angulaire. Ces moteurs ont deux bobines individuelles qui sont agencées autour d'un rotor. La synchronisation entre les champs électromagnétiques des deux bobines génère une rotation du rotor. Un exemple d'application serait dans les mécanismes de déplacement pour les imprimantes à papier et les imprimantes 3D. Ce type de moteur possède une caractéristique qui

dicte sa précision. Il s'agit du nombre de pulsations synchronisées requises pour effectuer un tour complet. Un exemple d'ordre de grandeur serait de 200 pulsations par révolution.

— Pour que ce concept fonctionne, il faut que le contrôleur du moteur soit capable de générer quatre signaux synchronisés. Une multitude de contrôleurs peu chers correspondants existe sur le marché (tel que le A4988 ou le TMC2130).

— Une particularité de ce type de moteur est qu'il tourne toujours de manière saccadée, contrairement aux deux autres types de moteurs. Il va toujours tourner d'une pulsation à la fois (ce qui représente une rotation de 0.55 degrés). Cela signifie que la rotation du moteur n'est pas fluide et donc peut engendrer des vibrations dans la fibre durant le débobinage.

Système d'acquisition de données

Le système d'acquisition des données doit regrouper divers capteurs qui peuvent être intéressants pour des fins d'analyse. La liste suivante regroupe diverses idées de données qui peuvent être pertinentes pour le débobineur actif. Il faut noter que ces solutions techniques ne sont pas en compétition l'une contre l'autre, mais il s'agit plutôt d'une liste de mesures qui pourraient être mesurées et sauvegardées suite à une entente avec le client.

1. Mesure du rayon effectif de la fibre sur la bobine
   — Puisque durant le débobinage la quantité de fibre sur la bobine diminue, cela entraîne une réduction du rayon effectif de la fibre sur la bobine. Ce paramètre correspond à la distance entre l'axe de rotation du moteur et le point ou la fibre quitte la bobine pour se diriger vers le point de tressage.
   — Puisqu'un système de mesure de l'angle du moteur sera utilisé, il sera possible de connaitre en tout temps la position angulaire du moteur. Ainsi, en connaissant le rayon effectif de la fibre et la distance angulaire, il est possible d'estimer la longueur de fibre débobinée ainsi que la quantité de fibre restante.
   — En connaissant le rayon effectif de la fibre, il est possible de calculer le couple du moteur à partir de la force dans la fibre et vice versa.
   — Il y a une multitude d'options pour ce genre de capteur : capteur à ultrasons, capteur infrarouge ou capteur angulaire avec surface de contact sur la fibre. Le capteur à ultrasons et le capteur infrarouge pour la mesure de la distance ne sont pas des options viables parce qu'ils ne sont pas suffisamment précis en raison de la réflexion non-uniforme sur les divers matériaux. Ainsi, tout en satisfaisant la CO-8 (avoir au maximum 1 surface de frottement avec la fibre), un potentiomètre avec un bras de levier maintenu en contact sur la fibre sera envisagé.
   — Ces mesures peuvent permettre de détecter s'il y a des défaillances au niveau de la fibre sur la bobine (si le capteur détecte des grosses variations dans la mesure du rayon, cela signifie qu'il y a peut-être un nœud dans la fibre qui peut augmenter ponctuellement le rayon mesuré).
2. Mesure de paramètres électriques du moteur
   — Puisque le moteur devra fonctionner tout au long du débobinage, il peut être intéressant de mesurer les niveaux de tension et de courant qui sont envoyés au bornes du moteur. Ceci peut permettre d'estimer la puissance électrique du moteur, et par la suite d'estimer le couple que le moteur produit.

- Ces capteurs sont des petits circuits électriques qui peuvent mesurer le courant grâce à une résistance shunt et qui peuvent également mesurer le voltage.
- Ces données peuvent également permettre d'estimer la consommation électrique du moteur et de valider que le système d'alimentation électrique peut supporter cette consommation électrique.

3. Mesure de la température du moteur
   - Puisque le moteur devra engendrer une force constante dans la fibre, cela signifie qu'il devra produire un couple constant. Selon la relation mathématique qui relie la puissance électrique à la puissance mécanique, on peut déduire que pour produire un couple constant, il faut que la puissance électrique dans le moteur soit constante. Cela signifie que la présence de courant électrique dans le moteur risque de produire également de la chaleur durant l'utilisation. Cette chaleur pourrait se transmettre par conduction à la fibre pour le tressage, ce qui pourrait causer des problèmes si le matériau débobiné est à base de filament pré-imprégné de résine (parce que la résine pourrait commencer à se consolider sur la bobine avant la fin du tressage).
   - Ces capteurs sont majoritairement basés sur des thermocouples qui varient en résistance lorsque la température change. Cette variation de résistance est mesurable et convertie en température.
   - En mesurant la température du moteur, il serait possible de détecter s'il y a des problèmes thermiques lors de l'opération du débobineur actif.
4. Mesure de la température dans le boitier (structure du débobineur)
   - Puisque la structure du débobineur actif devra être étanche pour satisfaire la CO-3, cela signifie qu'il n'y aura pas de circulation d'air pour pouvoir refroidir les divers composants électriques présents à l'intérieur du boitier.
   - Ces capteurs sont majoritairement basés sur des thermocouples qui varient en résistance lorsque la température change. Cette variation de résistance est mesurable et convertie en température.
   - En mesurant la température à l'intérieur du boitier, il serait possible de prévenir des problèmes liés à la surchauffe des composants électriques.
5. Mesures du système d'alimentation électrique
   - Peu importe le type de système électrique choisi, il peut être intéressant de mesurer la tension de l'alimentation au débobineur ainsi que le courant qui est utilisé pour le fonctionnement.
   - Ces capteurs sont des petits circuits électriques qui peuvent mesurer le courant grâce à une résistance shunt et qui peuvent également mesurer le voltage.
   - Ces données pourraient permettre de détecter des défaillances au niveau de l'alimentation électrique.
6. Mesure des accélérations lors du débobinage
   - Puisque le débobineur actif devra être testé lors de travaux futurs dans la tresseuse du LabSFCA, la mesure des accélérations lors du tressage peut permettre d'estimer la position du débobineur dans l'espace de tressage de la machine. Étant donné que le déplacement durant le tressage maypole suit un comportement périodique oscillatoire constant, la mesure des accélérations peut détecter un changement de direction du vecteur d'accélération normal au déplacement, ce qui peut permettre d'estimer la position du débobineur.
   - Ces capteurs sont des petits circuits électriques qui peuvent effectuer des mesures des accélérations dans les trois axes possibles.

— Ces données pourraient également permettre de détecter des défaillances qui pourraient être ressenties sous forme de vibrations dans la structure du débobineur.

7. Mesure de la force dans la fibre
   — Puisque la majorité des fonctions principales du débobineur actif consiste à contrôler avec précision la force dans la fibre, il faut être capable de mesurer ladite force. Combinée avec la mesure du rayon effectif de la fibre, il peut être possible de calculer le couple produit par le moteur et vice-versa.
   — Les capteurs de force à petit échelle sont tous basés sur des corps d'épreuve en métal avec des jauges de déformation qui mesurent la déformation.
   — La mesure de la force dans la fibre peut permettre de détecter des anomalies lors du débobinage (tel que le bris de la fibre).

Système de communication sans fil

Le système de communication sans fil doit permettre à l'opérateur de contrôler le débobineur et il doit permettre au débobineur de communiquer des informations importantes à l'opérateur (telles que des messages d'alerte). Le système de communication sans fil peut être divisé en deux catégories distinctes : le matériel physique qui permet la communication sans fil et la technologie sans fil qui permet la communication. Le matériel physique correspond au circuit électrique qui permet d'utiliser une technologie de communication sans fil. La technologie sans fil correspond au moyen employé pour transmettre l'information entre le débobineur et l'opérateur (par exemple, les technologies Bluetooth, WiFi, etc.).

En ce qui concerne l'aspect matériel, la liste ci-dessous permet d'identifier plusieurs solutions techniques qui peuvent satisfaire les requis de ce sous-système.

1. Micro-contrôleur avec processeur de type Atmel, STM32 ou ARM
   — Il y a une grande variété de micro-contrôleurs de prototypage sur le marché. Ils sont peu dispendieux et il y a énormément de documentation technique. Ce genre de matériel est programmé dans le langage compilé C ou C++. La structure de programmation consiste en une boucle qui commence dès que le dispositif est alimenté en électricité et se répète à l'infini (ou jusqu'à ce que que le dispositif soit débranché). La fréquence de fonctionnement typique du processeur de ce genre de micro-contrôleurs se trouve entre 16 MHz et 600 MHz. Ceci peut donner une idée de la vitesse maximale d'exécution de commandes.
   — Il y a une multitude de modules qui peuvent fonctionner avec les micro-contrôleurs. Ainsi, il est possible de faire fonctionner n'importe quelle technologie de communication sans fil avec ce type de dispositif. Toutefois, l'espace mémoire de ce genre de dispositif est limité et il n'est pas possible de sauver localement les données. Pour cela, il faudrait utiliser un module supplémentaire permettant par exemple de sauver les données sur une carte micro-SD.
2. Système sur puce (*system on a chip - SOC*) Raspberry Pi
   — Ces micro-ordinateurs ont la taille d'une carte de crédit et ils sont capables de rouler un système d'exploitation qui est une distribution de Linux (Raspbian). Cela signifie qu'ils sont assez puissants pour permettre un affichage graphique similaire à un ordinateur de bureau. De plus, ces micro-ordinateurs sont également dotés de technologie Bluetooth 4.0 et d'une puce de communication par WiFi 802.11n (utilisant la bande 2.4 GHz). Ce genre de matériel peut être programmé avec une

multitude de langages de programmation (C, C+, Java, Python, Node-js, etc.). Les processeurs de ces modules peuvent fonctionner entre 1 GHz et 1.5 GHz. De plus, les données peuvent être sauvegardées directement sur le disque, car tout le système d'exploitation est installé sur une carte micro-SD (qui doit avoir au minimum 8 Gb d'espace mémoire).

— Il y a une multitude de modules qui peuvent fonctionner avec ce micro-ordinateur et qui possèdent déjà des librairies (programmes) pour les utiliser.

3. Micro-contrôleur ESP8266 ou ESP32
   — Ce type de micro-contrôleur est identique à ceux mentionnés plus haut, mais à une différence près : ils sont dotés d'une puce WiFi 802.11 b/g/n (utilisant la bande 2.4 GHz). Certains micro-contrôleurs sont également dotés de puces Bluetooth. Il y a une multitude de designs différents qui offrent déjà plusieurs modules intégrés sur le circuit électrique. La vitesse des processeurs peut varier entre 160 MHz et 320 MHz. Il n'y a pas de mémoire intégrée pour sauvegarder les données, il faut donc employer un module externe au besoin (ou utiliser une variante du micro-contrôleur qui possède un emplacement pour la lecture de cartes micro-SD).
   — Ces micro-contrôleurs peuvent héberger un serveur web accessible par l'opérateur sur lequel il pourrait avoir accès à diverses informations. Il pourrait également contrôler le débobineur sur cette interface web.

En ce qui concerne la technologie de communication sans fil, il existe les solutions techniques qui sont présentées sur la liste suivante. Il faut noter que les performances de toutes ces solutions sont affectées indirectement par des phénomènes d'interférence qui peuvent diminuer les performances (par exemple, des objets ou des obstacles pourraient réduire la distance maximale de communication, ou bien pourraient interférer avec les autres signaux électromagnétiques).

1. Communication par Bluetooth
   — Toutes les solutions techniques matérielles mentionnées ci-haut sont capable d'interfacer avec des modules permettant une communication par Bluetooth. Il existe déjà plusieurs librairie pour faciliter l'utilisation de cette technologie.
   — La distance de communication peut varier entre 10 mètres (pour les versions antérieures a 4.0) et allant jusqu'à une centaine de mètres (pour les versions 4.0 et plus récentes). Si la distance que l'information doit parcourir augmente, la vitesse d'envoi des données doit diminuer. Pour donner un ordre de grandeur, la technologie Bluetooth 4.0 permet d'envoyer des données à une fréquence variant entre 125 kbps et 2 Mbps.
2. Communication par WiFi
   — Toutes les solutions techniques matérielles mentionnées ci-haut sont capables d'interfacer avec des modules permettant une communication par WiFi. Il existe déjà plusieurs librairie pour faciliter l'utilisation de cette technologie.
   — La distance de communication par WiFi 802.11n est de l'ordre de grandeur de 40 mètres et la vitesse de communication théorique maximale se trouve entre 300 Mbps et 450 Mbps.

Système de structure

Le système de structure du débobineur actif doit permettre à tous les composants électriques et mécaniques d'être assemblés. En d'autres mots, le système de structure agit comme une colle qui connecte tous les autres

sous-systèmes ensemble. Selon l'étude des besoins du client et en se basant sur les débobineurs mécaniques déjà existants sur le marché, il peut être conclu que la forme du débobineur actif sera de type cylindrique avec un diamètre maximal de 12 cm et une hauteur d'un ordre de grandeur similaire aux débobineurs mécaniques étudiés. De plus, pour satisfaire la CO-3 (fonctionner en milieu poussiéreux) et la CO-7 (être simple à assembler) simultanément, il est impossible d'assembler la structure du débobineur en utilisant du scellant parce que cela rendrait le démontage et la maintenance difficile, même si la protection contre l'infiltration de la poussière serait satisfait à la perfection. Ainsi, pour prévenir l'infiltration de la poussière, la seule solution possible est l'utilisation d'un matériau caoutchouteux comprimé entre les divers composants structuraux. Cette solution technique permet de rendre le boitier étanche envers la poussière. Une fois que les autres composants de chacun des sous-systèmes seront choisis, il sera possible de concevoir la structure du débobineur actif et d'optimiser la géométrie de manière à réduire la masse le plus possible pour satisfaire la CO-5 (être le plus léger possible).

ANNEXE I CLASSEMENT DES SOLUTIONS TECHNIQUES

L'ensemble des solutions techniques identifiées pour chacun des sous-systèmes peut être regroupé dans le Tableau I.1 ci-dessous. Chacune des solutions technique est accompagnée par une liste d'avantages et d'inconvénients.

Tableau I.1 – Sommaire des solutions techniques

Sous-système	**Concept**	**Avantages**	**Inconvénients**
Système d'alimentation électrique	1. Alimentation électrique par induction	Permet une alimentation sans fil N'est pas limité en terme d'autonomie	Il faut modifier la machine de tressage Il faut un système complexe pour assurer une alimentation constante et fiable Pourrait possiblement causer de l'interférence avec l'ordinateur de bord
	2. Alimentation électrique par batterie Li-Po	Permet une alimentation sans fil Multitude de dimensions disponibles qui peuvent fournir diverses durées d'autonomie	Il faut un système capable de compenser pour la baisse de tension de la batterie Il faut un système capable de protéger la batterie contre la surcharge et une décharge excessive La quantité d'énergie emmagasinée est directement proportionnelle à la dimension de la batterie
	3. Alimentation électrique par rails électriques	Permet une alimentation sans fil N'est pas limité en terme d'autonomie	Prône à l'usure par frottement Peut causer des court-circuits s'il y a des dépôts de poussière de carbone Il faut un système complexe pour assurer une alimentation constante et fiable
Système de rétroaction pour le contrôle de la bobine	1. Lecture de la force électromagnétique de résistance	Permet une rétroaction sur la vitesse de rotation	Circuits complexes et peu précis pour la mesure de la position La mesure est largement dépendante de la construction du moteur

Tableau I.1 – Sommaire des solutions techniques

Sous-système	**Concept**	**Avantages**	**Inconvénients**
			Ne permet pas de détecter le sens de rotation du moteur
	2. Encodeur incrémental	Permet de mesurer la position et la vitesse avec précision Coute peu cher Permet de lire le sens de rotation	Requiert un contrôleur rapide pour lire toutes les pulsations Doit effectuer une calibration pour connaître la position initiale
	3. Encodeur absolu	Permet de connaître la position exacte de l'axe du moteur Permet de lire le sens de rotation Ne requiert pas de calibration	Coûte très cher pour avoir une bonne précision
Système de rotation de la bobine	1. Moteur à courant continu à brosse	Coûte peu cher	Requiert souvent un boitier de réduction pour fonctionner adéquatement Les brosses peuvent être susceptible à l'usure
	2. Moteur à courant continu sans brosse (BLDC)	Le contrôle de la rotation du moteur est fluide Aucune surface de frottement dans le moteur	Requiert un contrôleur plus sophistiqué Peut être susceptible à surchauffer
	3. Moteur pas-à-pas	Peut être contrôlé en position de manière précise Multitude de circuits de contrôle peu chers disponibles	Peut introduire des vibrations dans la rotation de la bobine Est typiquement plus gros que les autres types de moteurs
Système d'acquisition des données	1. Mesure du rayon effectif de la fibre sur la bobine	Permet de mesurer la quantité de fibre Coûte peu cher	Engendre une surface de frottement Occupe une charge supplémentaire à l'ordinateur de bord
	2. Mesure des paramètres électriques du moteur	Permet de surveiller l'alimentation du moteur	Occupe une charge supplémentaire à l'ordinateur de bord

Tableau I.1 – Sommaire des solutions techniques

Sous-système	**Concept**	**Avantages**	**Inconvénients**
	3. Mesure de la température du moteur	Permet de détecter une surchauffe du moteur	Occupe une charge supplémentaire à l'ordinateur de bord
	4. Mesure de la température dans le boitier	Permet de détecter une surchauffe du boitier	Occupe une charge supplémentaire à l'ordinateur de bord
	5. Mesure du système d'alimentation électrique	Permet de surveiller l'alimentation électrique	Occupe une charge supplémentaire à l'ordinateur de bord
	6. Mesure des accélérations lors du débobinage	Permet d'estimer l'emplacement du débobineur dans la tresseuse Permet de détecter des problèmes de bris mécaniques	Occupe une charge supplémentaire à l'ordinateur de bord
	7. Mesure de la force dans la fibre	Permet de contrôler la force dans la fibre	Occupe une charge supplémentaire à l'ordinateur de bord Utilise des corps d'épreuve avec jauges de déformation, requiert un étalonnage précis
Système matériel de communication sans fil	1. Micro-contrôleur avec processeur de type Atmel, STM32 ou ARM	Coûte peu cher Beaucoup de librairies disponibles pour tous les modules Consomme peu de courant	Aucun module de communication intégré Programme doit être compilé et transféré via USB (pas faisable distance)
	2. Système sur puce Raspberry Pi	Possède déjà des technologies de communication sans fil Plus de puissance de calcul Espace pour sauvegarde des données intégré Beaucoup de librairies disponibles pour tous les modules Offre la possibilité de programmation en plusieurs langages distincts	Coûte plus cher Consomme plus de courant

Tableau I.1 – Sommaire des solutions techniques

Sous-système	**Concept**	**Avantages**	**Inconvénients**
	3. Micro-contrôleur ESP8266 ou ESP32	Coûte peu cher Beaucoup de librairies disponibles pour tous les modules Consomme peu de courant Possède une puce WiFi intégrée Possibilité de trouver des designs avec des modules intégrés	Aucun module de communication intégré Programme doit être compilé et transféré via USB (pas faisable distance)
Système technologique de communication sans fil	1. Communication par Bluetooth	Vitesse de communication et distance adéquate Possède un mode à basse consommation énergétique	
	2. Communication par WiFi	Vitesse de communication et distance adéquate Possède un mode à basse consommation énergétique	

ANNEXE J SPÉCIFICATIONS DU BDDRIVE V2

Le BDDrive V2 a été développé par un étudiant à partir des schémas libre d'accès selon la Licence MIT. Ce circuit de contrôle utilise un logiciel de contrôle pour l'asservissement de moteurs triphasés selon plusieurs modes. Il est possible de retrouver les fichiers originaux ainsi que le code source du firmware sur le site GitHub : `https://github.com/odriverobotics/ODrive`. Le circuit original a été modifié pour avoir un régulateur de tension 5V à bord pour pouvoir alimenter tous les composants à partir de l'alimentation électrique de la batterie. De plus, un circuit pour mesurer les accélérations et pour mesurer le bras de levier ont été incorporés directement sur le BDDrive afin de réduire les connections électriques avec fils. Les FiguresJ.1 à J.3 montrent plusieurs vues du BDDrive V2. Une seule modification a été apportée au niveau du firmware du circuit de contrôle : des résistances shunt de 0.015Ω ont été utilisées au lieu de 0.0005Ω pour augmenter la précision de la mesure du courant dans les phases du moteur. Cela a eu pour effet de diminuer la plage maximale de courant pouvant être envoyé au moteur tout en augmentant la précision des mesures. Effectivement, le circuit de base pouvait contrôler des moteurs jusqu'à 90 A. Pour le fonctionnement du débobineur actif, il a été déterminé que 10 A était suffisant pour réaliser la force dans la fibre requise.

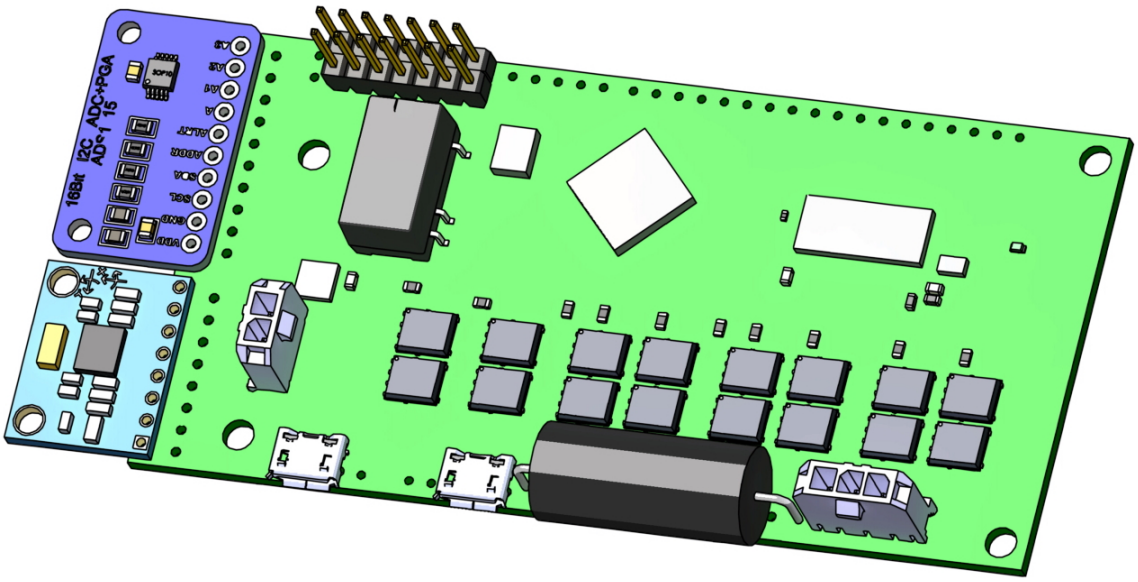


Figure J.1. Vue 3D du BDDrive V2 avec les circuits de mesure des accélérations (en bleu pâle) et du bras de levier (en bleu foncé)

Le circuit de contrôle agit comme un serveur qui prend en entrée, via communication USB, des commandes sous formes de caractères et qui agit en conséquent. La documentation entière par ODrive Robotics est retrouvée ici : `https://docs.odriverobotics.com/`. Voici quelques exemples de commandes utilisées très souvent :

— Imposer une limite du courant au moteur de 10 A :

  odrv0.axis0.motor.config.current_lim = 10

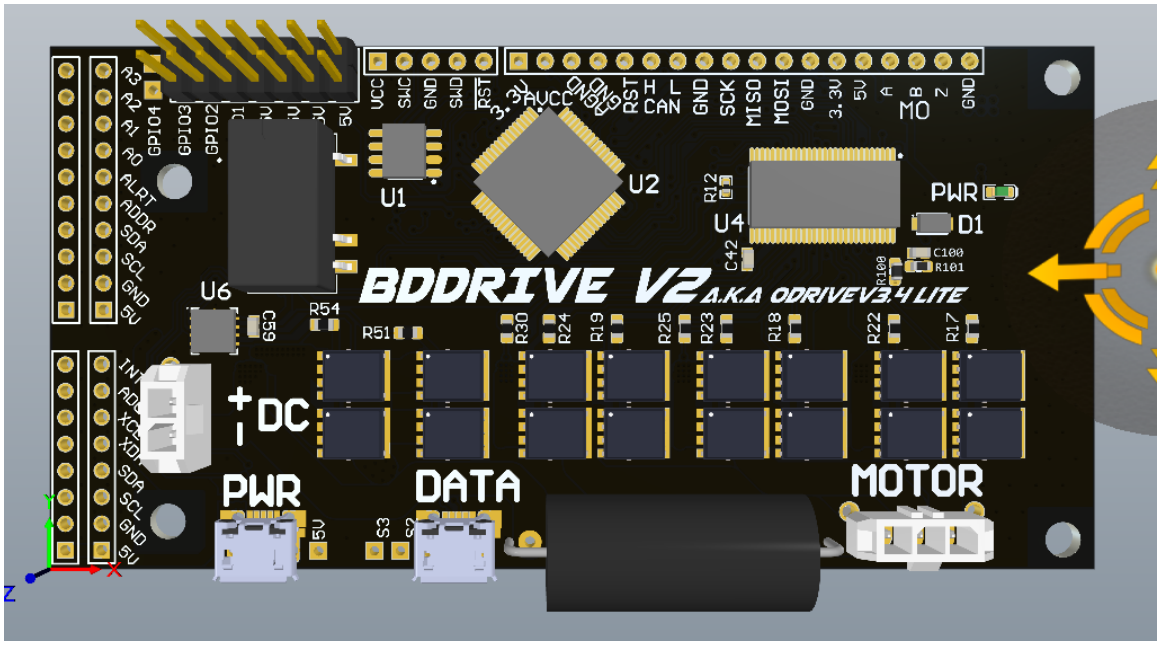


Figure J.2. Vue de face du BDDrive V2

— Imposer une limite de vitesse de rotation du moteur de 5 tours/sec :
odrv0.axis0.controller.config.vel_limit = 5

— Effectuer la séquence de calibration du moteur :
odrv0.axis0.requested_state = AXIS_STATE_FULL_CALIBRATION_SEQUENCE

— Demander un contrôle en position filtré pour que la rotation du moteur soit lisse :
odrv0.axis0.controller.config.input_mode = INPUT_MODE_POS_FILTER

— Demander une bande passante du contrôle filtré en position de 50 Hz :
odrv0.axis0.controller.config.input_filter_bandwidth = 50

— Demander un asservissement en position :
odrv0.axis0.controller.config.control_mode = CONTROL_MODE_POSITION_CONTROL

— Demander un asservissement en vitesse :
odrv0.axis0.controller.config.control_mode = CONTROL_MODE_VELOCITY_CONTROL

— Demander un asservissement en couple :
odrv0.axis0.controller.config.control_mode = CONTROL_MODE_TORQUE_CONTROL

— Demander un contrôle en trajectoire :
odrv0.axis0.controller.config.input_mode = INPUT_MODE_TRAP_TRAJ

— Mettre le contrôleur en boucle fermée :
odrv0.axis0.requested_state = AXIS_STATE_CLOSED_LOOP_CONTROL

— Arrêter l'asservissement du moteur (libère le moteur) :
odrv0.axis0.requested_state = AXIS_STATE_IDLE

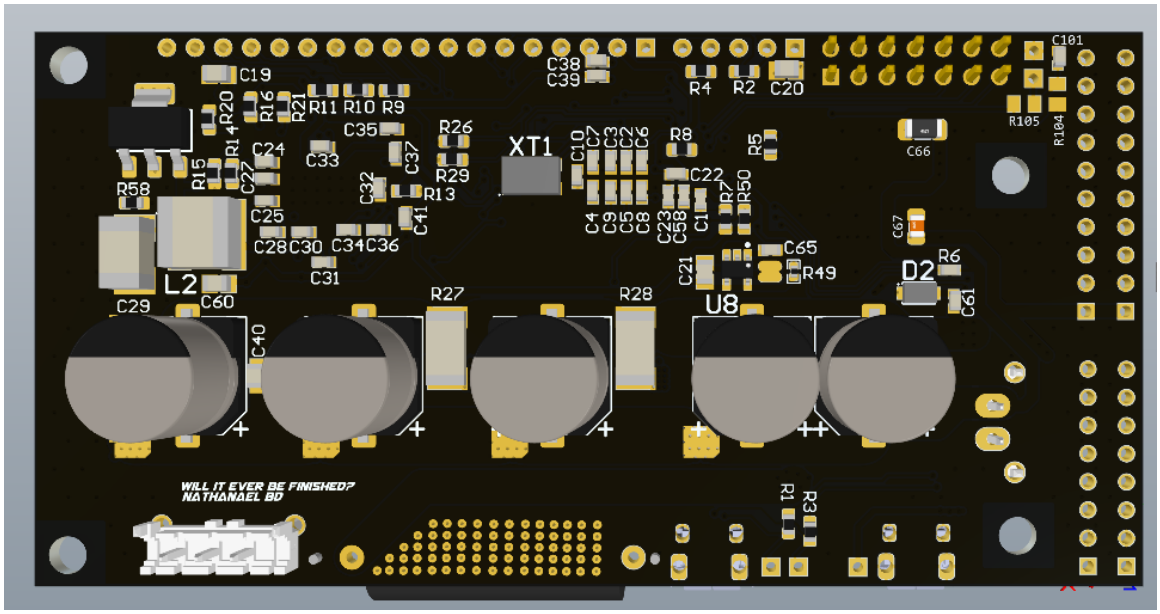


Figure J.3. Vue de dos du BDDrive V2

— Afficher et effacer les messages d'erreur :

  dump_errors(odrv0,True)

— Afficher le voltage de l'alimentation électrique :

  odrv0.vbus_voltage

— Modifier le paramètre de pulsations de l'encodeur à 8196 (selon les spécifications de l'encodeur choisi) :

  odrv0.axis0.encoder.config.cpr = 8196

— Modifier la constante de couple théorique du moteur définie par $8.27/K_v$ (avec le K_v du moteur utilisé de 1000 RPM/V) :

  odrv0.axis0.motor.config.torque_constant = 0.00827

Il existe une multitude d'autres fonctions que le circuit de contrôle peut exécuter ainsi qu'une grande variété d'attributs qui peuvent être ajustés pour améliorer les performances du moteur asservi. Il est possible par exemple de modifier les constantes du contrôleur PID pour améliorer le temps de réponse ou réduire les oscillations. Il y a une plusieurs entrées différentes (*input*) qui peuvent être utilisées pour que la rotation du moteur soit plus lisse. Par exemple, pour un contrôle en position sans l'utilisation d'un filtre sur l'entrée, le moteur va tourner le plus rapidement possible (*velocity limit*) pour atteindre la position désirée, et par la suite il s'arrête d'un coup sec. Un contrôle filtré, quant à lui, génère une accélération et décélération pour réduire le coup d'impact lorsque le moteur commence à tourner et lorsqu'il s'arrête.

ANNEXE K INTERFACE DE CONTRÔLE DES DÉBOBINEURS ACTIFS

Les débobineurs actifs exécutent un programme Python en boucle infinie. Lorsque l'opérateur démarre le débobineur, le Raspberry Pi est mis sous tension, et prend entre 30 et 60 secondes à démarrer et à se connecter au WiFi. Une fois connecté au WiFi, l'opérateur en prend le contrôle a distance en utilisant le logiciel VNC Viewer (une technologie similaire à *Remote Desktop Connection* pour Windows). Ensuite, l'opérateur démarre le script Python. Celui-ci se connecte au serveur MQTT avec son adresse IP et s'abonne à divers "sujets" (*topics*) de manière programmée en fonction de l'adresse MAC de chacun des Raspberry Pi. Finalement, le programme est en boucle infinie en attente d'instructions. À chaque intervalle de temps, le Raspberry Pi effectue la lecture de la batterie Li-po ($\delta T = 10s$), la lecture des accélérations ($\delta T = 10s$) et la lecture du rayon effectif de la fibre (($\delta T = 2s$). Il y a un *thread* pour la communication via MQTT et un *thread* pour chacune des lectures.

Lors de la boucle infinie, le Raspberry Pi est en attente de messages aux sujets qui ont été abonnés. Par exemple, un débobineur pourrait être abonné aux sujets *bm/carrier_5*, *bm/all* et il pourrait publier des messages au sujet *bm/carrier_5/response*, *bm/all/ping*. Les messages sont des chaines de caractères (*string*) qui sont décodées par le programme Python. Pour des tests manuels, l'opérateur peut utiliser l'application gratuite MQTT.fx pour se connecter au serveur MQTT et envoyer/recevoir des messages. Voici une liste de messages que l'opérateur pourrait envoyer au débobineur actif. Ces messages sont décodés s'ils appartiennent à quelconque sujet abonné.

- Envoie un message pour détecter tous les débobineurs connectés, le débobineur répond avec son numéro d'identifiant : *ping*
- Efface les messages d'erreur du circuit de contrôle du moteur : *dump_errors*
- Demande la mesure du rayon effectif de la fibre, le débobineur retourne la valeur : *radius*
- Demande le voltage de la batterie, le débobineur retourne la valeur : *battery*
- Demande le courant du bus d'alimentation, le débobineur retourne la valeur : *i_bus*
- Demande une calibration du moteur : *calibration*
- Demande un contrôle en position à 1.5 tours : *pos_setpoint,1.5*
- Demande un contrôle en couple de 0.03 Nm : *torque_setpoint,0.03*
- Demande un contrôle en vitesse de 7.3 tours/sec : *vel_setpoint,7.3*
- Arrête l'asservissement : *idle*
- Demande au circuit de contrôle de redémarrer : *reboot*

Il y a une multitude d'autres fonctionnalités disponibles et il est simple d'en implémenter de nouvelles en utilisant cette architecture. De plus, chacun des débobineur possède un fichier *config.ini* qui sauvegarde les paramètres de calibration. Parmi ces paramètres, il y a l'équation de l'étalonnage de la mesure du rayon effectif de la fibre ainsi que l'équation de l'étalonnage de la force en fonction du couple.

ANNEXE L COÛTS DE FABRICATION

Dans le développement du débobineur actif, plusieurs prototypes ont été fabriqués. Le coût de chaque débobineur a été prévu pour 12 unités (selon les demandes du client). Le Tableau L.1 ci-dessous regroupe le cout de tous les composants principaux qui composent le débobineur actif. Les frais de dédouanement et de livraison ne sont pas tenus en considération. Le coût de certains composants est estimé (tel que le matériel d'impression 3D ainsi que la quincaillerie, fils électriques et autres).

Tableau L.1 Coût de toutes les pièces du débobineur actif

Composant	**Coût $ CAD**
Moteur BR2212	8.00
Encodeur AMT102-V	30.22
Raspberry Pi Zero W avec carte micro-SD	32.30
BDDrive V2	94.56
Batterie Li-Po HRB 4s 5000mAh	70.00
Système de protection de la batterie (BMS)	3.99
Régulateur de voltage de la batterie	3.50
Quincaillerie, fils électriques et autres	15.00
Pièces imprimées 3D	32.00
TOTAL	289.57

ANNEXE M RÉSULTATS DE CARACTÉRISATION DU DÉBOBINEUR ACTIF

Dans cette section, on présente tous les graphiques qui ont été générés à partir des résultats de tests.

Résultats du db.ACT avec fil de nylon

Les Figures M.1 à M.5 présentent les résultats de tests pour tous les échantillons par consigne de couple à chaque palier de vitesse.

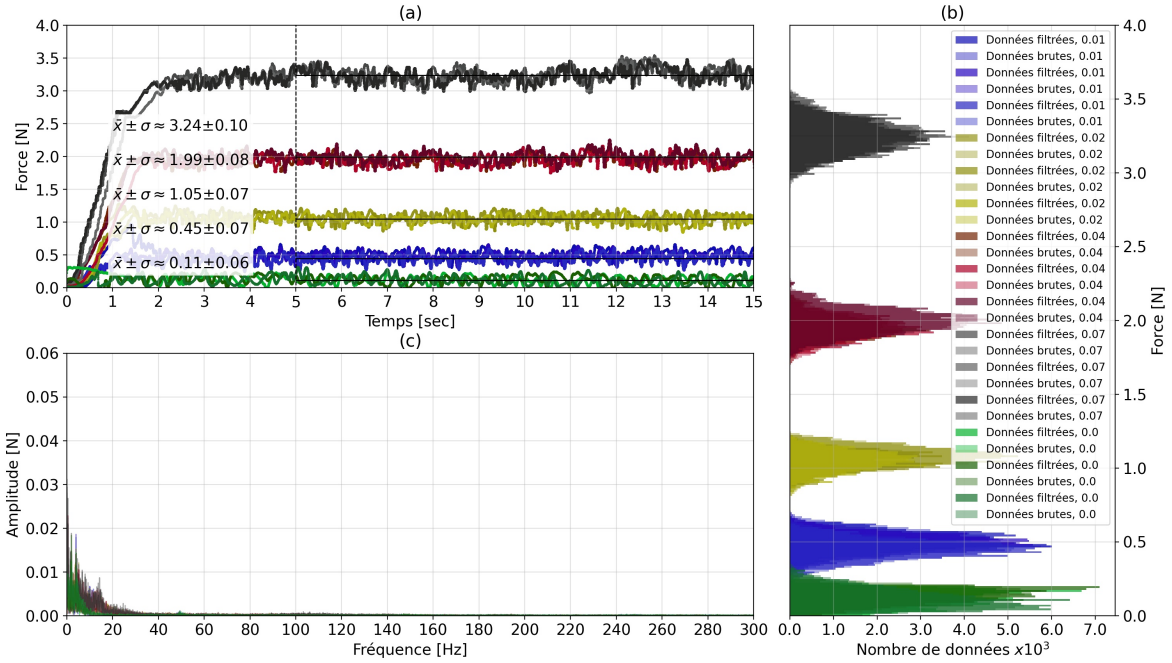


Figure M.1. Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, tous les échantillons pour un débobinage à 25mmps

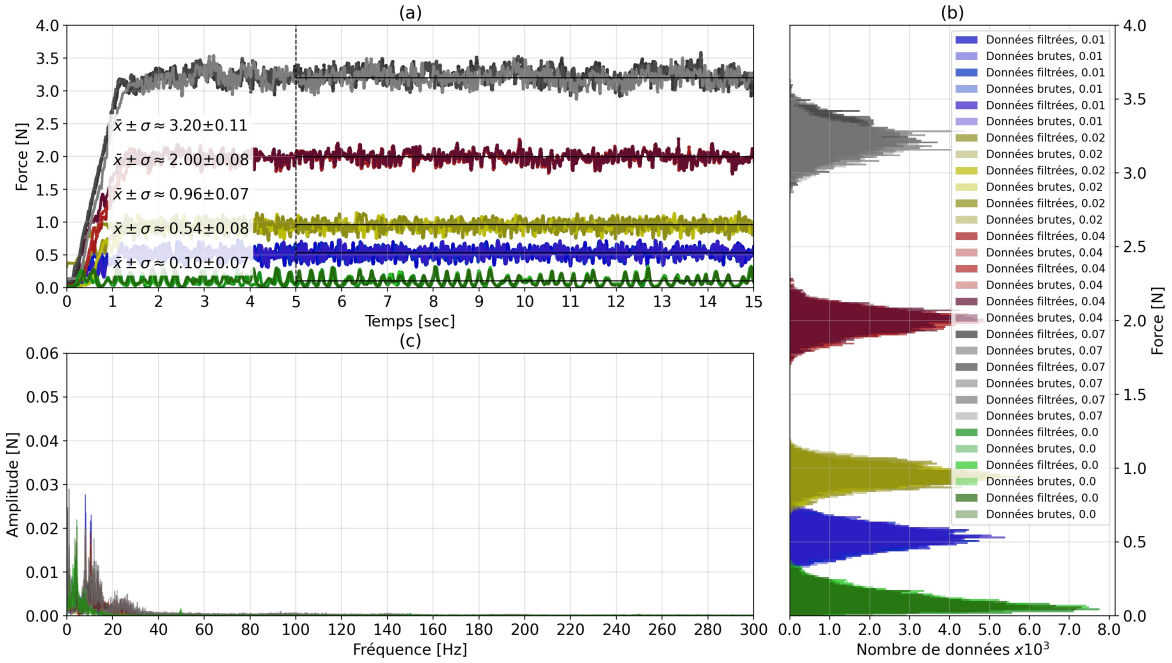


Figure M.2. Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, tous les échantillons pour un débobinage à 50mmps

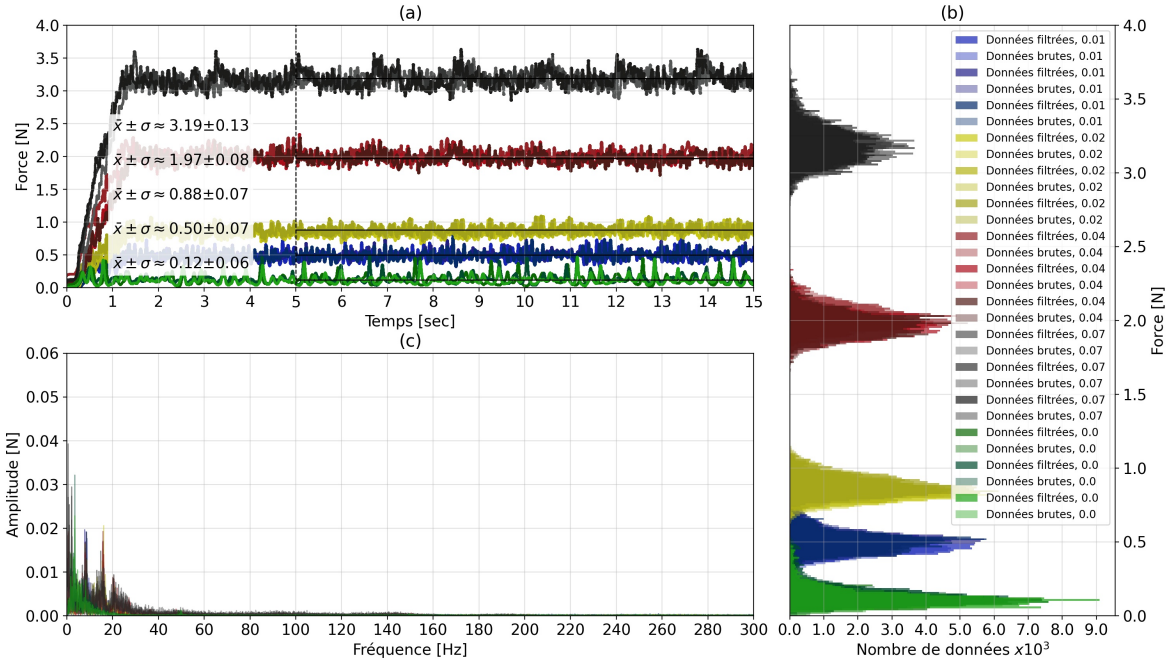


Figure M.3. Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, tous les échantillons pour un débobinage à 100mmps

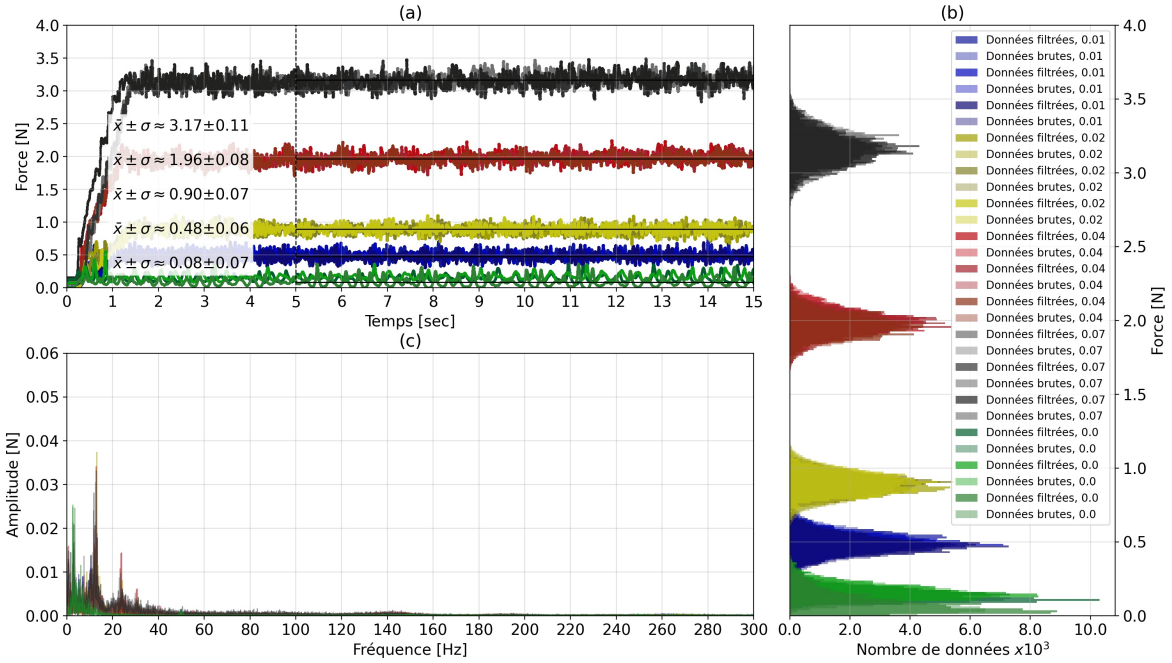


Figure M.4. Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, tous les échantillons pour un débobinage à 150mmps

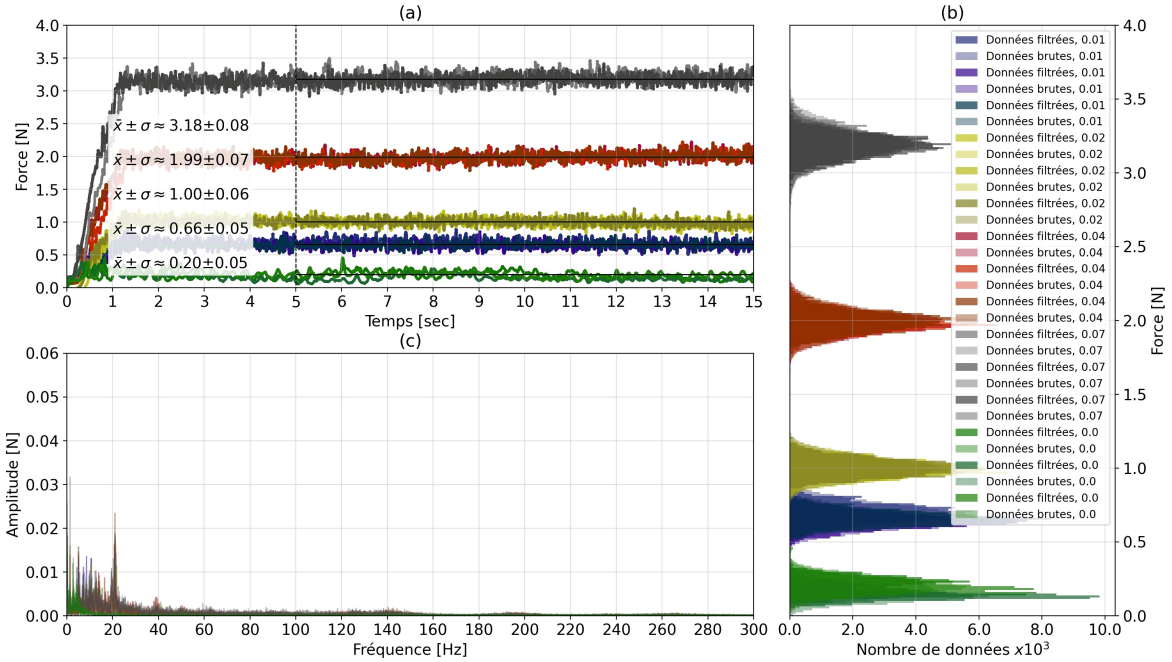


Figure M.5. Toutes les consignes du db.ACT avec fil de nylon, tous les échantillons pour un débobinage à 250mmps

Les Figures M.6 à M.10 illustrent la variation de la force pour chaque consigne de couple du débobineur actif avec fil de nylon.

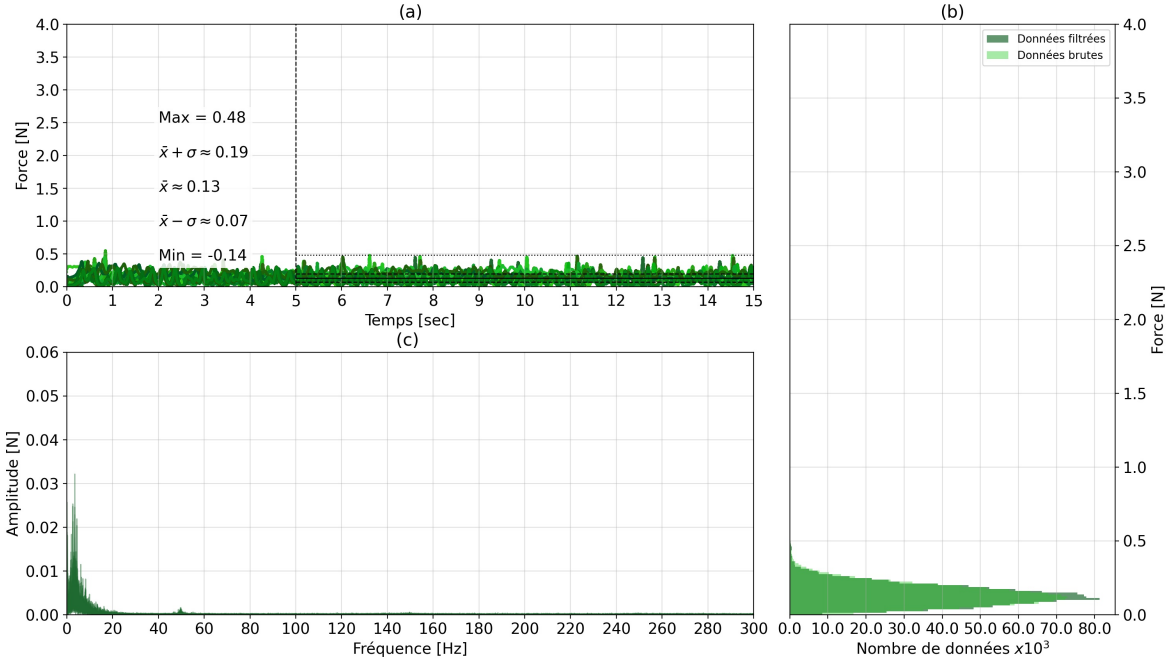


Figure M.6. Consigne de 0.0Nm pour db.ACT avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

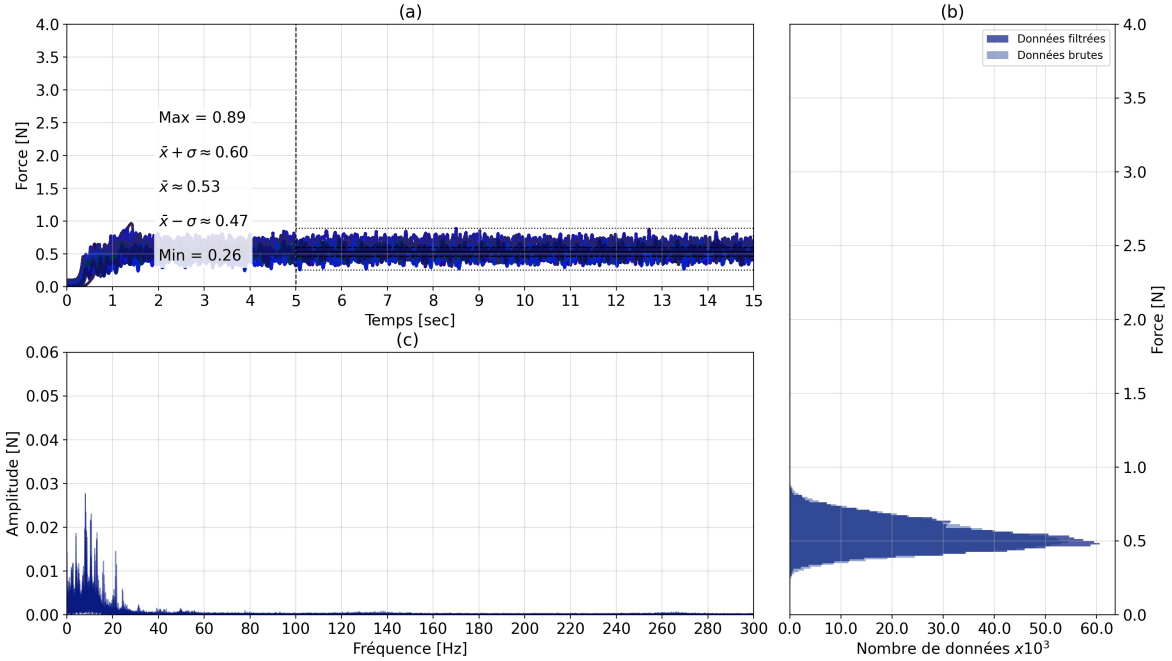


Figure M.7. Consigne de 0.01Nm pour db.ACT avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

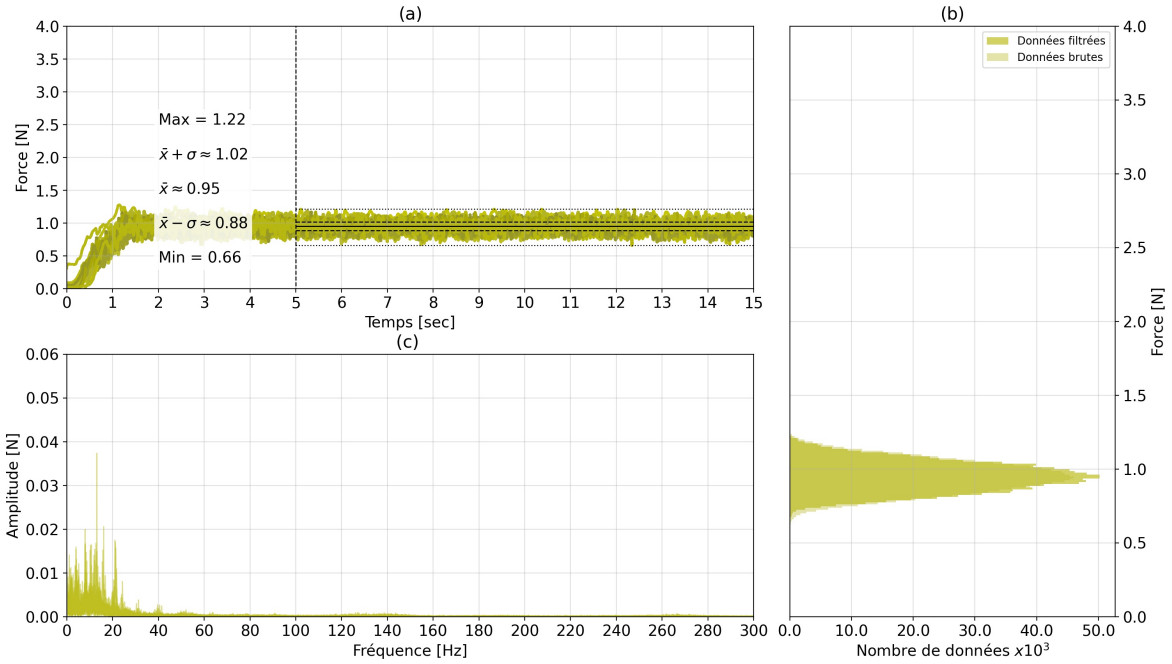


Figure M.8. Consigne de 0.02Nm pour db.ACT avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

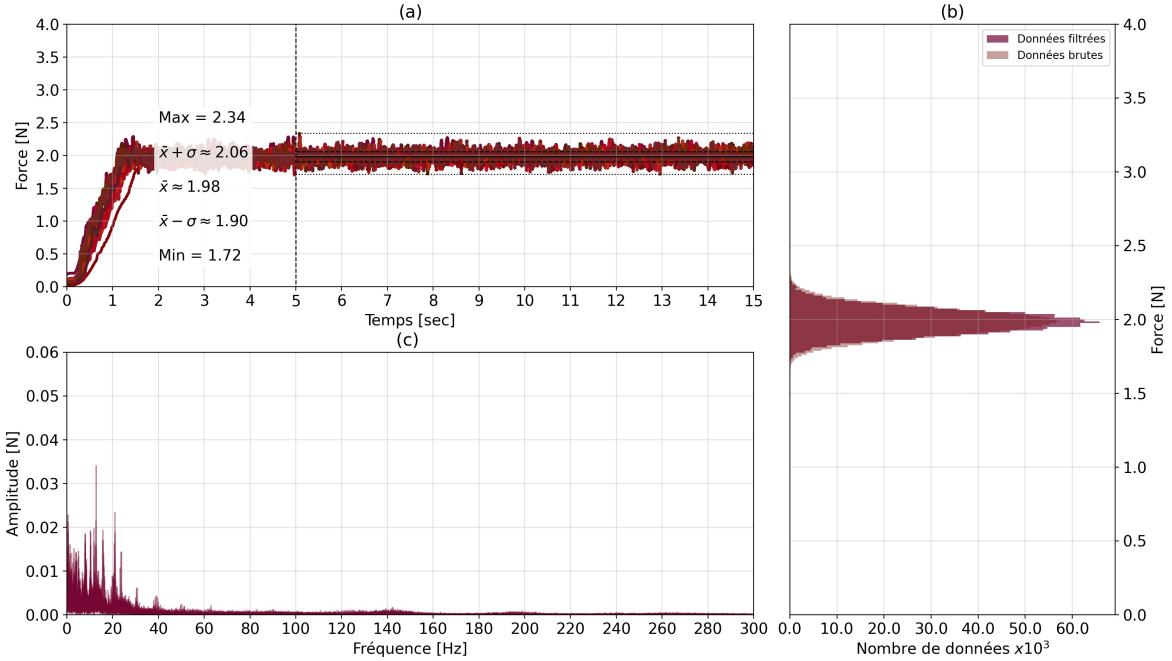


Figure M.9. Consigne de 0.04Nm pour db.ACT avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

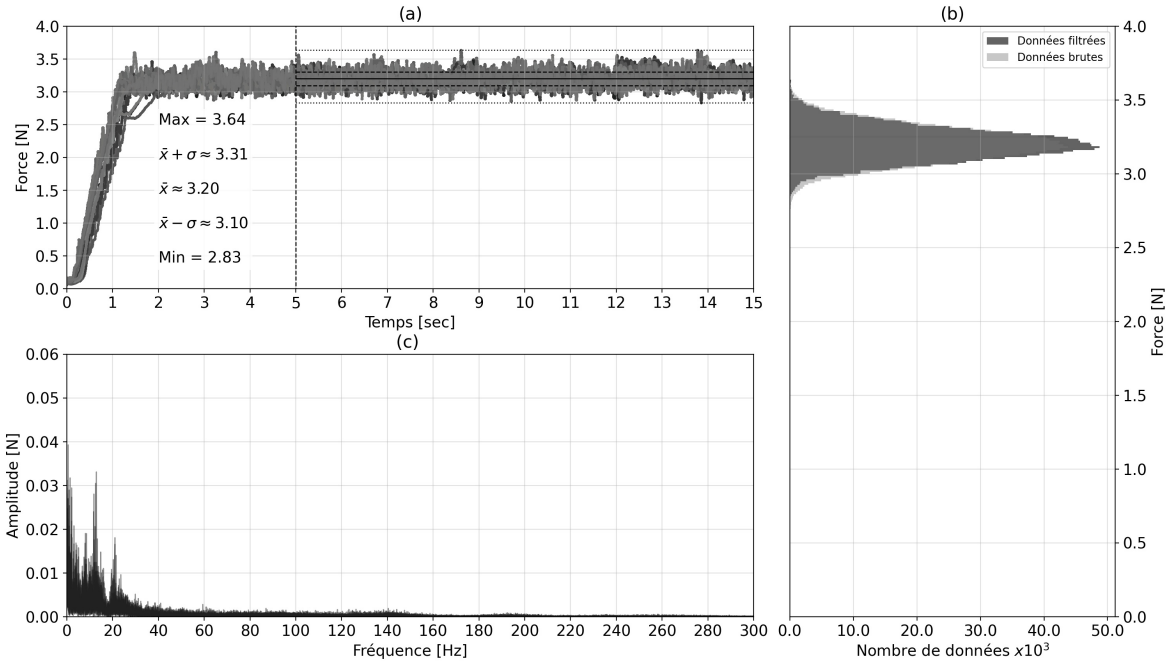


Figure M.10. Consigne de 0.07Nm pour db.ACT avec fil de nylon, tous les tests par vitesse de débobinage

Résultats du db.ACT avec fibre de verre

Les Figures M.11 à M.15 présentent les résultats de tests pour tous les échantillons par consigne de couple à chaque palier de vitesse.

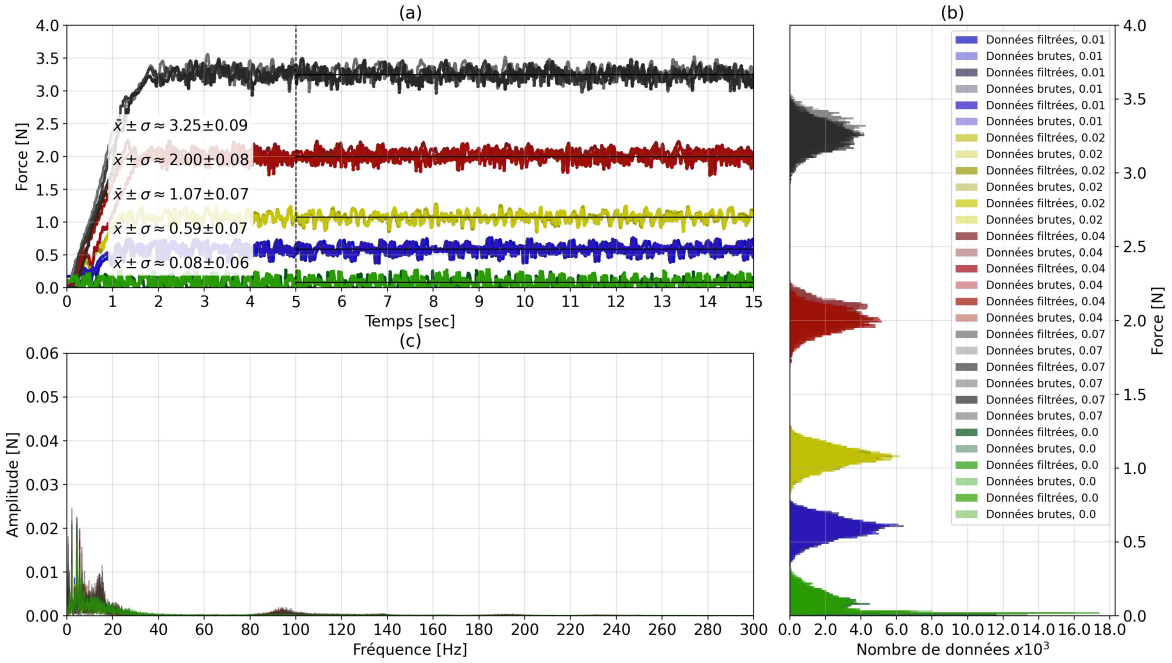


Figure M.11. Toutes les consignes du db.ACT avec fibre de verre, tous les échantillons pour un débobinage à 25mmps

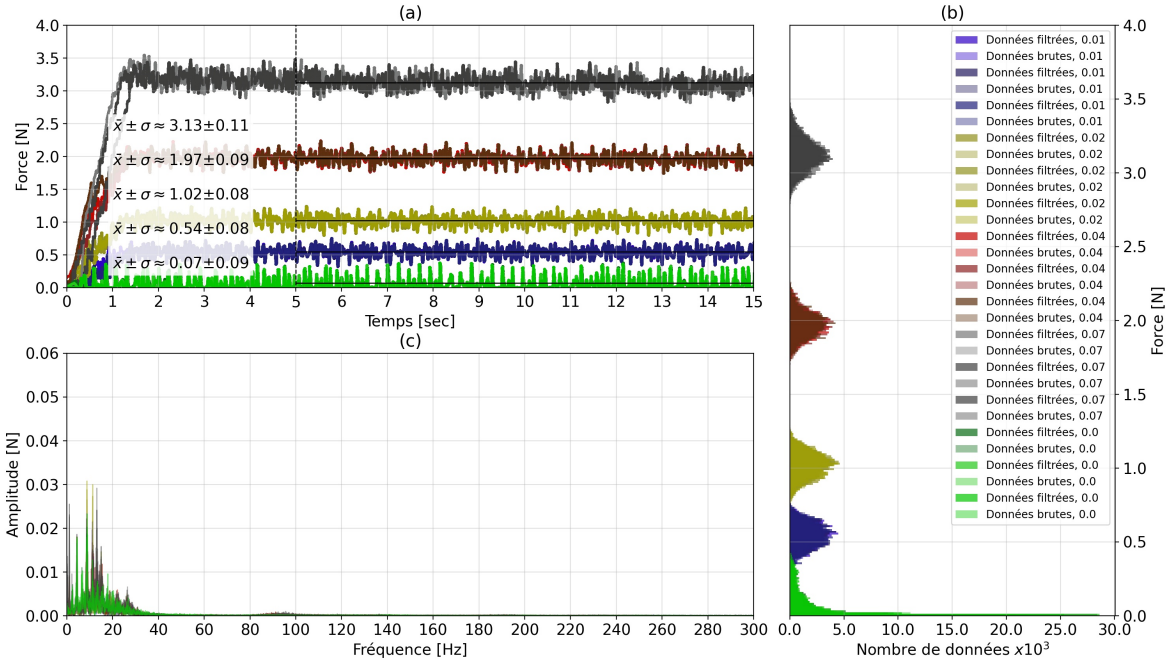


Figure M.12. Toutes les consignes du db.ACT avec fibre de verre, tous les échantillons pour un débobinage à 50mmps

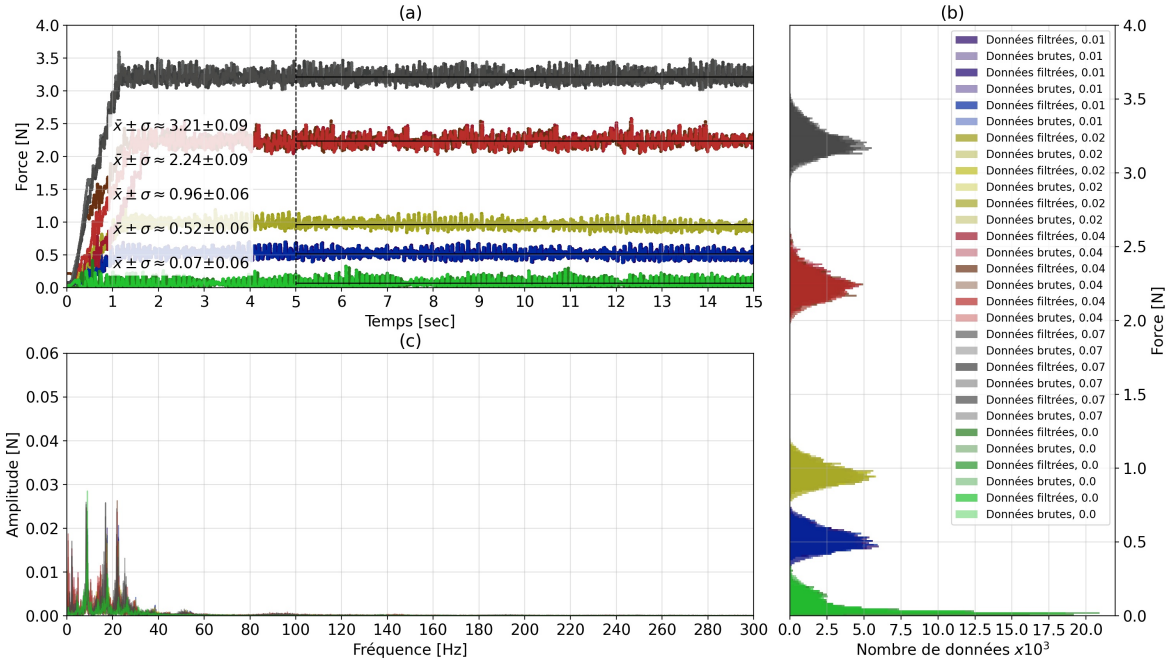


Figure M.13. Toutes les consignes du db.ACT avec fibre de verre, tous les échantillons pour un débobinage à 100mmps

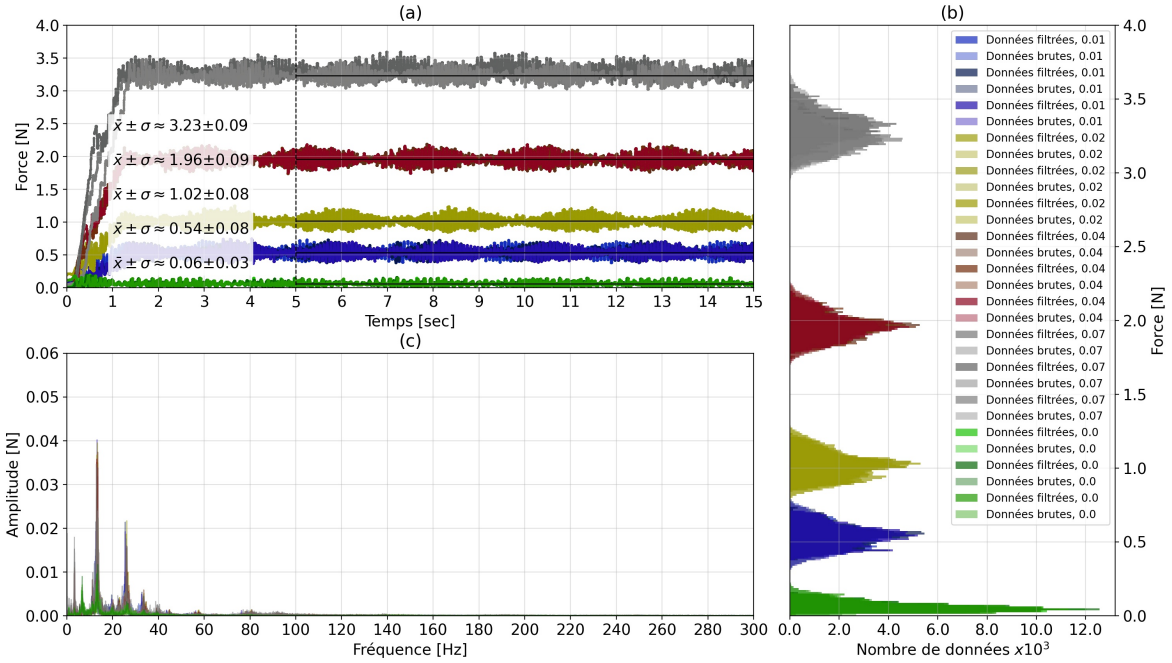


Figure M.14. Toutes les consignes du db.ACT avec fibre de verre, tous les échantillons pour un débobinage à 150mmps

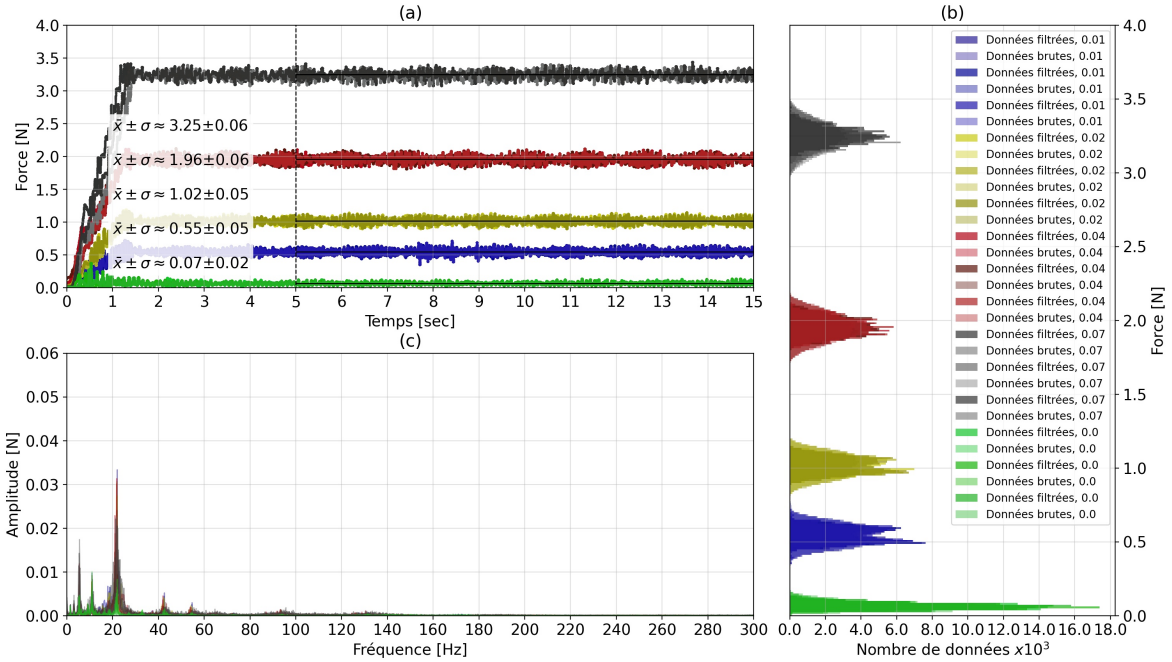


Figure M.15. Toutes les consignes du db.ACT avec fibre de verre, tous les échantillons pour un débobinage à 250mmps

Les Figures M.16 à M.20 illustrent la variation de la force pour chaque consigne de couple du débobineur actif avec fibre de verre.

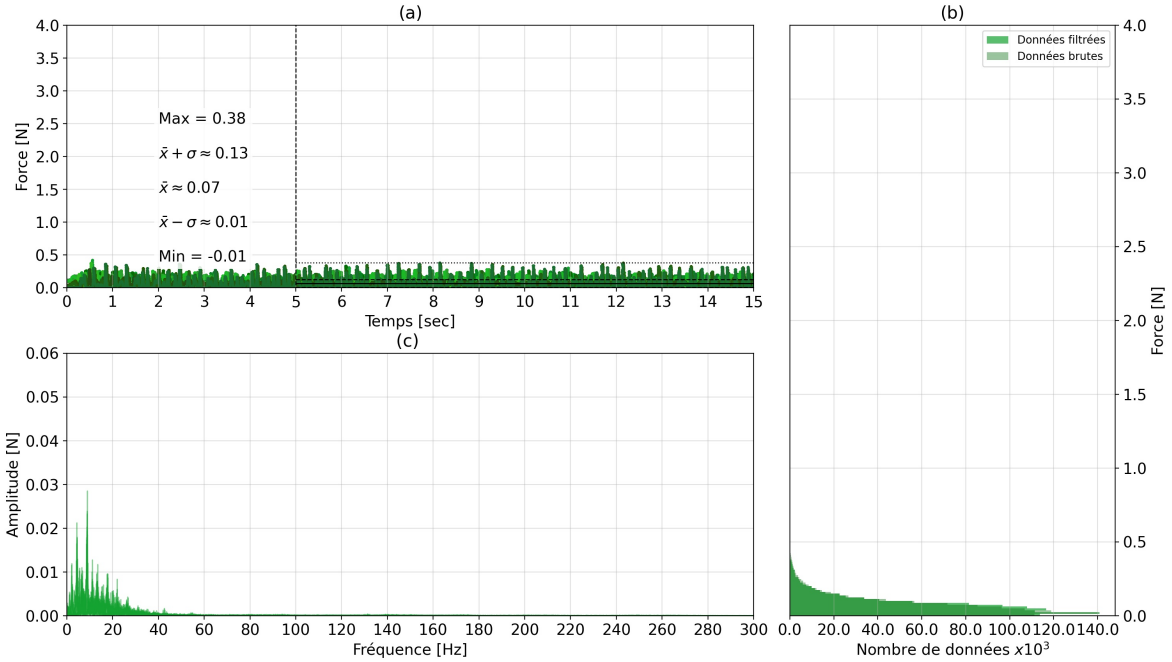


Figure M.16. Consigne de 0.0Nm pour db.ACT avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

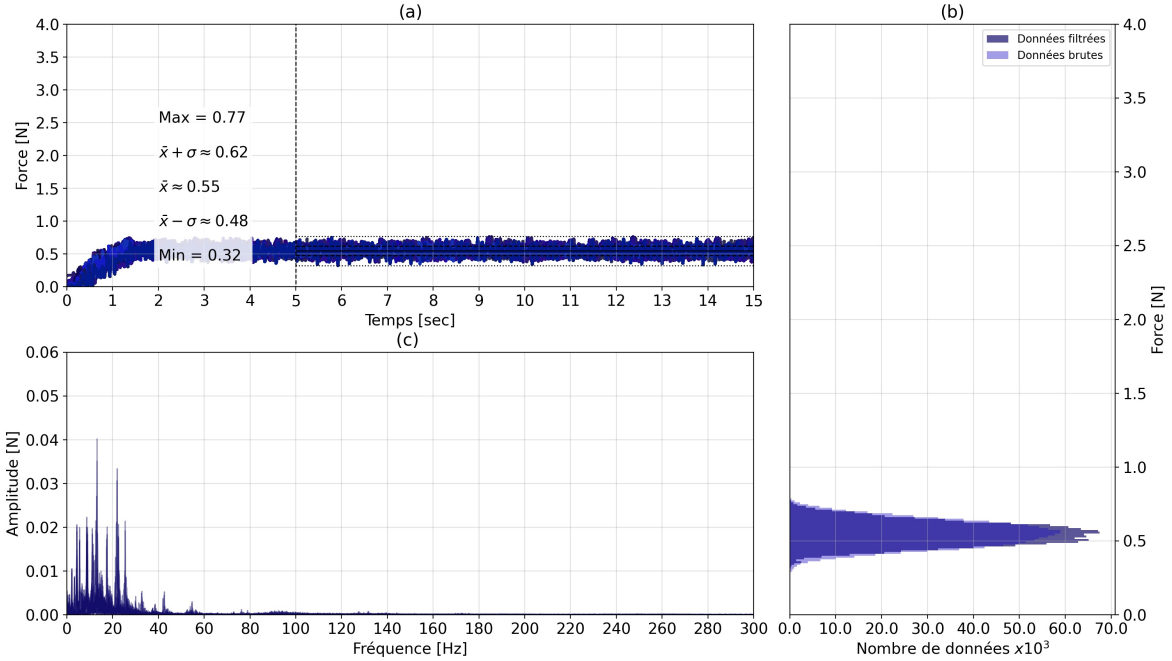


Figure M.17. Consigne de 0.01Nm pour db.ACT avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

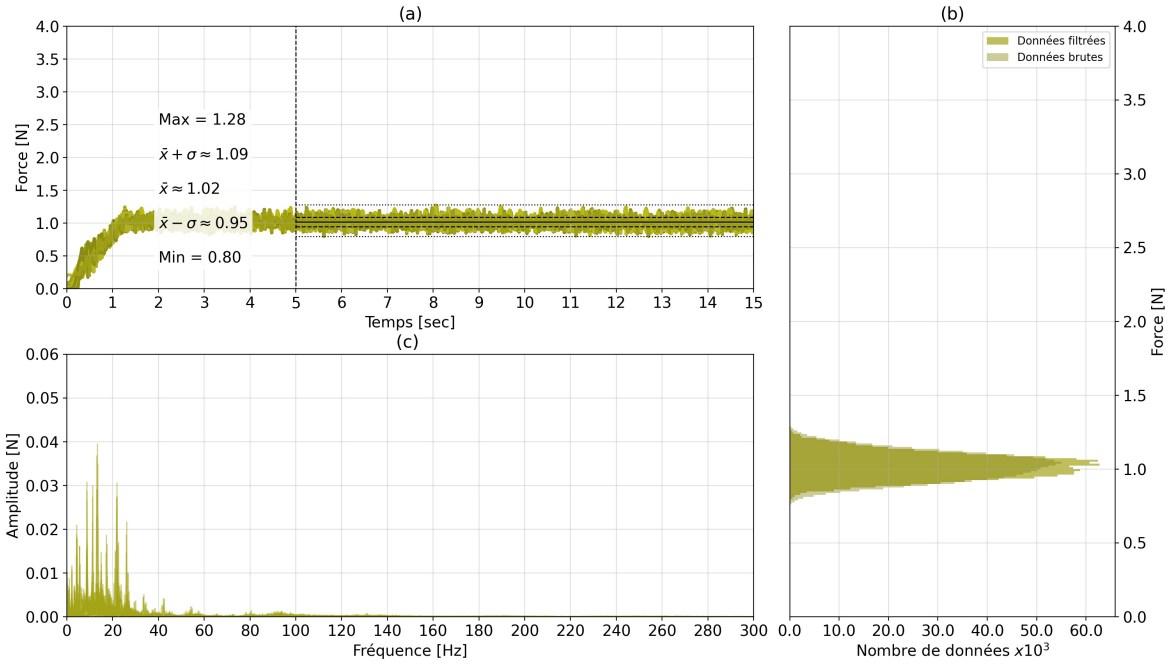


Figure M.18. Consigne de 0.02Nm pour db.ACT avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

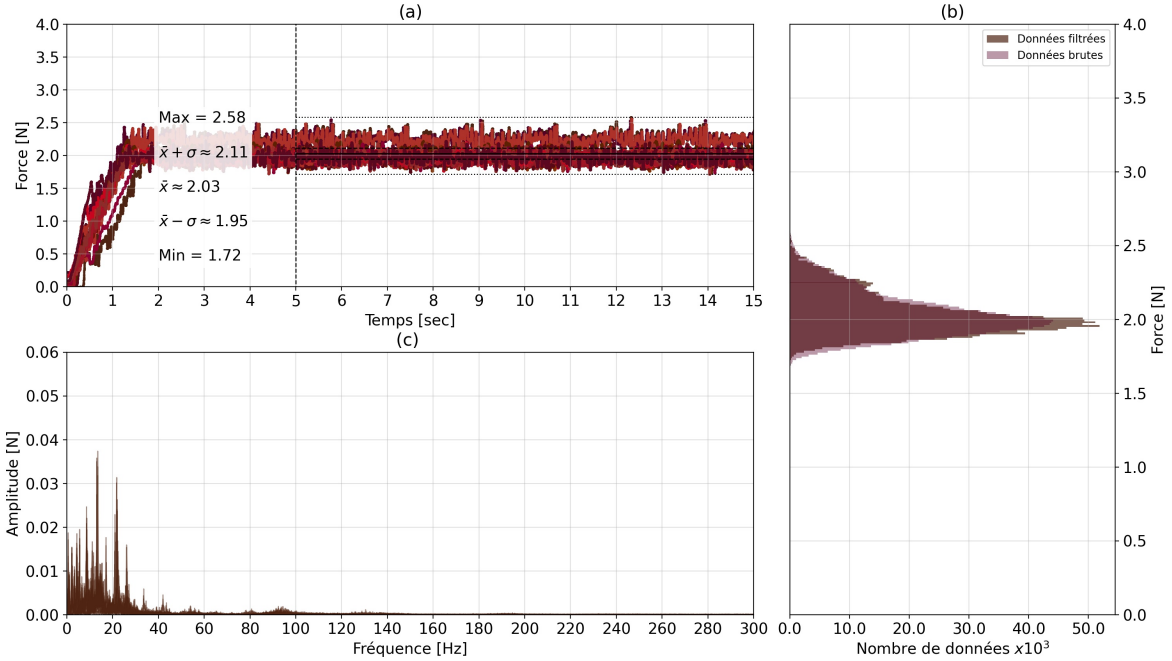


Figure M.19. Consigne de 0.04Nm pour db.ACT avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

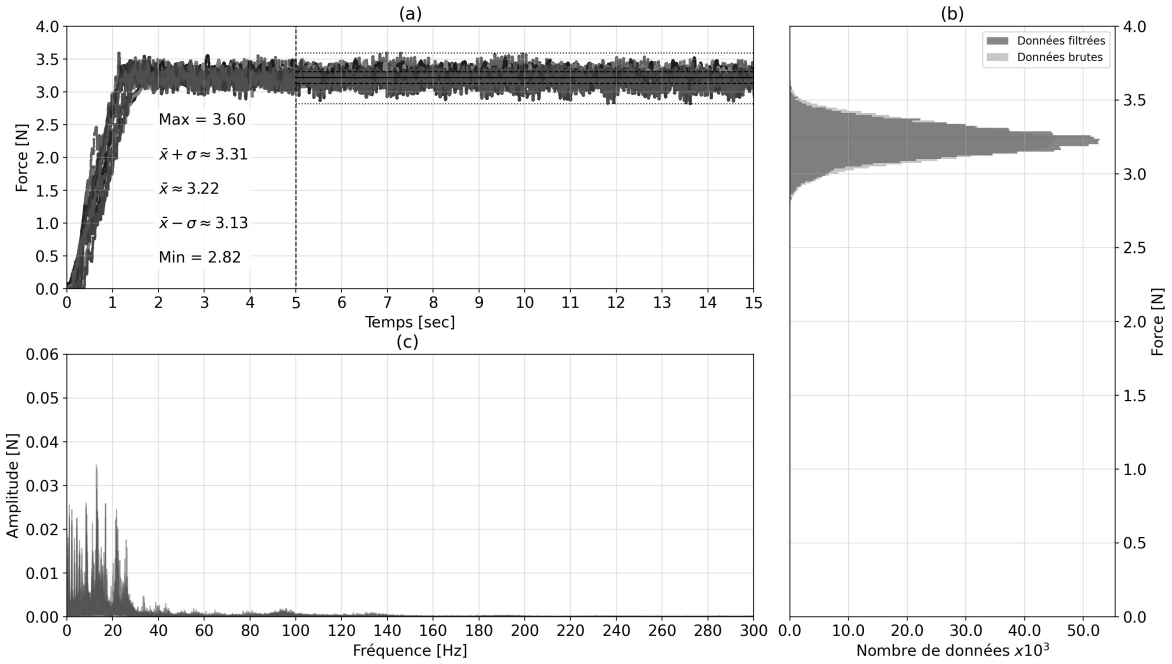


Figure M.20. Consigne de 0.07Nm pour db.ACT avec fibre de verre, tous les tests par vitesse de débobinage

Analyse des résultats

Les tableaux qui suivent présentent les données sommaires des tests de caractérisation pour le db.ACT.

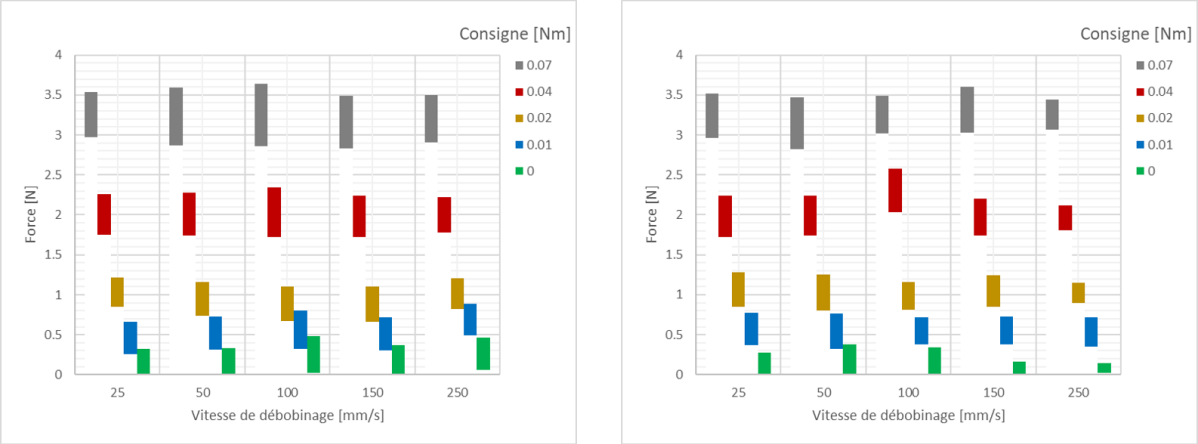
	Débobineur: db.ACT	Vitesse de débobinage				
	Matériau: Nylon	25.0 mm/s	50.0 mm/s	100.0 mm/s	150.0 mm/s	250.0 mm/s
Consigne [Nm]	Statistique					
0.07	Maximum [N]	3.54	3.59	3.64	3.49	3.50
	Moyenne [N]	3.24	3.23	3.19	3.16	3.19
	Écart-type [N]	0.11	0.11	0.12	0.10	0.08
	Minimum [N]	2.97	2.87	2.86	2.83	2.91
0.04	Maximum [N]	2.26	2.28	2.34	2.24	2.22
	Moyenne [N]	1.96	1.99	1.99	1.98	1.99
	Écart-type [N]	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07
	Minimum [N]	1.75	1.74	1.72	1.72	1.78
0.02	Maximum [N]	1.22	1.16	1.10	1.10	1.21
	Moyenne [N]	1.06	0.95	0.87	0.89	1.00
	Écart-type [N]	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06
	Minimum [N]	0.85	0.74	0.67	0.66	0.82
0.01	Maximum [N]	0.66	0.73	0.80	0.72	0.89
	Moyenne [N]	0.48	0.53	0.50	0.49	0.67
	Écart-type [N]	0.06	0.08	0.07	0.07	0.06
	Minimum [N]	0.26	0.31	0.32	0.30	0.49
0.0	Maximum [N]	0.32	0.33	0.48	0.37	0.46
	Moyenne [N]	0.12	0.11	0.13	0.13	0.18
	Écart-type [N]	0.06	0.07	0.07	0.06	0.05
	Minimum [N]	-0.14	-0.00	0.02	-0.02	0.06

Tableau M.1 Sommaire des résultats du db.ACT avec Nylon

	Débobineur: db.ACT	Vitesse de débobinage				
	Matériau: FibVerre	25.0 mm/s	50.0 mm/s	100.0 mm/s	150.0 mm/s	250.0 mm/s
Consigne [Nm]	Statistique					
0.07	Maximum [N]	3.52	3.47	3.49	3.60	3.44
	Moyenne [N]	3.26	3.12	3.22	3.26	3.24
	Écart-type [N]	0.09	0.11	0.08	0.09	0.06
	Minimum [N]	2.96	2.82	3.02	3.03	3.07
0.04	Maximum [N]	2.24	2.24	2.58	2.20	2.12
	Moyenne [N]	2.02	1.97	2.25	1.96	1.96
	Écart-type [N]	0.08	0.09	0.09	0.08	0.06
	Minimum [N]	1.72	1.74	2.03	1.74	1.81
0.02	Maximum [N]	1.28	1.25	1.16	1.24	1.15
	Moyenne [N]	1.08	1.02	0.96	1.02	1.02
	Écart-type [N]	0.07	0.08	0.06	0.08	0.05
	Minimum [N]	0.85	0.80	0.81	0.85	0.90
0.01	Maximum [N]	0.77	0.76	0.72	0.73	0.72
	Moyenne [N]	0.59	0.54	0.52	0.54	0.55
	Écart-type [N]	0.07	0.08	0.06	0.08	0.05
	Minimum [N]	0.37	0.32	0.38	0.38	0.35
0.0	Maximum [N]	0.28	0.38	0.34	0.16	0.14
	Moyenne [N]	0.08	0.07	0.06	0.06	0.07
	Écart-type [N]	0.07	0.09	0.06	0.03	0.02
	Minimum [N]	-0.00	-0.00	-0.01	0.01	0.02

Tableau M.2 Sommaire des résultats du db.ACT avec Fibre de Verre

Sur la Figure M.21 on peut apercevoir la plage de valeurs entre la force minimale et maximale pour chacun des palier de vitesse de débobinage. La Figure M.21a montre l'évolution de l'écart-type pour le db.ACT avec fil de nylon et la Figure M.21b pour la fibre de verre.



(a) db.ACT avec fil de nylon

(b) db.ACT avec fibre de verre

Figure M.21. Visualisation des valeurs comprises entre le minimum et le maximum pour le db.ACT