

Titre: Mesure des efforts dynamiques dans les agrès de cirque
Title:

Auteur: Marion Cossin
Author:

Date: 2015

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Cossin, M. (2015). Mesure des efforts dynamiques dans les agrès de cirque
Citation: [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/2003/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2003/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Annie Ross, & Frederick Gosselin
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MESURE DES EFFORTS DYNAMIQUES DANS LES AGRÈS DE CIRQUE

MARION COSSIN

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE MÉCANIQUE)

DÉCEMBRE 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MESURE DES EFFORTS DYNAMIQUES DANS LES AGRÈS DE CIRQUE

présenté par : COSSIN Marion

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. RAISON Maxime, Doctorat, président

Mme ROSS Annie, Ph. D., membre et directrice de recherche

M. GOSELIN Frédérick, Doctorat, membre et codirecteur de recherche

M. AUBERTIN Patrice, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à adresser de grands remerciements à Annie Ross et Frédérick Gosselin pour m'avoir guidée durant ma maîtrise. Le soutien sans faille, les encouragements et les excellents conseils de Annie Ross tout au long du projet m'ont permis de compléter mon projet. Je souhaite exprimer toute ma gratitude à Frédérick Gosselin, qui est rentré en plein milieu du projet. Son aide et ses questions m'ont été plus que précieuses et ont améliorés grandement mon travail et ma vision du projet. Ce fut un réel plaisir de travailler avec Annie Ross et Frédérick Gosselin.

Mes pensées vont également à Magali Marcheschi. Je ne serais pas là où je suis sans son aide, ses conseils et son amitié. Je voudrais également remercier les techniciens de l'École Polytechnique Bénédict Besner et Nour Aimene qui m'ont beaucoup aidé dans mon instrumentation.

Je remercie également le partenaire de cette recherche, l'École nationale de cirque et plus particulièrement Patrice Aubertin et Myriam Villeneuve pour leur confiance et leur aide dans mon projet. Je me sens très chanceuse de travailler en leur compagnie. Un grand merci également à tous les artistes de cirque et les professeurs de l'École nationale de cirque qui ont participé au projet. Mes pensées vont également à l'équipe technique de l'École et plus particulièrement à Antoine Grenier et son équipe de gréeurs qui m'ont introduit dans le monde du cirque.

Enfin ma vie et mon travail à l'École Polytechnique se sont passés dans la bonne humeur grâce à Elsa Piollet, Jean-Michel Attendu, Arnaud Dubourg, Cédric Pupin, Charles Bianchetti et Thierry Klotz. Un gros merci à ma stagiaire Sarah Laura Narcisse pour sa contribution à ce travail.

RÉSUMÉ

Actuellement, les charges générées par les artistes de cirque sur les agrès et les accrochages sont méconnues par la plupart des professionnels du milieu, qu'ils soient artistes, gréeurs, directeurs techniques ou concepteurs. Peu de mesures ont été diffusées au grand public ou dans la communauté scientifique. En ayant une meilleure connaissance des efforts dynamiques imposés aux appareils et aux structures d'accrochage, les professionnels auront une idée plus réaliste des besoins en sécurité.

Le projet vise à mesurer les efforts générés au point d'accrochage lors de mouvements effectués par les artistes de cirque dans cinq disciplines aériennes que sont le cerceau, la corde lisse, les sangles, le tissu et le trapèze danse. La prise de mesure s'est effectuée à l'École nationale de cirque (ÉNC) et à la Tohu avec la participation de 16 étudiants de l'ÉNC.

En plus de former une banque de données sur le sujet, le projet vise à répondre à plusieurs objectifs spécifiques. Le premier objectif est de mesurer les forces maximales et de les caractériser selon les différentes situations suivantes : les cinq disciplines, les trois niveaux scolaires, la masse des artistes, le sexe, les différents types de mouvements et des conditions d'entraînement et de spectacle. Les sangles sont la discipline ayant généré les forces maximales les plus élevées. La force maximale mesurée représente 7.9 fois le poids de l'artiste effectuant le mouvement. Jusqu'à présent, la force maximale mesurée sur un agrès de cirque accroché en un point était une force qui vaut 4.94 fois le poids de la personne (Vogel, 2014). Les pratiques sécuritaires en conception et en accrochage doivent donc être adaptées aux nouvelles mesures apportées par le projet. Il a de plus été montré que certains types de mouvements génèrent des forces plus élevées selon les disciplines. En corde lisse et en tissu, ce sont des chutes libres qui ont généré les forces les plus élevées. En trapèze danse, en sangles et en cerceau, ce sont des mouvements contenant du ballant qui ont généré les forces les plus élevées.

Le deuxième objectif du projet est de comparer la variabilité entre des débutants et des professionnels. La variabilité des efforts mesurés en fonction du temps a été analysée pour des artistes effectuant plusieurs fois le même mouvement. Il s'est avéré que la variabilité est inhérente à certains types de mouvement. Les mouvements où l'artiste a une action concrète à effectuer a une variabilité plus élevée que les mouvements où il n'a pas d'action à effectuer et où la force ne dépend que de la réaction de l'équipement. Enfin pour un mouvement en particulier

où l'artiste a une action significative à effectuer, le degré de variabilité diminue avec le niveau de compétence de l'artiste. Les facteurs influençant la force générée ont été mis en avant pour le mouvement de « dislocation » en sangles. Deux facteurs influencent grandement la force générée : la masse de l'artiste et la qualité de l'exécution du mouvement. Au contraire, la longueur des sangles, le sexe et la position de départ du mouvement ont peu d'influence.

Enfin des recommandations quant à la sécurité en accrochage ou en conception sont proposées suite aux mesures effectuées. Le point d'accrochage ainsi que tout l'équipement servant à l'accrochage doivent avoir une charge de rupture supérieure à 22kN, et ce que ce soit destiné à un usage récréatif ou professionnel.

Mots-clés : Efforts dynamiques, cirque, sécurité, variabilité.

ABSTRACT

At present the forces generated by circus artists are unknown by professionals from the circus world. Few data are available to the general public or to the scientific community. By knowing the dynamic forces experienced by equipment and hanging structure, professionals will have a real sense of the security needs.

The project aims to measure forces at the hanging point while circus artists perform acrobatic movement. Five disciplines are considered: aerial hoop, aerial silk, aerial straps, dance trapeze and rope. Measurements were done at the National Circus School of Montréal and at the Tohu with the participation of 16 students of the National Circus School.

The main purpose is to create a large data base. The project also has many specific purposes. The first one is to measure maximal forces and to characterize them by the different inputs: discipline, scholar level, artist's mass, gender, type of movement and training or show situation. Aerial straps is the discipline which generated the highest maximal forces. The maximal force represents 7.9 times the body weight of the artist. So far, the maximal force measured represented 4.94 time the body weight of the artist (Vogel, 2014). Safety practices in hanging and design have to be modified based on the new data provided by the project. It was showed that some types of movement generate higher maximal forces depending on the discipline. In rope and silk, free falls generated the higher forces. In dance trapeze, aerial hoop and straps, movements containing swinging generated the higher forces.

The second purpose of the project is to compare variability of beginners and professionals. Variability of the force signals has been analysed for artists performing many times the same movement. Variability is strongest for some types of movement in which the artist has an action to do. Variability decreases when the artist does not have an action to do and there only is the reaction of the equipment which influences the force. For a movement in which the artist has an action to do, it has been shown that variability decreases with the skills level. Influencing factors have been analysed for a specific movement in straps. An analysis reveals that the most influencing factors are the artist's mass and if the movement is well executed, and not gender or straps length or initial position.

Finally recommendations about hanging and design safety have been made as a result of the measurements. Hanging points and hanging equipment should have a breaking load up to 22kN for both recreational and professional use.

Keywords: Dynamic forces, circus, safety, variability.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVII
LISTE DES ANNEXES	XVIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Le milieu du cirque	3
2.1.1 Les principales disciplines et les principaux agrès de cirque.....	4
2.1.2 Les risques liés à la pratique du cirque	10
2.1.3 Les pratiques sécuritaires en accrochage	11
2.1.4 Facteur de sécurité en conception	15
2.1.5 Vitesses de déformation des matériaux.....	16
2.2 Recherche dans le milieu circassien.....	17
2.2.1 Efforts dynamiques	17
2.2.2 Force de choc	18
2.2.3 Travaux expérimentaux sur les forces dynamiques dans les agrès de cirque	18
2.2.4 Pratiques sécuritaires en conception	19
2.2.5 Étude analytique et expérimentale du cadre aérien.....	20

2.3	Recherche dans les milieux connexes	21
2.3.1	Le milieu de la gymnastique	21
2.3.2	Norme dans le milieu de l'escalade.....	22
2.3.3	Normes dans le milieu du travail.....	24
2.3.4	Normes dans le milieu du cirque.....	24
CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS.....		25
3.1	Croyances populaires	25
3.2	Objectifs	26
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE.....		28
4.1	Équipements de cirque utilisés.....	29
4.2	Les participants	30
4.3	Les mesures effectuées.....	31
4.3.1	Les types de mouvements acrobatiques	31
4.4	Procédure expérimentale.....	33
4.4.1	Description du banc d'essai.....	33
4.4.2	Protocole expérimental.....	35
4.4.3	Erreur de mesure	35
4.5	Problèmes rencontrés	38
4.6	Force maximale et valeur moyenne de la force maximale.....	41
4.7	Caractérisation des propriétés mécaniques du tissu	41
4.8	Méthodologie utilisée pour l'analyse de la variabilité	42
4.8.1	Corrélation croisée	42
4.8.2	Erreur quadratique moyenne et écart type de la courbe moyenne	43
4.8.3	Différence de classement des deux méthodes.....	44

4.9	Méthodologie pour l'analyse des facteurs d'influence	45
4.9.1	Paramètres d'entrée	46
4.9.2	Paramètres de sortie	48
4.10	Synthèse	49
CHAPITRE 5 RÉSULTATS BRUTS		51
5.1	Forces maximales mesurées	51
5.1.1	Forces maximales par discipline	51
5.1.2	Forces maximales par type de mouvements.....	52
5.1.3	Lien avec la revue de littérature	54
5.2	Valeur moyenne de la force maximale.....	54
5.2.1	Valeur moyenne de la force maximale en fonction de la discipline	54
5.2.2	Valeur moyenne de la force maximale en fonction du niveau scolaire	57
5.2.3	Valeur moyenne de la force maximale en tissu.....	58
5.2.4	Valeur moyenne de la force maximale en trapèze danse	59
5.2.5	Valeur moyenne de la force maximale en sangles	59
5.2.6	Force maximale en entraînement et en spectacle	61
5.3	Taux de chargement	63
5.3.1	Valeur moyenne du taux de chargement maximal	63
5.3.2	Vitesse de déformation du trapèze danse	66
5.3.3	Cas du tissu, des sangles et de la corde lisse.....	67
CHAPITRE 6 ANALYSE DES RÉSULTATS		68
6.1	Résultats de la variabilité	68
6.1.1	Variabilité selon le niveau scolaire et le type de mouvement.....	68
6.1.2	Résultats pour le mouvement de « disloc ».....	70

6.1.3	Résultats entre entraînement et spectacle.....	71
6.2	Résultats des facteurs d'influence.....	73
6.2.1	Valeurs moyennes des signaux générés par les six participants	73
6.2.2	Diagramme Pareto.....	74
CHAPITRE 7	DISCUSSION	76
7.1	Pratiques sécuritaires à l'ÉNC.....	76
7.2	Recommandations sur les pratiques sécuritaires	77
7.3	Discussion sur les résultats de la variabilité.....	79
7.4	Discussion sur les paramètres d'influence	80
CHAPITRE 8	CONCLUSION	82
RÉFÉRENCES	85
ANNEXES	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Exemples de coefficient de sécurité en accrochage en traction (HorsLesMurs, 2003).....	13
Tableau 2-2 : Exemples de coefficient de sécurité en accrochage pour les câbles et les cordes (Glerum, 2007).....	13
Tableau 2-3 : Recommandations générales sur la valeur du facteur de sécurité (McCauley & Oberg, 2012).....	15
Tableau 2-4: Coefficient dynamique maximal mesuré pour certains agrès de cirque	19
Tableau 4-1 : Répartition des participants par discipline.....	30
Tableau 4-2 : Répartition des figures acrobatiques mesurées par discipline.	31
Tableau 4-3 : Répartition des types de mouvements mesurés par discipline.....	33
Tableau 4-4 : Spécifications de la cellule de charge LCF455-2000lbs utilisées pour le calcul d'erreur.....	36
Tableau 4-5 : Résultats du test de précision du banc d'essai.	38
Tableau 5-1 : Force maximale mesurée par agrès.....	51
Tableau 5-2 : Force maximale par type de mouvement et par discipline	52
Tableau 5-3 : Force maximale en poids corporel par type de mouvement et par discipline.....	53
Tableau 5-4 : Forces maximales pour les dix mouvements de l'enchaînement complet effectués aux cinq prises de mesures.....	61
Tableau 5-5 : Écart relatif des forces maximales pour les dix mouvements et valeur moyenne de l'écart relatif entre spectacle 29/05/15 et entraînement 28/05/15, entre spectacle 04/06/15 et entraînement 04/06/15 et entre spectacle 29/05/15 et spectacle 04/06/15.	62
Tableau 5-6 : Les différents cas et leur vitesse de déformation correspondante pour l'acier (Zhang, 2012).....	66
Tableau 6-1 : Classement des étudiants selon la variabilité pour le mouvement de « disloc ».	70

Tableau 6-2 : Valeur moyenne des erreurs quadratiques moyennes des sept mouvements pour toutes les combinaisons de signaux entre deux dates de prise de mesure.	71
Tableau 7-1 : Charge à la rupture et force maximale mesurée pour les cinq équipements de cirque du projet à l'ÉNC.	77
Tableau 8-1 : Constantes de raideur et d'amortissement évaluées suite à l'essai en chargement alterné avec les fréquences de 2Hz, 1Hz et 0.5Hz pour le tissu neuf et le tissu usé.	98
Tableau 8-2 : Constante de raideur, d'amortissement, force maximale trouvée dans la modélisation et force maximale des signaux moyennées pour chaque participant.	103

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Photographies d’agrès de cirque aérien : photographies reproduites avec la permission de Roland Lorente tous droits réservés.....	6
Figure 2-2 : Photographies d’agrès de cirque d’acrobatie : photographies reproduites avec la permission de Roland Lorente tous droits réservés.....	8
Figure 2-3 : Photographies d’agrès de cirque d’équilibre : photographies reproduites avec la permission de Roland Lorente tous droits réservés.....	9
Figure 2-4 : Photographie de voltigeuses longées sur un trapèze ballant, photographies reproduites avec la permission de Roland Lorente tous droits réservés.	10
Figure 2-5 : Mécanisme de rupture de type fragile et ductile.	14
Figure 2-6 : Dépendance de la vitesse de déformation sur la résistance dynamique du matériau ou de la limite dynamique d’élasticité (Qi <i>et al.</i> , 2009).	17
Figure 2-7 : Hauteur de chute et longueur de corde pour le calcul du facteur de chute en escalade.	23
Figure 4-1 : Photographie d’une sangle de chez <i>Barry</i> https://www.barry.ca/	30
Figure 4-2 : Position de la cellule de charge, de l’émetteur, du récepteur et de la caméra lors de la prise de mesure.....	34
Figure 4-3 : Photographie du banc d’essai.	34
Figure 4-4 : Photographie du banc d’essai et des deux poids de calibration.	37
Figure 4-5 : Exemple de signal avec une répétition du signal.	39
Figure 4-6 : Exemple de signal gardé pour l’analyse avec des données manquantes.	40
Figure 4-7 : Exemple de signal avec (a) des données manquantes et (b) des données interpolées en pointillés.	40
Figure 4-8 : Exemple de deux courbes aléatoires: (a) non corrélées et (b) corrélées.....	43
Figure 4-9 : Courbe moyenne avec l’écart type représenté par une surface :	44

Figure 4-10 : Différence de classement de la méthode des erreurs quadratiques moyennes en fonction de la méthode des écarts type pour chaque mouvement	45
Figure 4-11 : Mouvement de « dislocation » en sangles commencé en position carpé : quatre photographies montrant l'évolution du mouvement.	45
Figure 4-12 : Diagramme des causes à effets d'Ishikawa sur la prise de mesure de « dislocation » en sangles	47
Figure 4-13 : Courbe générée par le mouvement de la « disloc » en sangles avec les positions de l'artiste correspondante.	48
Figure 4-14 : Mise en évidence des paramètres durée et évasement sur une courbe générée par le mouvement de la « disloc » en sangles.	48
Figure 4-15 : Schéma récapitulatif des méthodologies utilisées ainsi que des différents paramètres mesurés et étudiés.....	50
Figure 5-1 : Valeur moyenne de la force maximale en fonction de la discipline.	56
Figure 5-2 : Valeur moyenne de la force maximale en poids corporel en fonction la discipline. .	56
Figure 5-3 : Valeur moyenne de la force maximale en fonction du niveau scolaire avec la force exprimée en : (a) kN et (b) poids corporel.	57
Figure 5-4 : Valeur moyenne de la force maximale en tissu en fonction du : (a) type de mouvement et (b) niveau scolaire.	58
Figure 5-5 : Valeur moyenne de la force maximale en trapèze danse en fonction du type de mouvement.	59
Figure 5-6 : Valeur moyenne de la force maximale en sangles en fonction du type de mouvement pour différents participants : les croix pour le participant P013 et les ronds pour les cinq autres participants.....	60
Figure 5-7 : Taux de chargement maximal en N/s par discipline.	63
Figure 5-8 : Force maximale en fonction du taux de chargement maximale, le code couleur suit la discipline : rouge pour les sangles, vert pour le trapèze danse, bleu pour la corde lisse, jaune pour le tissu et violet pour le cerceau.	64

Figure 5-9 : Force maximale en fonction du taux de chargement maximale et mise en évidence de trois zones : comportement linéaire en bleu, force maximale et taux de chargement maximal très élevés en vert et taux de chargement élevée avec une force maximale peu élevée en rose.	64
Figure 6-1 : Erreurs quadratiques moyennes en fonction du type de mouvement et du niveau scolaire des étudiants.....	69
Figure 6-2 : Superposition des signaux générés dans la « disloc » pour les participants (a) P008 et (b) P013.	71
Figure 6-3 : Courbe moyenne du mouvement « disloc » réalisé par les six participants en sangles.	73
Figure 6-4 : Diagramme Pareto de l'influence des paramètres d'entrée sur : (a) force maximale du grand sommet, (b) force maximale du petit sommet, (c) force minimale entre les deux sommets, (d) force minimale après les deux sommets, (e) taux de chargement maximale, (f) évasement du grand sommet, (g) durée et (h) impulsion.	75
Figure 8-1 : Photographie de l'éprouvette dans la machine d'essai.....	92
Figure 8-2 : Valeur moyenne des contraintes mesurées à la rupture en fonction de la largeur ainsi que leur courbe de tendance associée pour le tissu neuf et le tissu usé.....	93
Figure 8-3 : Photographie du tissu au microscope avec un agrandissement de 50x : (a) le tissu neuf et (b) le tissu usé.....	95
Figure 8-4 : Force en fonction du déplacement pour 200 cycles lors d'un essai en chargement alterné à 2Hz sur le tissu usé.	97
Figure 8-5 : Superposition de la force mesurée lors de l'essai en chargement alterné et de la force théorique en fonction du déplacement.	97
Figure 8-6 : Chute libre attachée aux chevilles par une clé en huit détaillée image par image (ordre chronologique d'apparition : de gauche à droite).....	100
Figure 8-7 : Système équivalent tissu-corps de l'artiste.	101
Figure 8-8 : Superposition de la force théorique et de la force moyenne mesurée pour P006. ...	102

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ÉNC	École nationale de cirque
DEC	Diplôme d'Études Collégiales
DEE	Diplôme d'Études de l'École

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Calcul de la force de choc	91
Annexe B – Caractérisation des propriétés mécaniques du tissu	92
Annexe C – Modélisation d’une chute libre en tissu	99
Annexe D – Valeur moyenne de la force maximale en tissu	105
Annexe E – Valeur moyenne de la force maximale en trapèze danse	106
Annexe F – Valeur moyenne de la force maximale en sangles	107
Annexe G – Valeur moyenne du taux de chargement maximal.....	108

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Problématique générale

Pratiquement toutes les disciplines du cirque moderne impliquent l'utilisation d'un appareil appelé agrès de cirque. Les deux disciplines principalement concernées sont les disciplines acrobatiques, dans lesquelles on retrouve par exemple la barre russe, le mât chinois ou encore la roue Cyr, et les disciplines aériennes où sont présentes les différents types de trapèze, le cerceau, les sangles, le tissu ainsi que la corde lisse. L'artiste de cirque effectue un numéro acrobatique avec ou sur son agrès de cirque avec souvent beaucoup de mouvements dynamiques (ballant, sauts, chutes volontaires...). Actuellement, les charges générées par les artistes de cirque sont méconnues par la plupart des professionnels, qu'ils soient gréeurs, directeurs techniques, artistes, ou autre. Certaines grandes entreprises comme le Cirque du Soleil font des prises de mesure sur des numéros spécifiques de leur spectacle car ces numéros sont évalués comme étant les plus à risque. Cette pratique leur permet de valider que la structure, le chapiteau dans la plupart des cas, soutiendra les efforts générés par les artistes et aussi permet d'optimiser la conception et la fabrication de la structure et des équipements scéniques. Ces mesures prises par de grandes compagnies ne sont pas publiques. Peu de mesures ont actuellement été diffusées au grand public ou dans la communauté scientifique.

Les charges réelles imposées aux agrès de cirque ou aux structures qui les soutiennent sont en effet inconnues. C'est pourquoi au Québec, que ce soit en conception ou en accrochage, les praticiens du milieu utilisent des facteurs de sécurité en évaluant les charges de façons très approximatives. L'objectif de cette pratique est évidemment la prévention des risques. Même si les artistes de cirque s'exposent tous les jours au danger pour faire rêver le public, la sécurité est au cœur du métier des gréeurs, des directeurs techniques et des concepteurs d'équipements acrobatiques. Cependant cette pratique engendre des contraintes techniques et économiques ainsi que des contraintes physiologiques pour les artistes, les écoles, les organismes et les petites entreprises spécialisées dans la formation, la création, la production et la diffusion d'œuvres circassiennes.

En ayant une meilleure connaissance des efforts dynamiques imposés aux appareils et aux structures d'accrochage, les professionnels auront une idée plus réaliste des besoins en sécurité. Les équipements acrobatiques pourront donc à l'avenir être optimisés avec possiblement une diminution des coûts de fabrication, de transport et d'installation.

Objectif général

L'objectif global de ce projet est de mesurer les efforts dynamiques générés par les artistes et les étudiants sur certains agrès de cirque en leur point d'accrochage. Un autre objectif, plus spécifique, est de développer des guides de conception qui proposeraient des facteurs de sécurité de conception.

Cadre dans lequel s'inscrit le projet

Montréal jouit d'une renommée internationale dans le milieu circassien (Albrecht, 2002; Leroux, 2009) grâce à des troupes comme le Cirque du Soleil, le Cirque Éloize, Les 7 doigts de la main et son École nationale. Les mesures ont été prises à l'École nationale de cirque durant une année scolaire. L'École nationale de cirque (ÉNC) est un établissement d'enseignement secondaire et collégial qui forme des artistes de cirque professionnels. L'École comprend environ 150 étudiants venant de partout dans le monde. Les bâtiments de l'ÉNC sont composés de quatre grands studios d'entraînement pouvant accueillir toutes les disciplines de cirque. L'ÉNC a obtenu une subvention d'outils et d'instruments de recherche appliquée (OIRA) pour financer le matériel de prise de mesure du projet. L'ÉNC a collaboré avec l'École Polytechnique de Montréal au niveau de l'acquisition des données des charges sur les agrès de cirque.

Organisation du mémoire

Ce mémoire comporte huit chapitres. Le deuxième chapitre est une revue de littérature portant sur le milieu du cirque et des domaines connexes. Le chapitre suivant expose la problématique dans lequel le projet s'insère ainsi que les objectifs. La méthodologie est présentée dans le quatrième chapitre. Le cinquième chapitre comporte les résultats bruts: les forces et les taux de chargement maximaux. Une analyse des résultats comprenant une modélisation d'un mouvement en tissu ainsi que l'analyse de la variabilité des mouvements mesurés et des facteurs d'influence pour un mouvement en sangles est présente au sixième chapitre. Pour finir, le septième chapitre discute des résultats et donne les recommandations pour l'accrochage et la conception dans les arts du cirque.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de la littérature a pour objet de définir les différentes notions nécessaires à la compréhension du sujet et à la mise en place du projet. Elle contient trois parties. Dans un premier temps, les spécificités du milieu du cirque ainsi que les agrès de cirque sélectionnés pour le projet seront présentés afin de mieux comprendre le cadre dans lequel le projet s'inscrit. Ensuite, une deuxième partie présentera les différents travaux analytiques et expérimentaux réalisés dans le domaine du cirque ou du spectacle. Finalement, cette revue de la littérature s'ouvrira sur des domaines connexes à celui du cirque, comme celui de l'escalade et de la gymnastique.

2.1 Le milieu du cirque

Le cirque est un type de spectacle qui comporte des numéros incroyables mettant de l'avant des prouesses physiques et défiant les « limites des réalités physiques » (Harvie & Hurley, 1999). Deux genres sont présents : le cirque traditionnel ou classique, et le cirque contemporain ou moderne. Le cirque traditionnel se définit par une succession de numéros sans rapport les uns avec les autres et par un côté spectaculaire important. Le cirque contemporain développe un spectacle entier faisant appel à un scénario ou une histoire et est très souvent sans animaux. Des numéros d'acrobatie¹ et d'aérien² mettant en jeu des agrès de cirque se retrouvent dans les deux genres de cirque.

Notons que chaque artiste, chaque école de cirque, chaque cirque ou chaque organisme du milieu a depuis sa création essayé de se démarquer les uns des autres. C'est pourquoi les techniques d'apprentissage ou de performance sont assez différentes entre les pays, les troupes, les artistes, les écoles ainsi que les professeurs. Cependant durant les dix dernières années, la

¹ Dans le vocabulaire du cirque, la discipline nommée « acrobatie » consiste en des numéros réalisés au sol comme la barre russe, le mât chinois, le main à main ou la roue allemande.

² Dans le vocabulaire du cirque, la discipline nommée « aérienne » consiste en des numéros avec des équipements qui s'accrochent en hauteur comme les trapèzes, le cerceau, les sangles ou le tissu.

FEDEC³ (Fédération Européenne des Écoles de Cirque Professionnelles) a constitué des manuels de pédagogie : *Manuel d'Instruction de Base pour les Arts du Cirque* (FEDEC, 2007) et *Manuels pédagogiques* (Demey & Wellington, 2010). Ces manuels font suite à des rencontres entre professeurs et professionnels de différentes écoles et nationalités, visant à transmettre les bonnes pratiques pédagogiques et ainsi à uniformiser le vocabulaire du milieu.

2.1.1 Les principales disciplines et les principaux agrès de cirque

Les disciplines de cirque sont nombreuses. L'aérien, l'acrobatie, l'équilibrisme, la clownerie et la jonglerie sont parmi les plus connus. La plupart des disciplines utilisent un équipement appelé agrès. Les appareils utilisés par les artistes sont aussi indénombrables. En effet, chaque artiste essaie de se démarquer et cela passe aussi par le type d'agrès utilisé. Certains équipements sont quand même communs et très utilisés depuis leur création. La liste des disciplines et des agrès suivants n'est pas exhaustive mais elle dresse un tableau global.

2.1.1.1 Les disciplines aériennes

Le cerceau

Le cerceau aérien est constitué d'un cercle de métal de diamètre variable accroché par un ou deux points. Il peut être fixe ou ballant, utilisé en hauteur ou à proximité du sol (Fig. 2-1 (a)).

La corde lisse

La corde lisse est une corde de coton tressée accrochée au plafond par un point pour la maintenir verticale (Fig. 2-1 (b)).

Les sangles

Les sangles sont composées de deux lanières parallèles de plusieurs mètres de haut. L'artiste s'y enroule les poignets et les bras afin d'accomplir différentes acrobaties (Fig. 2-1 (c)).

³ La FEDEC est un réseau d'instituts d'éducation supérieure et professionnelle et d'organisations de cirque répartie en Europe et dans le monde entier.

Le tissu

Cet agrès est constitué d'un grand tissu plié en deux afin de constituer deux pans suspendus verticalement en un point d'accroche, où s'enroule et se contorsionne l'artiste pour exécuter différentes figures acrobatiques (Fig. 2-1 (d)).

Selon le type de trapèze, les performances seront très différentes selon ce que l'agrès permet de faire.

Le trapèze ballant

Cet agrès est composé d'un trapèze simple accroché à grande hauteur sur lequel se balance l'acrobate pour accomplir différentes figures (Fig. 2-1 (g)). Il permet à l'artiste de balancer d'avant en arrière. Des poids seront souvent ajoutés à chaque extrémité de la barre afin de stabiliser le ballant et de balancer plus haut rapidement.

Le trapèze fixe duo

Cet équipement est constitué d'un trapèze simple accroché à des hauteurs variées où prennent place deux acrobates (d'où le nom duo) pour exécuter des figures et acrobaties sans toutefois utiliser le mouvement de ballant du trapèze (d'où le nom fixe). Le porteur s'installe sur le trapèze en position à la pliure de jarrets pour permettre au voltigeur d'accomplir différentes acrobaties aériennes (Fig. 2-1 (e)). La barre est en général plus large que pour les autres types de trapèze afin que les deux artistes puissent s'asseoir dessus.

Le trapèze danse

La différence avec les autres trapèzes est que la barre du trapèze est accrochée en un seul point. Le trapèze danse peut être fixe ou en ballant, utilisé en hauteur ou à proximité du sol (Fig. 2-1 (f)). Cette discipline permet beaucoup de possibilités : ballant, grande rotation, tour sur l'axe, fixe, au sol, en hauteur...

La corde volante

La corde volante est constituée d'une corde fixée à ses deux extrémités. Elle forme ainsi un V sur laquelle l'artiste se balance et effectue des acrobaties.



(a)



(b)



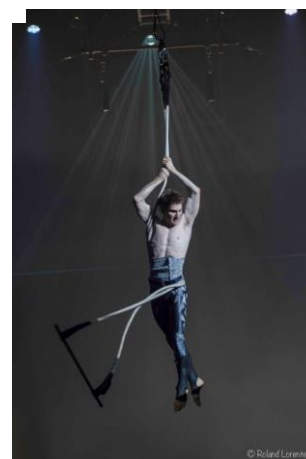
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Figure 2-1 : Photographies d'agrès de cirque aérien : photographies reproduites avec la permission de Roland Lorente tous droits réservés

- (a) Cerceau; (b) Corde lisse; (c) Sangles; (d) Tissu; (e) Trapèze duo fixe;
 (f) Trapèze danse; (g) Trapèze ballant.

Le cadre aérien

Le cadre aérien est un cadre rectangulaire fixé et haubané en hauteur. Le porteur y prend position à la pliure de jarrets et permet au voltigeur d'accomplir des mouvements acrobatiques.

2.1.1.2 Les disciplines d'acrobatie

Le mât chinois

Le mât chinois est composé d'un poteau en métal fixé verticalement au sol, généralement d'une hauteur de 6 m. L'acrobate y grimpe pour y accomplir différentes figures ou des sauts acrobatiques (Fig. 2-2 (a)).

Le main à main

Le main à main contrairement aux autres disciplines de cirque ne nécessite que deux ou plusieurs personnes et le sol. Le porteur exerce avec le voltigeur des figures de force, d'équilibre, d'élévation et de souplesse par des portées le plus souvent sur les mains (Fig. 2-2 (b)).

La planche coréenne

La planche coréenne est constituée d'une planche à bascule où se propulsent à tour de rôle deux acrobates tout en effectuant des sauts acrobatiques.

La roue simple ou roue Cyr

La roue Cyr a été inventée par le Québécois Daniel Cyr. L'acrobate effectue des acrobaties à l'intérieur d'un cercle métallique simple qui tourne par sa propre impulsion (Fig. 2-2 (c)).

La barre russe

Deux porteurs tiennent une barre flexible le plus souvent sur leur épaule tandis qu'un voltigeur effectue différentes figures et sauts sur cette barre.

Trampoline (ou filet)

Cette discipline est issue de la gymnastique. Elle est composée d'une toile élastique de grandeur variable tendue par des ressorts. Les acrobates effectuent des figures et des sauts acrobatiques.

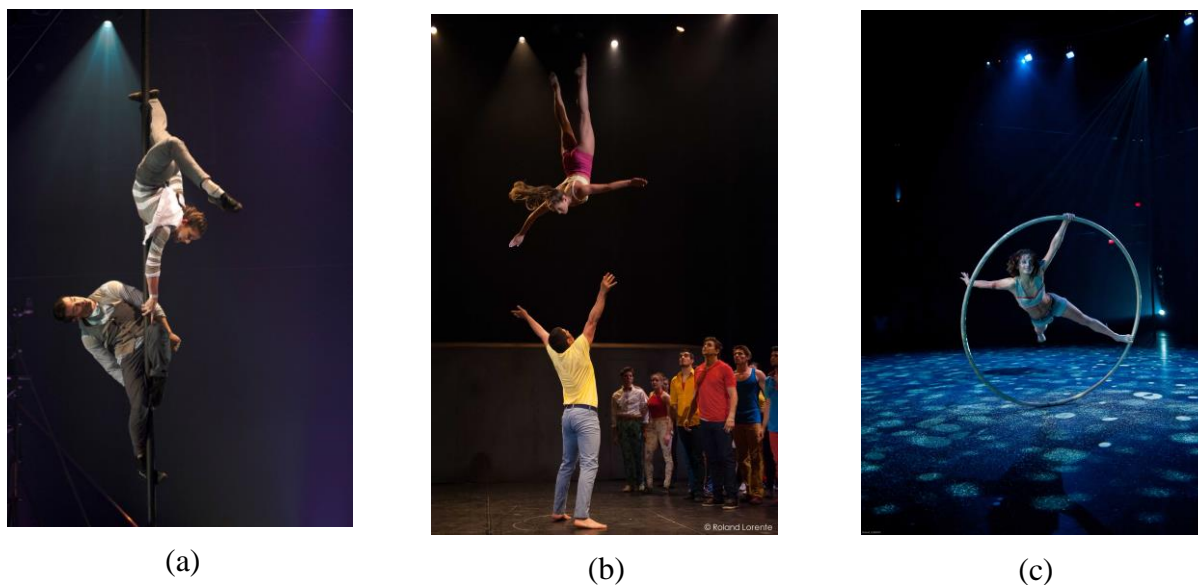


Figure 2-2 : Photographies d'agrès de cirque d'acrobatie : photographies reproduites avec la permission de Roland Lorente tous droits réservés

(a) Mât chinois; (b) Main à main; (c) Roue Cyr.

2.1.1.3 Les disciplines d'équilibrisme

Le fil de fer (ou fil tendu)

L'acrobate évolue sur un câble métallique tendu horizontalement entre deux montants (Fig. 2-3 (a)).

Équilibre

Cette discipline est constituée de cannes d'équilibre, soit une tige de métal de hauteur variable ornée d'un bloc à son sommet. L'équilibriste pose ses mains sur les blocs afin d'effectuer des figures d'équilibre (Fig. 2-3 (b)).



(a)



(b)

Figure 2-3 : Photographies d'agrès de cirque d'équilibre : photographies reproduites avec la permission de Roland Lorente tous droits réservés

(a) Fil de fer; (b) Équilibre.

2.1.1.4 Autre équipement

Longes

C'est un équipement de protection individuelle constituée d'un lien (corde, sangle ou câble) accroché à une ceinture de sécurité de différents modèles (Fig. 2-4).



Figure 2-4 : Photographie de voltigeuses longées sur un trapèze ballant, photographies reproduites avec la permission de Roland Lorente tous droits réservés.

2.1.2 Les risques liés à la pratique du cirque

Dans les arts du cirque, l'émotion transmise au public est souvent liée à une représentation du danger. La sécurité des artistes a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Deux études de l'INRS font le point sur les risques et la prévention dans les arts du spectacle en France (Ganem *et al.*, 2009; Chapouthier *et al.*, 2009). Les données récoltées sur l'année 2006 sur l'ensemble des métiers des arts du spectacle (artistes et techniciens) montrent que les chutes de hauteur représentent 13% des accidents du secteur. Les risques plus spécifiques aux artistes sont également cités : mauvaise réception d'un partenaire, contraintes posturales et chutes lors de l'exécution de figures. Au Québec, l'IRSST (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail) a publié un portrait des risques du métier des artistes (Ledoux *et al.*, 2008). L'analyse des blessures répertoriées par le Comité de la santé et de la sécurité du travail des danseurs, musiciens, comédiens et artistes de cirque montre que la deuxième cause de blessure est la chute tandis que la troisième est due au contact avec des objets ou de l'équipement. Enfin notons que les artistes de cirque ont exprimé dans cette étude une anxiété face à la fiabilité du gréage.

Le cas des artistes de cirque a été étudié spécifiquement dans un article dans lequel Goudard, artiste de cirque et médecin au CNAC (Centre national du cirque à Châlons-en-Champagne en France), donne son analyse. Il précise que les accidents qui mettent la vie des artistes en danger sont principalement les chutes dans les disciplines aériennes. Ces accidents dans le milieu proviennent des efforts poussés aux limites des capacités physiques (Voisembert, 2004). L'étude des types et des taux de blessures entre 2002 et 2007 au sein du Cirque du Soleil a fait l'objet d'un article (Shrier, 2009). Les artistes acrobates ont un taux de blessures de 11.2 par 1000 performances. Ce taux est moins élevé que celui des gymnastes féminins (15.2 par 1000 selon une étude sur 25 ans par le National Collegiate Athletic Association) mais est plus élevé que celui des joueurs de basketball masculin (9.9 par 1000.) La plupart des blessures sont heureusement mineures.

2.1.3 Les pratiques sécuritaires en accrochage

Dans le milieu du spectacle, le gréeur est la personne responsable de l'accrochage et de l'inspection de tous les équipements acrobatiques et scéniques et est donc sous la supervision d'un directeur technique. La sécurité et la prévention des risques est la première préoccupation des gréeurs, des directeurs techniques, des concepteurs d'équipements scéniques et autres métiers liés à la santé et à la sécurité dans les arts du spectacle comme en témoigne le *Mémento de la sécurité dans le spectacle vivant* (Min. Culture – Cramif – Conseil Supérieur de la Scénographie, 1999).

En gréage, les professionnels utilisent un facteur de sécurité pour l'accrochage des équipements. Même si le nom est le même en génie et en gréage, facteur de sécurité, il ne désigne pas du tout la même notion. Une confusion existe chez les ingénieurs et les professionnels du milieu circassien du fait que chacun utilise la même nomination : «*design factor*» ou «*safety factor*». Il est important de différencier le facteur de sécurité utilisé pour l'accrochage de l'équipement scénique au facteur de sécurité utilisé en conception. Hendrickson et Buckhurst sont de rares auteurs à faire cette distinction : ils expliquent que le facteur de conception («*design factor*») réfère au dimensionnement durant la phase de conception tandis que le facteur de sécurité («*factor of safety*») est le ratio de la charge à la rupture de l'équipement sur la charge réelle appliquée (Hendrickson & Buckhurst, 2008). Pour la suite les nominations suivantes seront utilisées afin de

d'éviter cette confusion : facteur de sécurité en accrochage et facteur de sécurité en conception. La notion de facteur de sécurité en conception est développée au 2.1.4.

En gréage, tous s'entendent sur la même formule pour évaluer le facteur de sécurité en accrochage :

$$\text{Facteur de sécurité en accrochage} = \frac{\text{Charge à la rupture de l'équipement}}{\text{Charge statique accrochée}} \quad [1]$$

En réalité, la charge statique accrochée ne correspond pas à la charge réelle subie par l'équipement de cirque (expliqué au 2.2.1), ce qui explique qu'en vocabulaire d'ingénieur, ce facteur n'est pas un facteur de sécurité (développé au 2.1.4.)

La charge à la rupture de l'équipement a plusieurs dénominations : « minimum breaking load (MBL)» (Higgs, 2008), « ultimate breaking strength (UBS)» (Glerum, 2007) ou encore «breaking strength» (Donovan, 2008; Hendrickson & Buckhurst, 2008).

De même, la charge statique accrochée peut être appelée « safe working load (SWL)», « allowable load (AL)», « working load limit (WLL)», « allowable working load (AWL)», «recommended working load (RWL) » (Higgs, 2008; Glerum, 2007) ou encore « allowable limit load (ALL)» (Hendrickson & Buckhurst, 2008).

Le facteur de sécurité en accrochage peut aussi être nommé coefficient d'utilisation. Ce facteur permet de diminuer le risque de rupture du matériel : il sert en effet à compenser le fait que les techniciens ne connaissent pas la charge dynamique appliquée. Selon les sources, il peut également être appelé « *design factor* », « *coefficient of utilisation*» ou « *working coefficient* » (Higgs, 2008; Glerum, 2007; Donovan, 2008). Il est conseillé de prendre une valeur de 10 pour le facteur de sécurité en accrochage dès qu'il s'agit de vol humain (Donovan, 2008; Hendrickson & Buckhurst, 2008). Lorsqu'il ne s'agit pas de vol humain c'est-à-dire qu'il s'agit d'équipement scénique comme des mousquetons, des maillons, des câbles, des cordes ou tout autre élément de décor accroché, ce facteur peut être diminué selon le type de matériau utilisé (Tableau 2-1). Ces coefficients ont été définis suite à un arrêté du code du travail français datant de 1992 (Arrêté du 18 décembre 1992 relatif aux coefficients d'épreuve et aux coefficients d'utilisation applicables aux machines, accessoires de levage et autres équipements de travail). Aucune indication quant aux choix des valeurs utilisées n'est donnée, ni dans l'arrêté ni dans les références utilisées par

les professionnels du milieu. Glerum donne aussi des exemples de facteurs de sécurité communément utilisés dans les arts de la scène pour les cordes et les câbles (Tableau 2-2).

Tableau 2-1 : Exemples de coefficient de sécurité en accrochage en traction (HorsLesMurs, 2003).

Matériau	Coefficient d'utilisation
Acier	4
Aluminium et câbles d'acier	5
Textiles et matériaux composites	7

Tableau 2-2 : Exemples de coefficient de sécurité en accrochage pour les câbles et les cordes (Glerum, 2007).

Matériau	Facteur de sécurité
Câbles d'acier statiques	5
Câbles d'acier en mouvement (treuils par exemple)	8
Câbles et cordes en fibre	10

Le facteur de sécurité d'accrochage est utilisé par les gréeurs pour accrocher des éléments scéniques ou des personnes. Les techniciens de scène l'utilisent pour s'assurer que l'équipement soutenant le décor ou l'artiste peut supporter cette charge. Par exemple, un artiste de corde lisse avec son équipement pèse au maximum 90kg. Les techniciens s'assurent donc que le point d'accrochage et tous les éléments sur lesquels la corde va être attachée (poulie, câble, mousqueton...etc.) doivent avoir une charge à la rupture donnée par le fournisseur supérieure à 9kN. Le facteur de sécurité en accrochage utilisé ici est de 10. Le facteur de sécurité utilisé en ingénierie pour dimensionner des pièces est différent de ce facteur. Celui-ci est défini comme étant le ratio entre la contrainte maximale qu'une structure peut supporter sur la contrainte maximale estimée dans l'utilisation pour laquelle elle a été conçue. Les fournisseurs d'équipements scéniques tels que les mousquetons, les câbles, les émerillons ou autres ainsi que les fournisseurs d'agrès acrobatiques communs comme la corde, les sangles ou le tissu donnent la

valeur de la charge à la rupture et souvent une charge maximale utilisateur. Cette dernière représente une charge statique maximale à laquelle il est possible d'accrocher l'équipement cependant les fournisseurs n'utilisent tous pas le même facteur de sécurité en accrochage. Et souvent les utilisations ne sont pas pensées pour des mouvements dynamiques car l'équipement n'est pas spécialisé pour le milieu circassien mais pour d'autres milieux : industrie, maritime ou escalade. De plus, certains équipements sont fabriqués artisanalement comme par exemple certains trapèzes ou les barres soutenant les agrès sans avoir dans tous les cas consulté un expert capable de dimensionner la structure. Étant donné l'inhomogénéité des valeurs, les professionnels du milieu circassien trouvent la valeur maximale de la charge d'utilisation en prenant un facteur de sécurité de 10 et en utilisant la charge à la rupture de l'équipement. Cette pratique est un moyen de diminuer le risque de rupture et donc d'accident.

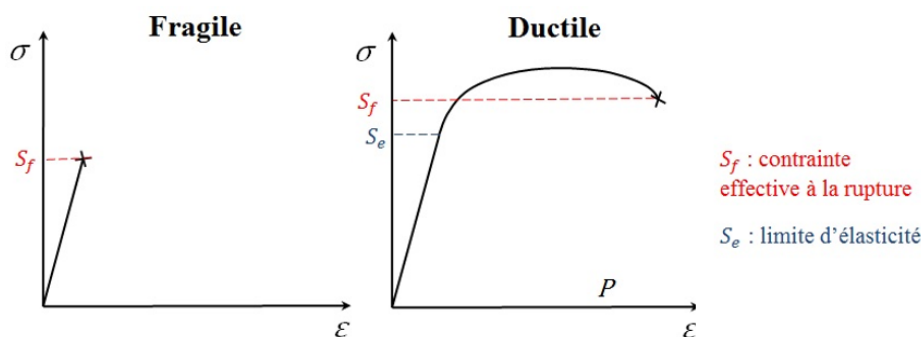


Figure 2-5 : Mécanisme de rupture de type fragile et ductile.

Les gréeurs utilisent comme référence la charge à la rupture donnée par le fournisseur lorsqu'elle est présente. Cependant, selon le mode de chargement et le mode de rupture, un matériau n'aura pas le même comportement en rupture. Le chargement peut être monotone, cyclique ou constant. Le mode de rupture fragile est bien différent du mode de rupture ductile (Figure 2-5). Lors d'une rupture ductile, le matériau admet une forte déformation plastique. La rupture se fait lorsqu'un défaut, dû à la déformation plastique, se propage. Lors d'une rupture fragile, le matériau admet une très faible déformation plastique, il n'y a en fait pas de signes précurseurs. Même avec un facteur de sécurité en accrochage élevé, des charges dynamiques répétées pourrait créer un cas de rupture fragile.

2.1.4 Facteur de sécurité en conception

Le facteur de sécurité en conception est un paramètre permettant de dimensionner une pièce. Il est défini de la façon suivante :

$$s_W = \frac{S_m}{f_s} \quad [2]$$

où f_s est le facteur de sécurité, S_m est la résistance du matériau et s_W est la contrainte réelle attendue sur la pièce. S_m est en général basé sur la limite élastique pour des matériaux ductiles et la résistance ultime pour des matériaux fragiles. Les recommandations générales sur la valeur du facteur de sécurité sont données par le Tableau 2-3 : Recommandations générales sur la valeur du facteur de sécurité (McCauley & Oberg, 2012). Tableau 2-3 (McCauley & Oberg, 2012).

Tableau 2-3 : Recommandations générales sur la valeur du facteur de sécurité (McCauley & Oberg, 2012).

f_s	Application
1.3-1.5	Utilisation avec un matériau très fiable où le chargement et les conditions environnementales ne sont pas importants et où le poids est important.
1.5-2	Utilisation avec un matériau fiable où le chargement et les conditions environnementales ne sont pas importants.
2-2.5	Utilisation avec un matériau ordinaire où le chargement et les conditions environnementales ne sont pas importants.
2.5-3	Utilisation avec un matériau non testé ou fragile et où le chargement et les conditions environnementales ne sont pas importants.
3-4	Utilisation avec un matériau dont les propriétés ne sont pas fiables et où le chargement et les conditions environnementales ne sont pas importants, ou utilisation avec un matériau fiable où le chargement et les conditions environnementales sont difficiles à prévoir.

En aéronautique Drouin, les facteurs de sécurité sont faibles, de 1.25 à 1.5 (Drouin *et al.*, 1988). Rothbart et Brown constatent que le facteur de sécurité prend les valeurs de 3 pour des applications de conception de machines communes et de 10 pour les appareils à pression (Rothbart & Brown, 2006). Par exemple, s'il faut concevoir un élévateur qui sera aménagé dans un puit de mine, le facteur de sécurité en conception recommandé est de l'ordre de 10. Le facteur choisie ici est élevé pour deux raisons : l'incertitude de la charge et de la résistance ainsi que le fait que des vies humaines sont à risque (Drouin *et al.*, 1988).

Le facteur de sécurité à employer est souvent déterminé par des codes tels que ICCA (Institut de la construction en acier, le Code national du bâtiment (Canada), ASA (American Standards Association), ACNOR (Association canadienne de normalisation) ...

2.1.5 Vitesses de déformation des matériaux

Les valeurs données dans la littérature des vitesses de déformation des matériaux définissent trois cas : chargement quasi-statique, chargement à haute vitesse ou chargement du type barres d'Hopkinson (Split Hopkinson Pressure Bars.) Le comportement du matériau dépend de la vitesse de déformation et de la température. Dans un cas de chargement quasi-statique, la force requise pour déformer le matériau augmente à cause du durcissement qui a un effet stabilisateur. Dans le cas d'un chargement dynamique, d'autres facteurs dans la contrainte d'écoulement et la ductilité du matériau sont à prendre en considération. En augmentant la vitesse de déformation, la déformation locale à la rupture en tension diminue, ce qui entraîne une sensibilité à une entaille plus forte en chargement d'impact qu'en chargement quasi-statique. La Figure 2-6 présente la dépendance entre la vitesse de déformation et la résistance dynamique ou la limite dynamique d'élasticité (Qi *et al.*, 2009). Dans la plage où la vitesse de déformation est la plus basse (Regime I), la résistance dynamique du matériau ou la limite dynamique d'élasticité augmente doucement avec l'augmentation de la vitesse de déformation. La plupart des machines à chargement hydraulique sont dans cette zone. Dans le Regime II, la résistance dynamique du matériau ou la limite dynamique d'élasticité augmente rapidement. C'est le cas du chargement du type barre d'Hopkinson (SHPB.) Le régime III est une zone de saturation. C'est le cas de la plupart des tests d'impact ou des canons à gaz léger.

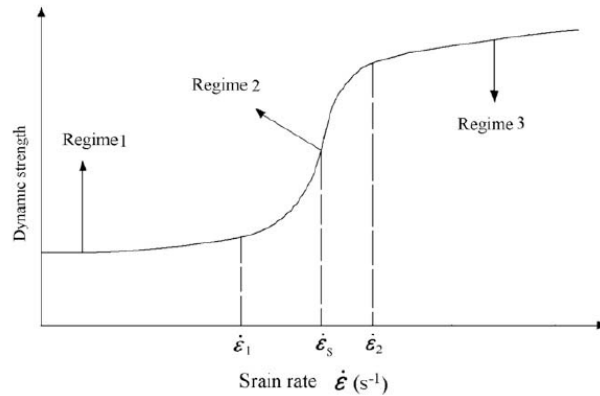


Figure 2-6 : Dépendance de la vitesse de déformation sur la résistance dynamique du matériau ou de la limite dynamique d'élasticité (Qi *et al.*, 2009).

Les équipements de cirque étant en déformation élastique, la loi de Hooke s'applique et le lien avec la vitesse de déformation est défini comme suit :

$$\dot{\epsilon} = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{1}{EA} \frac{\partial F}{\partial t} \quad [3]$$

avec $\dot{\epsilon}$: vitesse de déformation, E : module d'Young, σ : contrainte, A : aire et $\frac{\partial F}{\partial t}$: taux de chargement.

2.2 Recherche dans le milieu circassien

2.2.1 Efforts dynamiques

La dynamique est une partie de la mécanique qui traite du mouvement des corps sous l'action de forces. Les efforts dynamiques dans le milieu du cirque représentent les forces générées par les artistes de cirque lors des mouvements. Donovan indique que les forces créées par des mouvements sont plus grandes que le poids statique tout en étant méconnue des professionnels du milieu (Donovan, 2008).

2.2.2 Force de choc

La force de choc est définie par Glerum comme étant l'application rapide d'une force sur un objet (Glerum, 2007). Donovan ainsi que Glerum suggèrent une méthode de calcul approximative pour calculer la valeur de la force de choc dans le cas d'une chute :

$$force\ de\ choc = \frac{W \times D_F}{D_S} + W \quad [4]$$

où D_F est la distance de chute libre, D_S est la distance d'arrêt et W est le poids.

Cette équation a été calculée avec l'hypothèse d'une force constante (Annexe A). La méthode pour trouver cette équation n'est donc pas conservatrice. Avec une force élastique, qui se rapproche plus de la réalité pour les matériaux utilisés en accrochage, on obtient une équation différente :

$$force\ de\ choc = 2 * \frac{W \times D_F}{D_S} + W \quad [5]$$

où D_F est la distance de chute libre, D_S est la distance d'arrêt et W est le poids. Le détail des calculs pour trouver les équations [4] et [5] et donc l'explication de l'apparition du facteur 2 sont développés en Annexe A.

2.2.3 Travaux expérimentaux sur les forces dynamiques dans les agrès de cirque

Aucun travail de modélisation du corps humain en mouvement au cirque que ce soit pour l'analyse (dynamique inverse) ou la simulation de mouvement (dynamique directe) n'a à ce jour été réalisé.

Le groupe de travail « Conception et fabrication des Agrès de Cirque », coordonné par l'association HorsLesMurs, a mené une première prise de mesure sur certains agrès entre 2002 et 2008 en France. HorsLesMurs est le centre national de ressources des arts de la rue et des arts du cirque. Les agrès mesurés sont le trapèze volant et son filet (HorsLesMurs, 2002), la corde lisse (Loriaux, 2004), le trapèze ballant (Loriaux, 2004), la corde volante (Loriaux, 2004), le cadre aérien (Loriaux, 2004), le fil tendu (Loriaux, 2004) et les longes du trapèze ballant (Loriaux, 2008). Chaque prise de mesure a été faite sur une journée à l'aide de dynamomètres placés aux points d'accrochage avec un artiste professionnel. Un coefficient dynamique a été mis en

évidence dans les rapports techniques. Ce coefficient correspond au ratio de la force maximale générée par l'artiste lors de cette prise de mesure sur son poids (Tableau 2-4).

Tableau 2-4: Coefficient dynamique maximal mesuré pour certains agrès de cirque

Discipline	Coefficient dynamique maximal
Trapèze volant	5.06
Corde lisse	4.66
Trapèze ballant	3.04
Longes	7

Cette prise de mesure a été la première à mettre en évidence les forces générées lors de mouvements d'artiste de cirque. Les données récoltées sont aujourd'hui une référence dans le milieu circassien car elles sont les seules existantes. Les forces au point d'accrochage ont été mesurées en trapèze danse et a fait l'objet d'une maîtrise des beaux-arts en théâtre et dramaturgie (Vogel, 2014). Les forces maximales ont été trouvées pour quatre mouvements relativement basiques avec la participation de 10 artistes. La force maximale mesurée vaut 766 lbs ce qui représente 4.94 fois le poids de la personne. Le mouvement exécuté est appelé « assis avec rebond » : l'artiste se suspend aux cordes le plus haut qu'il le peut et relâche pour se retomber assis sur la barre de trapèze. De nouvelles données mesurées avec des paramètres différents permettraient de garantir toutes les situations réelles soumises aux équipements et ce pour différents équipements aériens.

2.2.4 Pratiques sécuritaires en conception

Un guide technique sur la conception et la fabrication des agrès de cirque a été produit en France en 2003, dans la même période que ces prises de mesure, et coordonné par l'association HorsLesMurs (HorsLesMurs, 2003). Ce mémento traite de la prévention et de l'évaluation des risques ainsi que de la conception et de la fabrication des agrès de cirque. Il indique aussi une méthode de calcul pour dimensionner les agrès de cirque.

Cette méthode de calcul permet d'évaluer les efforts réels dans l'équipement acrobatique en tenant compte des efforts dynamiques par l'ajout d'un facteur dynamique :

$$\left(\begin{array}{c} \text{masse} \\ \text{de l'agrès} \end{array} + \begin{array}{c} \text{masse des} \\ \text{utilisateurs} \\ \text{autorisés} \end{array} \right) \times \begin{array}{c} \text{facteur} \\ \text{dynamique} \end{array} = \begin{array}{c} \text{effort dans} \\ \text{l'élément} \end{array} \quad [6]$$

Pour l'accrochage, la masse de l'agrès est considérée en plus de la masse des utilisateurs. Pour la conception des agrès, seule la masse des utilisateurs est à prendre en compte. Le facteur dynamique prend deux valeurs : 2 si l'agrès est fixe ou 5 si l'agrès est ballant. Les agrès ballants comprennent le trapèze ballant, la corde volante et le trapèze volant. Les agrès fixes sont les équipements qui sont peu mobiles ou sans ballant comme le tissu, la corde lisse ou le trapèze fixe. Cependant, lors de la prise de mesure sur la corde lisse en 2004, réalisée après la diffusion du memento, le coefficient mesuré lors d'une chute est de 4.66 (Loriaux, 2004). Ceci vient contredire l'utilisation du facteur dynamique de 2 qui est alors insuffisant lors de mouvements comme les chutes.

Pour l'accrochage, le memento préconise d'utiliser l'évaluation des efforts réels avec le facteur dynamique dans l'équation du facteur de sécurité :

$$\begin{array}{c} \text{effort dans} \\ \text{l'élément} \end{array} \leq \frac{\begin{array}{c} \text{résistance à la rupture} \\ \text{de l'élément} \end{array}}{\begin{array}{c} \text{coefficient d'utilisation} \end{array}} \quad [7]$$

Le coefficient d'utilisation étant le facteur de sécurité en accrochage soit 10. En réalité, dans le milieu circassien, la méthode de calcul passant par le facteur dynamique n'est pas utilisée pour l'accrochage mais plus en conception.

2.2.5 Étude analytique et expérimentale du cadre aérien

Agnesina a étudié un agrès en particulier : le cadre aérien. Une première analyse du mouvement des acrobates en fonction de différents cadres a été réalisée pour définir les forces de réactions au niveau des genoux du porteur (Agnesina, *et al.*, 2007). Une autre étude a analysé le comportement dynamique du cadre aérien sujet à des sollicitations induites par les voltigeuses

(Talbi, *et al.*, 2007). Un modèle avec calcul par éléments finis simule le comportement mécanique du cadre aérien. L'auteur conseille d'utiliser son modèle pour dimensionner, valider ou optimiser la conception de cet équipement acrobatique.

2.3 Recherche dans les milieux connexes

2.3.1 Le milieu de la gymnastique

L'estimation des forces dans plusieurs équipements de gymnastique a été étudiée par Hiley, Kerwin et Yeadon. Les forces de réaction dans une barre fixe de gymnastique ont été estimées par la dynamique inverse et par des enregistrements vidéo du déplacement de la barre (Kerwin & Hiley, 2003). Une comparaison est faite avec les forces mesurées à l'aide de jauges de déformation fixées sur la barre (Arampatzis & Brüggemann, 1999). La figure mesurée dans cette étude est le grand tour arrière et consiste à faire un tour complet autour de la barre fixe, bras tendus accrochés sur la barre. La force maximale verticale mesurée est de 2789N (ou 4.53 fois le poids de la personne) et celui de la force horizontale est de 2513N (ou 4.08 du poids de la personne). La variabilité du mouvement a été analysée selon le niveau de compétence de gymnaste effectuant un tour autour de la haute barre (Hiley *et al.*, 2013). Deux groupes de gymnaste classés selon niveau effectuant le même mouvement pendant que les données cinématiques sont enregistrées. L'écart-type de la durée du mouvement et la magnitude des angles des gymnastes sont des éléments indiquant une bonne façon d'exécuter le mouvement. Les gymnastes du premier groupe, ayant un niveau de compétence supérieur, démontrent une variabilité plus faible dans ces éléments clés que les gymnastes du deuxième groupe.

Le système de support pour les gymnastes a aussi été analysé (Hiley *et al.*, 2011). Il s'agit d'un système utilisé en entraînement pour des figures difficiles (sauts, vrilles...) composé d'une ceinture pour le gymnaste et de longes que l'entraîneur ajuste pour protéger la personne en cas de chute. Ce système est aussi utilisé dans le milieu du cirque. La force maximale est observée lorsque le gymnaste tombe d'une grande hauteur et que l'entraîneur essaie d'arrêter le mouvement dans une courte distance. C'est ce mouvement qui est mesuré lors de cette étude, en prenant une masse équivalente de 35kg pour simuler le gymnaste qui chute. La force maximale enregistrée est de 1.3kN pour une distance d'arrêt de 1.25m. La distance d'arrêt est un élément

important à considérer : plus elle est courte, plus la force générée sera grande. La masse de 35kg est cependant bien petite par rapport aux masses des artistes de cirque.

La mesure des forces agissant sur le gymnaste et le trampoline lors de sauts ainsi qu'une modélisation de la force et du déplacement du trampoline ont fait l'objet d'une thèse de maîtrise (Jaques, 2008). Deux méthodes expérimentales sont utilisées dans ce travail : mesure de la force par des capteurs de force aux points d'appui du trampoline et mesure du déplacement de la toile du trampoline par caméra (le déplacement est ensuite converti en force supportée par le gymnaste.) La force verticale mesurée par les capteurs de force sur le système de suspension du trampoline varie de 9 à 12kN pour de petits sauts et de 15 à 18kN pour de hauts sauts. La force verticale expérimentée par la personne varie entre 5.8 et 10.6 fois son poids. Rappelons que le trampoline est aussi un agrès utilisé en cirque. La toile du trampoline, étant souple, ne génère pas des forces aussi grandes qu'une structure rigide.

2.3.2 Norme dans le milieu de l'escalade

Les cordes vendues pour pratiquer l'escalade doivent respecter la norme internationale UIAA 101 : 2013 ou la norme Européenne EN 892 : 2012. Sur le plan technique, il n'y a peu de différence entre les deux normes. Ces dernières indiquent entre autres que la force de choc dans la corde pour une chute d'une masse de 80kg avec un facteur de chute de 2 ne doit pas dépasser 12kN. Le facteur de chute est le rapport entre la hauteur de chute libre et la longueur au repos (Figure 2-7).

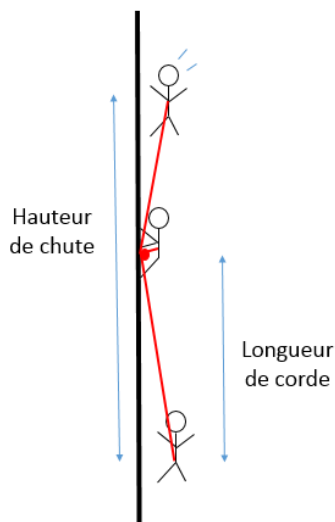


Figure 2-7 : Hauteur de chute et longueur de corde pour le calcul du facteur de chute en escalade.

Un facteur de chute d'environ 1.5 est donné par une chute d'une masse de 80kg avec une longueur de corde de 2.384m et une chute libre verticale de 3.521m (Bedogni & Manes, 2011). La plupart des études sur les forces de choc en escalade s'appuient sur cette norme. Deux articles utilisant ces conditions de prise de mesure (masse de 80kg, facteur de chute de 2) ont trouvé une force maximale d'environ 10kN (Bedogni & Manes, 2011; Ernst & Vogel, 2009). Une autre étude a testé plusieurs cas de chargement sur différentes cordes utilisées en escalade (Vogwell & Minguez, 2007).

L'équation pour évaluer la force d'impact dans la corde lors de chute est donnée par :

$$F = mg \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2AE}{mg} \left(\frac{H}{L} \right)} \right] \quad [8]$$

où m est la masse, g l'accélération gravitationnelle, A l'aire de la section de la corde, E est le module d'élasticité, H la hauteur de chute et L la longueur de la corde au repos. La force maximale mesurée par cette étude est 5kN pour une chute d'une masse de 55kg et un facteur de chute de 0.9.

Cette équation est aussi utilisée dans les recherches sur la protection contre les chutes de hauteur dans le milieu du travail comme en témoigne une étude de l'Institut de Recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (Arteau & Lan, 2015).

2.3.3 Normes dans le milieu du travail

Au Québec, l'article 338 du règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) oblige l'employeur à fournir gratuitement des équipements de protection individuels. Les articles 346 à 354 concernent en particulier les dispositifs de protection contre les chutes. Tout harnais de sécurité doit être conforme à la norme ACNOR CSA/CAN Z259.10-M90 et être utilisé avec l'un des systèmes suivants : un absorbeur d'énergie auquel est relié un cordon d'assujettissement ne permettant pas une chute de plus de 1.2m; un enrouleur-dérouleur qui inclut un absorbeur d'énergie ou qui y est relié. Le point d'attache du cordon d'assujettissement d'un harnais de sécurité doit être fixé de l'une ou l'autre des façons suivantes: ancré à un élément ayant une résistance à la rupture d'au moins 18 kN; attaché à un coulisseau conforme à la norme Dispositifs antichutes, descendeurs et cordes d'assurance, ACNOR CSA/CAN Z259.2-M1979; attaché à un système de corde d'assurance horizontale et d'ancrages, conçu par un ingénieur, ainsi qu'en fait foi un plan ou une attestation disponible sur les lieux mêmes du travail. Une corde d'assurance verticale doit: être conforme à la norme Dispositifs antichutes, descendeurs et cordes d'assurance, ACNOR CSA/CAN Z259.2-M1979; être utilisée par une seule personne; avoir une longueur inférieure à 90 m; être fixée à un ancrage individuel ayant une résistance à la rupture d'au moins 18 kN; être protégée de manière à ne pas entrer en contact avec une arête vive; être exempte de nœuds, d'épissures, sauf aux extrémités de la corde, et d'imperfections. Le milieu du travail ainsi que le milieu de l'escalade sont soumis à de nombreuses normes dès qu'il s'agit de pratique en hauteur.

2.3.4 Normes dans le milieu du cirque

Il n'existe à ce jour aucune norme pour la pratique des arts du cirque. Les artistes de cirque professionnels sont une exception à ces normes du travail. En réalité, un agrès de cirque pourrait être accroché sur n'importe quel point d'accrochage, que ce soit à but professionnel ou récréatif. Certaines personnes ne sont pas conscientes des risques engendrés par la pratique des arts du cirque et n'ont donc pas de crainte à accrocher un équipement de cirque sur une structure qui ne permet pas de supporter les charges dynamiques.

CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Comme nous avons pu le voir, peu d'études existent dans le milieu du cirque. Malgré le nombre élevé et croissant d'artistes ou de formations de cirque ainsi que de programmes scolaires incorporant des disciplines de cirque, il existe peu de données sur les forces générées par les artistes de cirque (HorsLesMurs, 2003). Les arts du cirque sont des activités physiques qui gagnent en popularité et dont les disciplines, les pratiques et les techniques d'apprentissages sont en constante évolution.

3.1 Croyances populaires

Il existe de plus des hypothèses dans le milieu circassien auxquels le projet va répondre à travers la prise de mesure et l'analyse des données récoltées.

- Un premier préjugé est que les artistes de cirque professionnels génèrent une force équivalente à leur poids. Certains gréeurs, non informés sur les charges dynamiques, ne comprennent d'ailleurs pas pourquoi on leur recommande un facteur de sécurité en accrochage de 10, surtout si l'artiste est une jeune femme pesant 45kg.
- Une autre idée préconçue est que les débutants génèrent des forces maximales beaucoup moins élevées que les professionnels du milieu étant donné que les mouvements qu'ils font sont plus faciles à exécuter. Ceci implique qu'une personne seule ou encore un organisme ou une école offrant des cours de cirque pour le loisir n'aura pas les mêmes préoccupations quant aux capacités des points d'accrochage ou des équipements de cirque. Il est d'ailleurs déjà arrivé que certaines personnes installent un équipement de cirque chez eux au moyen d'une vis dans leur plafond ou même sur une branche d'un arbre dans des parcs extérieurs.
- Une hypothèse chez les professeurs des arts du cirque est que les charges générées sont différentes selon le type de mouvement, mais les avis divergent sur quel type de mouvement génèrent les plus grands efforts. Certains artistes, de plus, sont très intéressés à savoir quel(s) mouvement(s) génère(nt) les forces les plus élevées dans leurs enchaînements pour pouvoir enlever les mouvements les plus critiques si la capacité du point d'accrochage n'est pas certaine (elle peut être plus faible dans certaines salles de spectacle).

- Le milieu du cirque s'accorde aussi sur l'idée que lors de spectacle, les artistes amplifient leurs mouvements et donnent bien plus d'intensité ou d'énergie qu'en entraînement et que donc les forces générées sont bien plus élevées en spectacle. Ceci est causé par l'adrénaline ou le stress provoqué par le direct du spectacle devant un public.

3.2 Objectifs

Les données des efforts dynamiques dans les cinq disciplines aériennes que sont le cerceau, la corde lisse, les sangles, le tissu et le trapèze danse avec différents paramètres testés constituent la véritable originalité de ce mémoire. La première étude sur le sujet réalisée par Loriaux consiste en une prise de mesure sur une journée avec un artiste professionnel. L'agrès commun entre l'étude de Loriaux et ce projet est la corde lisse (Loriaux, 2004). La deuxième étude menée par Vogel a mesuré les forces au point d'accrochage en trapèze danse pour quatre mouvements relativement basiques avec la participation de 10 artistes (Vogel, 2014). Le projet présenté ici, en plus de mesurer plus cinq disciplines prend en compte les différents paramètres suivants pour l'analyse des données : la masse de l'artiste, le sexe de l'artiste, la discipline, les types de mouvement effectué, le niveau scolaire des participants et la condition d'entraînement et de spectacle.

Les cinq disciplines choisies pour ce projet ont été sélectionnées avec une matrice de décision sur trois critères, avec la participation de l'École nationale de cirque. Les trois critères de sélection sont :

- la pertinence de l'étude : existe-t-il un besoin réel dans le milieu du cirque et/ou existe-t-il déjà de la littérature sur le sujet;
- l'utilisation par les artistes : l'agrès est-il un agrès commun ou beaucoup pratiqué et existe-t-il des différences dans les types de performances (performances dynamiques ou statiques);
- l'installation : l'installation de l'équipement acrobatique et de l'instrumentation de recherche nécessite-t-elle beaucoup de matériel et de personnel, et l'instrumentation est-elle facile à installer.

L'objectif global de l'étude présentée dans ce mémoire est la mesure des efforts dynamiques au point d'accrochage des agrès. En plus de former une banque de données sur le sujet, le projet vise à répondre à plusieurs objectifs spécifiques :

- Caractériser les forces maximales et leurs conditions d'apparition (type d'agrès, figures acrobatiques, conditions particulières etc);
- Caractériser les différences entre plusieurs situations : type d'agrès, sexe de l'artiste, niveau de compétence de l'artiste, masse de l'artiste, différents types de mouvements acrobatiques, condition d'entraînement et condition de spectacle;
- Analyser la variabilité des artistes effectuant plusieurs fois le même mouvement;
- Développer un guide de conception pour les agrès acrobatiques.

Plus précisément, le projet de recherche vise à répondre à trois questions de recherche :

- Comment la force exprimée en Newton ou en poids corporel diffère pour différents mouvements et différents agrès?
- Quelle est la variabilité entre un débutant et un professionnel qui maîtrise le mouvement?
- La force générée est-elle différente entre entraînement et spectacle?

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie globale appliquée pour atteindre les différents objectifs, développée dans ce chapitre est la suivante :

- Le banc d'essai et le protocole de mesure ont été développés afin de répondre aux contraintes de fonctionnement de l'ÉNC. Le banc d'essai permet d'enregistrer les signaux temporels de la force de tension au point d'accrochage ainsi que la vidéo synchronisée avec le signal de force.
- Les mesures expérimentales ont été effectuées sur une durée de 3 mois et demi à l'École nationale de cirque. Les étudiants participant au projet ont effectué, à la fin de leur cours, plusieurs mouvements et ceci sur plusieurs semaines, afin d'avoir un grand nombre d'échantillons. Les différentes situations (masse, sexe, niveau de compétence, type de mouvement, discipline) ont pu ainsi être couvertes. De plus, un enchaînement entier en corde lisse a été mesuré en entraînement et en spectacle.
- Les forces maximales et le taux de chargement maximal ont été trouvés et analysés pour les différentes situations citées. La force exprimée en poids corporel a été mise en avant pour les différentes situations. Plusieurs paramètres d'entrée sélectionnés, décrits au chapitre 4.9.1, ont de plus été analysés plus en détail pour un mouvement spécifique en sangles, grâce à la méthode d'analyse de la variance (ANOVA.) Un mouvement spécifique en tissu a de plus été modélisé.
- Pour analyser la variabilité d'un artiste effectuant le même mouvement, les différents signaux doivent être synchronisés à la meilleure corrélation car il est impossible de donner un moment de départ pour un mouvement. Le moment où les différents signaux générés pour un même mouvement sont le plus similaires est trouvé grâce à la méthode de corrélation croisée. Les signaux sont ensuite synchronisés entre eux à ce moment spécifique pour l'analyse. Deux méthodes pour comparer la variabilité des artistes ont été utilisées : l'écart type de la valeur moyenne de la force et l'erreur quadratique moyenne

(EQM.) La technique des EQM est finalement gardée pour le reste de l'analyse. Le lien est fait entre le niveau scolaire des étudiants et la variabilité des mouvements effectués.

4.1 Équipements de cirque utilisés

Les cinq équipements sur lesquels l'étude s'est concentrée sont des équipements dits aériens maintenus en un point d'accrochage : le cerceau, la corde lisse, le tissu, le trapèze danse et les sangles.

Le cerceau et le trapèze danse utilisés dans l'étude ont été fabriqués sur mesure pour l'École nationale de cirque. Le cerceau est composé d'un anneau plein en acier inoxydable sur lequel est fixé un câble d'acier galvanisé de 4.76mm de diamètre. Le câble d'acier est ensuite recouvert d'une corde pour éviter de blesser les artistes qui se maintiennent dessus et faciliter leur prise en main. De même, l'anneau en métal est recouvert de ruban adhésif. Le trapèze danse est composé d'une barre pleine de métal en acier inoxydable de 2.2cm de diamètre avec, selon le choix des artistes, à chaque extrémité un cylindre plein faisant office de poids stabilisateur. La barre est maintenue au point d'accrochage par deux câbles d'acier recouvert eux aussi de corde.

La corde lisse et les sangles (Figure 4-1) de l'ÉNC sont achetées chez *Barry*⁴, Montréal, Canada. La corde lisse est faite en coton et a une gaine de protection en cuire. La corde lisse a une longueur d'environ 10m selon le choix des artistes et un diamètre de 3cm. Les sangles sont faites en fibre aramide. La longueur totale dépend des artistes, elle peut varier de 3 à 5m. Son épaisseur est de 2mm et sa largeur de 3.8cm.

Le tissu de l'ÉNC est acheté chez *Knitrama*⁵, Montréal, Canada. Il est dit « dynamique », dans le sens qu'il est très élastique. La plupart des écoles de cirque pour débutant utilisent plutôt du tissu dit statique, plus rigide, car c'est moins fatigant d'y grimper. Le tissu est fait en nylon. Sa longueur est d'environ 10m selon le choix des artistes. Il est constitué de deux pans de 1.6m de largeur et a une épaisseur de 0.5mm.

⁴ <https://www.barry.ca/> [consulté le 24/08/15]

⁵ <http://www.knitrama.ca/> [consulté le 24/08/15]



Figure 4-1 : Photographie d'une sangle de chez Barry <https://www.barry.ca/>

4.2 Les participants

Tableau 4-1 : Répartition des participants par discipline.

Discipline	Nombre de participants
Cerceau	2
Corde lisse	2
Sangles	6
Tissu	4
Trapèze danse	2

Les 16 participants, étudiants de l'ÉNC, ont donné leur consentement pour participer à l'étude, qui a été approuvée par le comité d'éthique à la recherche avec des êtres humains de l'École Polytechnique de Montréal. Parmi les 16 artistes, 11 sont de sexe masculin, et 5 de sexe féminin. L'ÉNC offre deux programmes d'études supérieures : le Diplôme d'études collégiales en arts du cirque (DEC) et le Diplôme d'études de l'École (DEE.) Il n'y a aucune différence entre le DEE et le DEC si ce n'est la terminologie. Le DEE est l'équivalent du DEC pour les étudiants étrangers. Les participants sont présents dans tous les niveaux scolaires : un en première année de DEE, un en première année de DEC, 8 en deuxième année de DEC et 6 en troisième année de DEC. Ils ont tous entre 18 et 23 ans et pèsent entre 54 et 75kg. La répartition par discipline est présentée au Tableau 4-1.

4.3 Les mesures effectuées

En tout, 44 figures acrobatiques différentes ont été mesurées avec une répétition qui va d'une à 23 fois. Le total représente 302 échantillons mesurés à l'ÉNC. La répartition des figures acrobatiques par discipline est proposée au Tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Répartition des figures acrobatiques mesurées par discipline.

Discipline	Nombre de figures acrobatiques
Cerceau	7
Corde lisse	4
Sangles	8
Tissu	14
Trapèze danse	11

Un numéro entier en corde lisse a de plus été mesuré cinq fois avec les conditions suivantes : une fois en entraînement à l'ÉNC, deux fois en entraînement à la Tohu et deux fois lors du spectacle annuel de l'École à la Tohu.

4.3.1 Les types de mouvements acrobatiques

Les figures acrobatiques dynamiques exécutées par les artistes peuvent être classés par type de mouvement :

- Chute : il s'agit d'une action volontaire de se laisser tomber sachant que l'équipement acrobatique va rattraper l'artiste par une partie de son corps (cuisse, poignets, chevilles, dos...etc.). Une chute est un mouvement classique en tissu et en corde lisse mais peut aussi être effectué en trapèze danse ou en sangles. On distingue deux types de chutes : libre ou déroulée. La chute peut être libre ou directe lorsque l'artiste se laisse tomber vers le sol et qu'il n'y a pas de déroulement de l'équipement: par exemple, une boucle faite par le tissu ou la corde qui se resserre sur une partie du corps. Une chute déroulée demande que l'équipement se déroule, c'est-à-dire que le tissu, la corde lisse, la sangle ou même les

cordes qui retiennent le trapèze se déroulent et fassent vriller ou tourner l'artiste jusqu'à ce que l'équipement retienne l'artiste par une partie de son corps.

- Mouvements avec tempo: l'artiste, qui se tient à l'agrès, se balance d'un côté à un autre sans que l'équipement ne bouge. Il peut effectuer différentes variations avec ses jambes, changer de position ou même effectuer un tour complet selon les conditions. Ce type de mouvement est basique en trapèze danse, en cerceau ou en sangles, mais peut aussi être effectué en tissu ou en corde lisse.
- Mouvements avec grand ballant : l'artiste balance l'agrès d'un côté à un autre ou avec une trajectoire circulaire et effectue des changements de positions. Ce type de mouvement est très présent en cerceau, en sangles et en trapèze danse. (Le tissu et la corde lisse ont tendance à plus rester dans leur axe étant donné leur forme longiligne).
- Mouvements acrobatiques: l'artiste effectue un tour, une vrille, un salto, des sauts ou autre figure acrobatique du même genre. En corde lisse et en tissu, il peut, selon le mouvement, lâcher l'équipement puis le rattraper, ceci est appelé un lâché rattrapé. En cerceau ou en trapèze danse, il peut tourner autour de la barre de métal en étant appuyé par une partie de son corps et est appelé un tour sur appareil.
- Tour selon l'axe du câble aussi appelé « spin »: il s'agit de faire tourner le cerceau ou le trapèze danse selon l'axe de rotation du câble. L'artiste effectue ensuite des changements de position tandis que l'équipement continue de tourner.
- Transition : il s'agit de l'action de passer d'une position à une autre.

Cette liste est non exhaustive. Beaucoup de mouvements sont en réalité difficilement descriptibles ou classables dans une catégorie. Certains mouvements peuvent de plus combiner plusieurs types : par exemple, une chute déroulée en corde lisse qui finit par une vrille se classe à la fois dans chute et dans mouvement acrobatique. Chaque artiste développe ses propres mouvements qui sont pour la plupart uniques. Le Tableau 4-3 donne la répartition des types de mouvements mesurés par discipline. Les changements de position ainsi que les mouvements mesurés durant le numéro ne sont pas considérés ici.

Tableau 4-3 : Répartition des types de mouvements mesurés par discipline.

	Cerceau	Corde	Sangles	Tissu	Trapèze danse
Chute libre		1		5	1
Chute déroulée		1	1	5	1
Mouvements avec tempo	2		1	1	4
Mouvements avec grand ballant	1		1		
Mouvements acrobatiques	3		3	3	3
Tour sur l'axe du câble	1				
Mouvements combinant plusieurs catégories		2	2		3

4.4 Procédure expérimentale

4.4.1 Description du banc d'essai

Le banc d'essai, présenté aux Figure 4-2 et Figure 4-3, se compose d'une cellule de charge placée au point d'accrochage de l'équipement acrobatique au câble. La cellule de charge mesure la force de tension et elle est connectée à un émetteur qui va envoyer le signal au récepteur. Les raisons du choix d'un banc d'essai sans fil sont : de permettre aux artistes de tourner sur l'axe du câble sans se soucier d'un quelconque fil; de pouvoir monter et démonter le montage rapidement et facilement pour ne pas déranger le fonctionnement de l'École et enfin de pouvoir transporter le tout d'un studio à un autre ou à l'extérieur sans difficulté.

Le récepteur transmet le signal de la cellule de charge à l'ordinateur. Une caméra est de plus connectée à l'ordinateur pour enregistrer une vidéo des figures exécutées par les artistes.

La cellule de charge est une Futek LCF455-2000lbs. Elle a été calibrée par le fournisseur au moment de l'achat. L'émetteur, un nœud programmable WSN3214 de National Instrument, est couplé avec le récepteur, une passerelle Ethernet WSN.

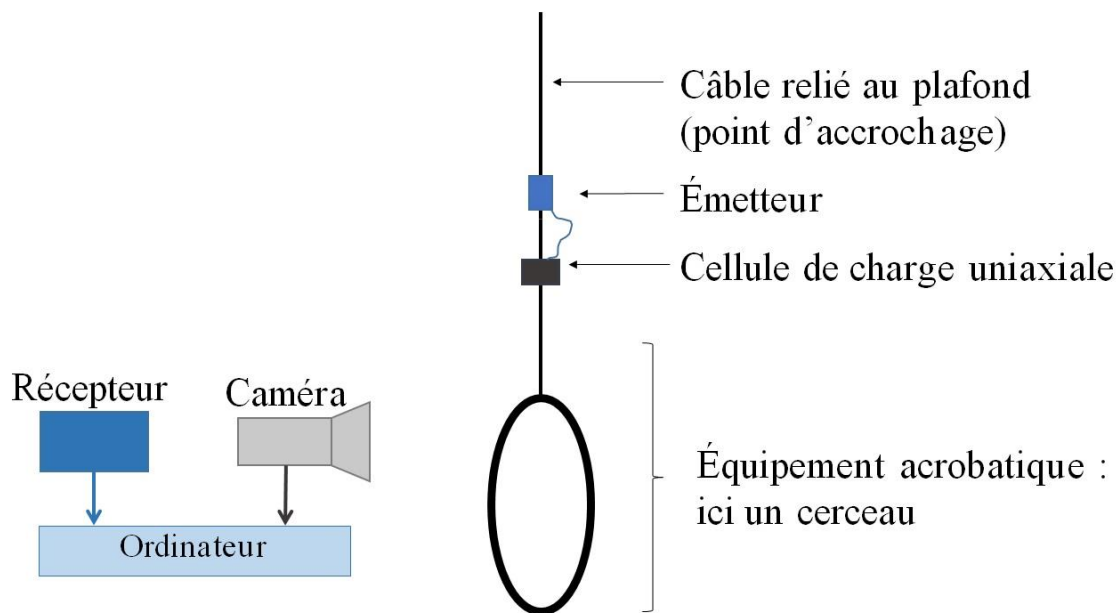


Figure 4-2 : Position de la cellule de charge, de l'émetteur, du récepteur et de la caméra lors de la prise de mesure.

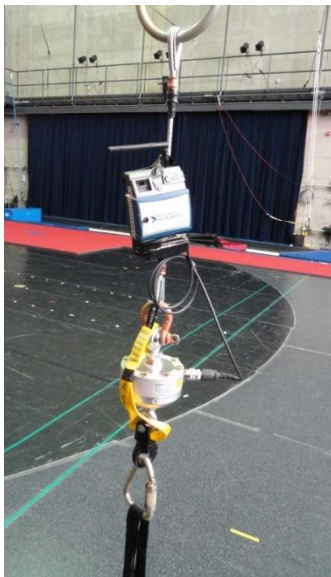


Figure 4-3 : Photographie du banc d'essai.

4.4.2 Protocole expérimental

Un programme LabView, créé par Benedict Besner, technicien à l'École Polytechnique, permet d'enregistrer les signaux temporels de l'émetteur qui correspondent aux signaux de force, et les vidéos. Les données sont envoyées en temps réel entre l'émetteur et le récepteur. La fréquence d'échantillonnage utilisée est de 100Hz. Le début et la fin d'enregistrement sont contrôlés manuellement depuis l'ordinateur. Une fois le montage installé, le zéro est fait avant que l'artiste monte sur l'équipement, c'est-à-dire que le poids de l'équipement acrobatique n'est pas considéré.

Chaque étudiant ayant participé au projet a effectué entre 1 et 10 mouvements acrobatiques différents avec une répétition de 1 à 23 fois. Seuls les mouvements effectués avec une répétition minimale de 5 fois ont été gardés pour l'analyse des données. Cela représente un total de 38 mouvements. La collecte de données s'est effectuée sur trois mois, de février à avril 2015, à l'École nationale de cirque. Un numéro entier en corde lisse a de plus été mesuré lors de deux entraînements et lors de deux spectacles à la Tohu en mai et juin 2015.

4.4.3 Erreur de mesure

Lors d'une prise de mesure expérimentale, il est important de connaître la confiance à avoir dans le chiffre obtenu. En réalité, on ne pourra pas donner de valeurs exactes sur la précision obtenue mais plutôt un ordre de grandeur qui sera plus ou moins conservateur selon la façon qu'on l'a évalué. On peut séparer les erreurs expérimentales en deux catégories : systématiques et aléatoires.

Quelques erreurs peuvent être répertoriées pour la prise de mesure effectuée à l'ÉNC et à la Tohu :

- Erreurs systématiques : calibration, erreurs dues aux équipements et erreurs de chargement (en effet, l'équipement acrobatique n'a pas exactement le même comportement sans la cellule de charge placée au-dessus);

- Erreurs aléatoires : erreurs humaines (les artistes arrivent plus ou moins à s'adapter aux variations que la cellule de charge cause dans leur mouvement), erreurs dues aux perturbations extérieures (selon le point d'accrochage, le plafond, le câble d'accrochage ou le corps de l'artiste, la force générée est en effet différente d'un cas à un autre).

4.4.3.1 Erreur due à la cellule de charge

Tableau 4-4 : Spécifications de la cellule de charge LCF455-2000lbs utilisées pour le calcul d'erreur.

Étendue de mesure	0-8.92 kN
Étendue de sortie	0-20V
Sensibilité	2mV/V
Erreur de zéro	±1% pleine échelle
Non linéarité	±0.1% pleine échelle
Hystérésis	±0.2% pleine échelle
Répétabilité	±0.002% pleine échelle

Les spécifications de la cellule de charge LCF455-2000lbs sont indiquées dans le Tableau 4-4. L'erreur due à la température n'est ici pas considérée puisque les studios d'entraînement sont maintenus à une température d'environ 20°C (qui est dans la plage de température d'utilisation.)

Le calcul des erreurs peut être décomposé comme suit :

- Erreur de zéro : $\pm 1\% \times 20V = \pm 0.2V$
- Erreur de non linéarité : $\pm 0.1\% \times 20V = \pm 0.02V$
- Erreur d'hystérésis : $\pm 0.2\% \times 20V = \pm 0.04V$
- Erreur de répétabilité : $\pm 0.002\% \times 20V = \pm 0.0004V$

D'où l'erreur globale pour la pleine échelle vaut: $\pm\sqrt{0.2^2 + 0.02^2 + 0.04^2 + 0.0004^2} = \pm 0.20V$. Cela représente l'erreur de zéro, qui peut facilement être corrigée à posteriori sur les données mesurées. Dans ce projet, le zéro est atteint manuellement une fois que l'équipement de cirque est accroché. La seule erreur possible qui pourrait avoir lieu est une erreur humaine : si le zéro a été atteint au mauvais moment.

4.4.3.2 Exactitude du banc d'essai



Figure 4-4 : Photographie du banc d'essai et des deux poids de calibration.

L'exactitude d'un banc d'essai se définit par sa fidélité et sa justesse. La fidélité est « l'étroitesse d'accord entre des résultats d'essai indépendants obtenus sous des conditions stipulées » (Norme NF ISO525-1 :1994). La justesse est l'aptitude à donner des indications égales à la grandeur mesurée.

Deux poids de calibration, chacun de 100lbs, sont fixés au banc d'essai par une sangle (Figure 4-4). Une mesure est effectuée pour donner 100 fois de suite la force dans les mêmes conditions.

Les résultats du test de précision sont collectés dans le Tableau 4-5. L'erreur relative du banc d'essai est donc de 0.8%. Notons que cette quantification est calculée avec une mesure d'une masse de 200lbs soit un poids de 892N. Or les artistes ont généré des forces bien plus élevées.

Une méthode plus sûre aurait été de prendre un poids proche de la valeur maximale que la cellule de charge peut mesurer ou plusieurs poids de mesure.

Tableau 4-5 : Résultats du test de précision du banc d'essai.

Valeur moyenne (\bar{m})	887.54 N
Écart-type (σ)	2.71 N
Fidélité relative (F)	$= \frac{\text{Fidélité à 95\%}}{\text{Vraie valeur}} = \frac{2 \times \sigma}{892 \text{ N}} * 100 = 0.6\%$
Écart entre valeur moyenne et vraie valeur	$= 892 - 887.54 = 4.46\text{N}$
Justesse relative (J)	$= \frac{ 892 - 887.54 }{892 \text{ lbs}} * 100 = 0.5\%$
Erreur relative	$= \sqrt{J^2 + F^2} = 0.8\%$

4.5 Problèmes rencontrés

Un système sans fil comprend ses propres avantages mais aussi des défis techniques particuliers. Le réseau de capteur sans fil WSN a été choisi pour les avantages suivants : pas de câblage, sa petite taille, son prix raisonnable et le peu de besoin en énergie. Cependant, des erreurs de transmission entre l'émetteur et le récepteur ont été observées durant la collecte de données. La passerelle NI WSN et le nœud de mesure associé utilise une radio IEEE 802.15.4 2.4GHz pour communiquer. Il existe des problèmes d'interférence dus à des canaux adjacents. Le risque de dégradation des données existe et peut être causé par un téléphone cellulaire ou un four à micro-ondes (Low *et al.*, 2005). Les problèmes rencontrés se traduisent par une répétition du signal acquis (Figure 4-5)

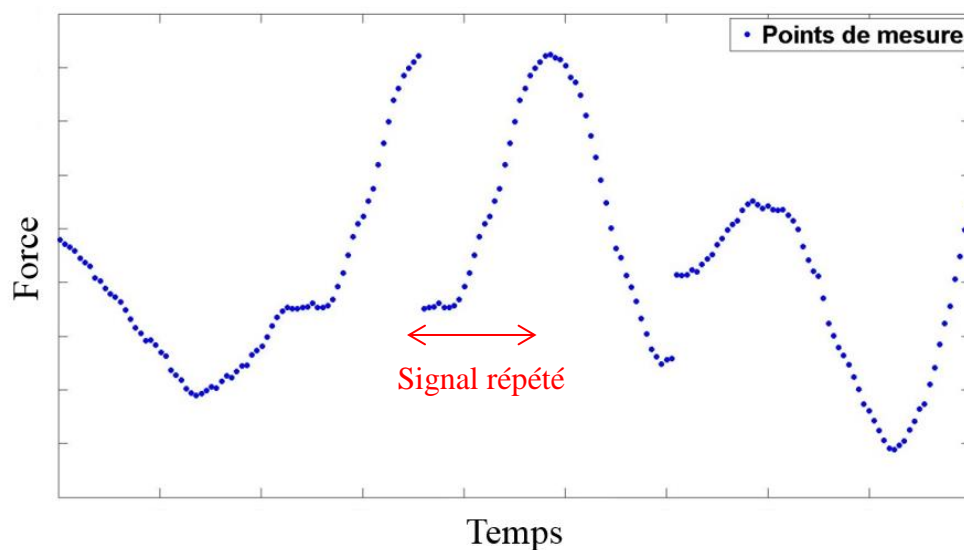


Figure 4-5 : Exemple de signal avec une répétition du signal.

Une première analyse a permis d'éliminer les signaux contenant ce problème dans les signaux mesurant un mouvement acrobatique. Si ce problème intervient avant ou après la mesure du mouvement, la répétition du signal est enlevée et laisse apparaître des données manquantes (Figure 4-6). Les données manquantes ne représentent pas un problème tant qu'elles ne sont pas présentes dans la mesure même d'un mouvement. L'analyse par la suite comprend un recadrage du signal pour éviter de considérer des parties avec données manquantes qui peuvent fausser les résultats.

Certaines courbes sont gardées avec des données manquantes dans le signal d'un mouvement. Un exemple de courbe gardée se trouve à la Figure 4-6. Il a été choisi de ne garder que les signaux contenant moins de 11% de valeurs manquantes dans la partie du signal à analyser et que ces valeurs manquantes ne soient pas présentes dans un point important tels la valeur maximale, minimale ou un changement de pente et d'interpoler ces valeurs avec une interpolation par spline cubique. Le principe de cette méthode consiste à sélectionner par segment un polynôme de degré 3 passant par toutes les valeurs du signal (Figure 4-7).

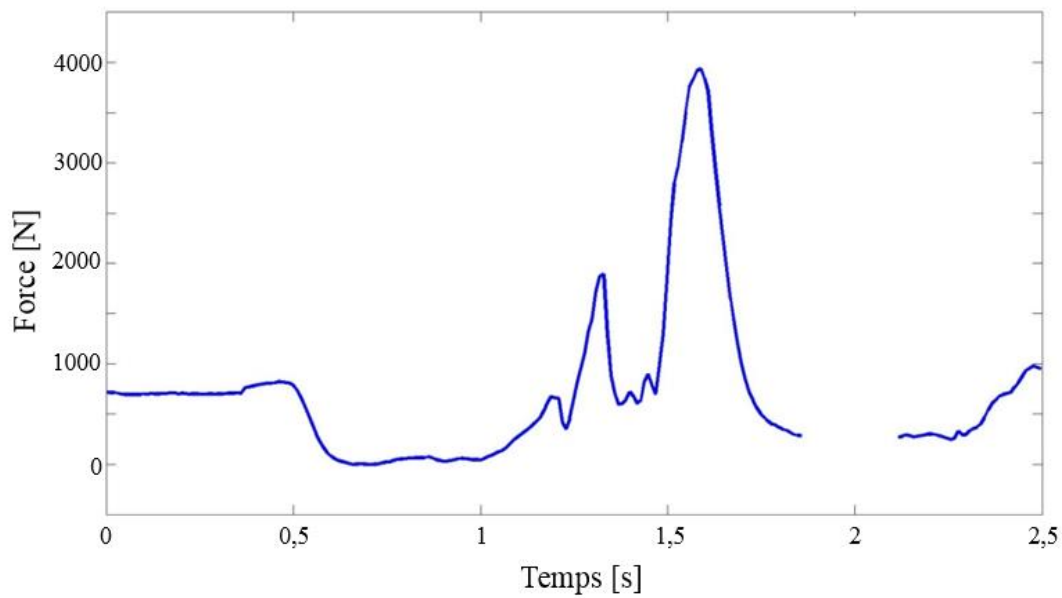


Figure 4-6 : Exemple de signal gardé pour l'analyse avec des données manquantes.

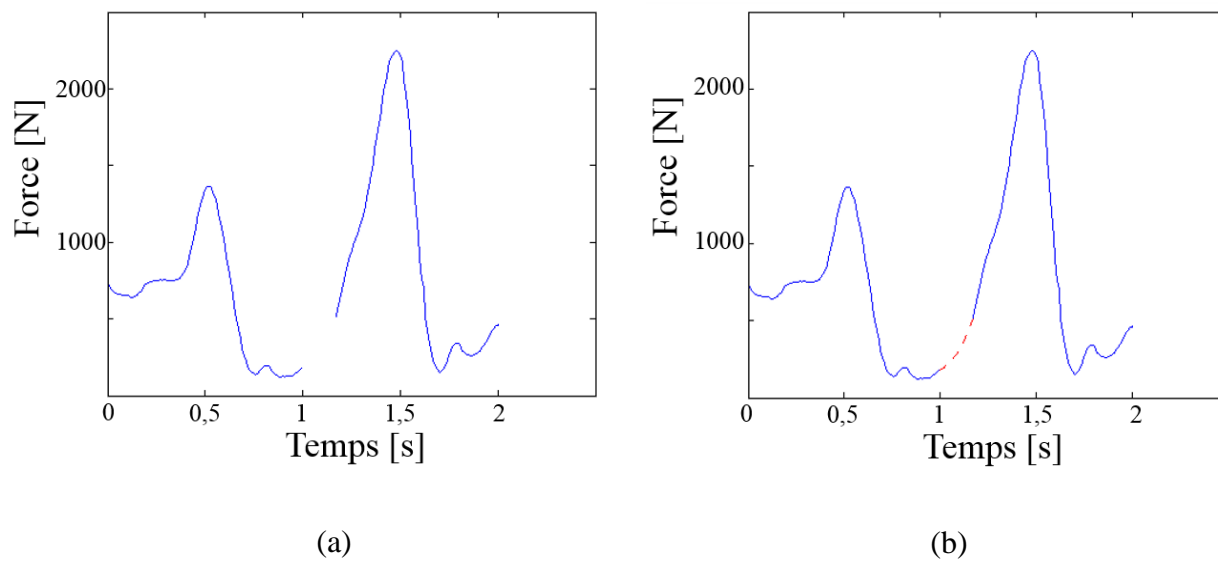


Figure 4-7 : Exemple de signal avec (a) des données manquantes et (b) des données interpolées en pointillés.

4.6 Force maximale et valeur moyenne de la force maximale

Pour chaque mouvement effectué, la force maximale a été trouvée en utilisant le logiciel Matlab. La forme du sommet et la position de la force maximale ont été observées pour tous les échantillons afin d'enlever toutes données aberrantes. Chaque vidéo a été visionnée afin de vérifier le moment où la force maximale est générée.

Trente mouvements ont de plus été répétés entre 4 et 13 fois selon la disponibilité des artistes. Un mouvement en particulier, la « dislocation » en sangles, a été effectué par 6 artistes différents. Une chute attachée en clé en huit aux chevilles a été effectuée par trois artistes différents. Ceci constitue un total de 36 mouvements. Pour chaque échantillon, la force maximale a été trouvée. La valeur moyenne de la force maximale est évaluée en effectuant la moyenne de la force maximale des différentes répétitions effectuées.

4.7 Caractérisation des propriétés mécaniques du tissu

Les propriétés mécaniques du tissu ont été quantifiées à l'Annexe B à travers deux essais mécaniques : un essai en rupture et un essai en chargement alterné. À long terme, le but serait de modéliser les agrès de cirque afin d'évaluer la force au point d'accrochage sans faire de prise de mesure directe. Si cela fonctionne, il ne sera plus nécessaire de faire de prise de mesure. En effet, il est difficile, même après la prise de mesure, de pouvoir évaluer la force maximale dans une situation différente de celle de la prise de mesure (avec un autre artiste, un autre point d'accrochage, une masse de l'artiste bien plus élevée, d'autres mouvements effectués ... etc) Une modélisation permettrait d'évaluer la force avec différents paramètres couvrant toutes les possibilités. Ainsi il serait possible de trouver le cas qui génèrerait la force la plus élevée et ainsi recommander des pratiques sécuritaires à partir de ce pire cas. Une modélisation d'une chute libre en tissu est commencée en Annexe C.

L'École nationale de cirque met des tissus à la disposition de ses étudiants. Ces tissus sont utilisés plusieurs heures par jour. Il est donc difficile de quantifier le degré d'usure du tissu utilisé pour la prise de mesure. Pour remédier à cela, la méthodologie suivante a été utilisée : les tests de rupture et en chargement alterné ont été effectués sur deux types d'échantillons. Le premier échantillon est du tissu neuf jamais utilisé, le deuxième est du tissu usé et destiné à être jeté. Les

paramètres du tissu utilisé dans la prise de mesure seront considérés comme étant la moyenne des paramètres des deux échantillons. Le tissu, en nylon, est composé de deux pans de 1,60m de largeur.

4.8 Méthodologie utilisée pour l'analyse de la variabilité

Le but est ici d'analyser la variabilité les signaux de forces générés par les artistes effectuant un même mouvement plusieurs fois. Le lien entre ce qu'un coach perçoit de la variabilité et les résultats sur les signaux de forces sera effectué.

4.8.1 Corrélation croisée

La première étape était de trouver le moment où les signaux sont le plus synchronisés afin de pouvoir les comparer. La meilleure méthode serait de choisir un point ou un moment de référence qui constituerait le début du mouvement. Cependant, l'enregistrement vidéo ne permet pas d'avoir cette précision. Une autre méthode a donc dû être cherchée. La méthode de corrélation croisée a été utilisée pour trouver le moment où les deux signaux sont le plus similaires. La formule mathématique de la corrélation entre deux signaux est donnée par :

$$c = \sum_{i=1}^n f_i * g_i \quad [9]$$

où c est la valeur de la corrélation, f_i est la valeur du signal f au point i et g_i est la valeur du signal g au point i .

Une des deux courbes est décalées par rapport à l'autre jusqu'à trouver le moment où la valeur de la corrélation est la plus élevée. Ceci représente le moment où les deux courbes sont le plus similaires. La Figure 4-8 présente deux signaux aléatoires non corrélés et corrélés. Cette méthode est utilisée dans le domaine temporel.

Cette méthode possède deux inconvénients : elle est très sensible au bruit et les signaux ne doivent pas comporter de données manquantes. En effet, étant donné que l'équipement de mesure se trouve sur un point d'accrochage, le tout ne cesse de vibrer. En dehors des mouvements effectués, la courbe présente des ondulations autour du poids statique de l'artiste (vibration de

l'équipement et de l'artiste suspendus.) Si ces ondulations sont prises en compte dans la corrélation croisée, le résultat peut être faussé. Un programme Matlab créé par Sarah-Laura Narcisse, étudiante à l'École Polytechnique et stagiaire sous mon encadrement, permet de résoudre ses deux inconvénients (Narcisse, 2015). Une interface graphique permet de recadrer manuellement les signaux pour ne garder que la partie intéressante, c'est-à-dire celle qui concerne seulement le mouvement.

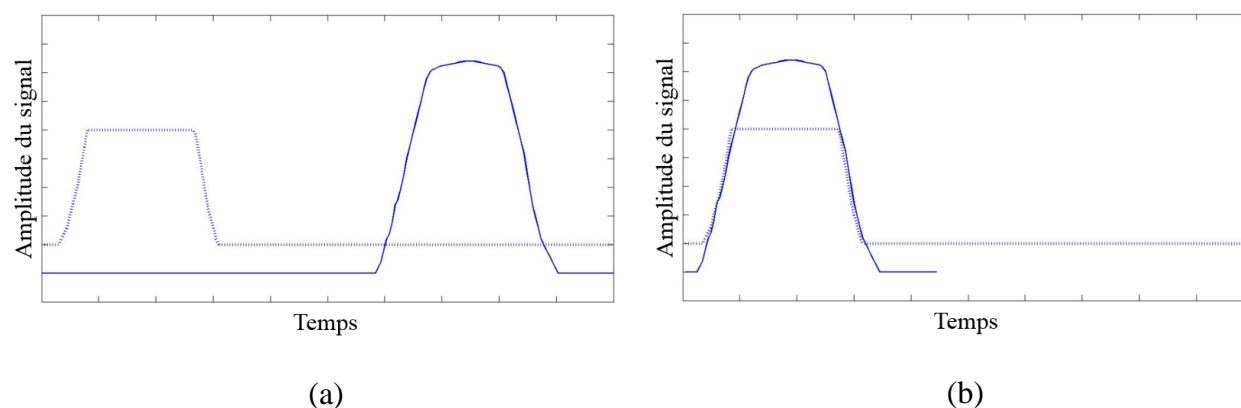


Figure 4-8 : Exemple de deux courbes aléatoires: (a) non corrélées et (b) corrélées.

4.8.2 Erreur quadratique moyenne et écart type de la courbe moyenne

Une fois les signaux placés deux à deux à la meilleure corrélation, deux méthodes ont été retenues pour analyser la variabilité des signaux. La première consiste à calculer l'erreur quadratique moyenne. Il s'agit de la racine de la moyenne des écarts au carré. La deuxième donne l'écart type des signaux moyennés (Figure 4-9). Un signal est choisi au hasard. Les autres signaux sont tous placés à la meilleure corrélation par rapport au premier signal. La moyenne et l'écart type sont évalués à chaque point. L'écart type moyen représente la moyenne des écarts type de tous les points. Ces méthodes sont différentes du calcul du coefficient de corrélation intra-classe (ICC) utilisée habituellement dans la littérature en biomécanique (Ferrari *et al.*, 2010; Kadaba *et al.*, 1989; Queen *et al.*, 2006).

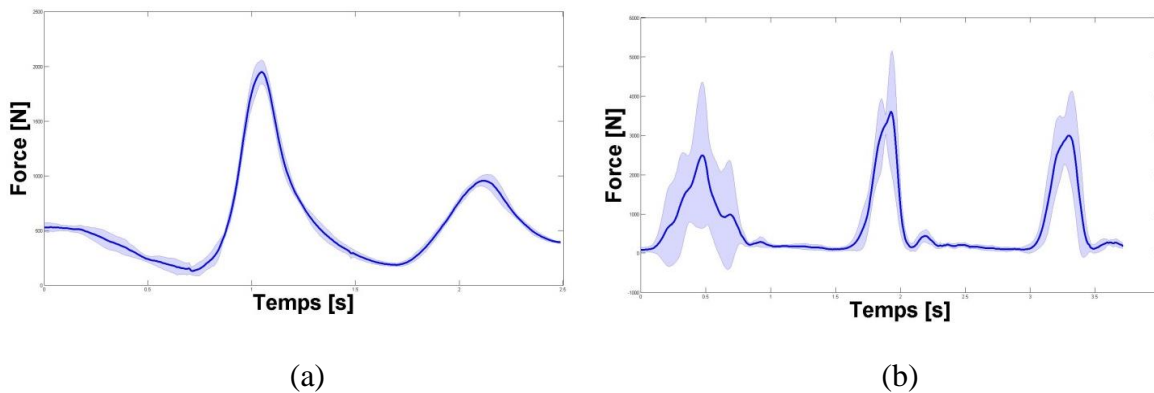


Figure 4-9 : Courbe moyenne avec l'écart type représenté par une surface :

(a) exemple d'écart type faible pour une chute chevilles en tissu et (b) exemple d'écart type élevé pour un enchainement de tours en sangles.

4.8.3 Différence de classement des deux méthodes

Les deux méthodes ont été utilisées pour ranger les 38 mouvements sélectionnés par ordre croissant selon leur degré de variabilité. Les mouvements sont classés avec la méthode des erreurs quadratiques moyennes ainsi que celle des écarts type moyens. Les valeurs données des erreurs quadratiques moyennes sont très différentes de celles des écarts types moyens. Les échelles n'étant pas les mêmes et les valeurs ne représentant pas la même notion, les deux méthodes ont été comparées selon leur classement et non pas selon les valeurs numériques.

La Figure 4-10 présente la différence de classement pour les 38 mouvements. Les cinq premiers mouvements du classement se trouvent sur la droite et ont exactement la même position de classement dans les deux méthodes. Le nuage de point est relativement proche de la droite pour tous les mouvements, ce qui indique une bonne cohérence entre les deux classements. Étant donné la bonne cohérence des résultats entre les deux méthodes, seule la méthode des erreurs quadratique moyenne est gardée pour l'analyse.

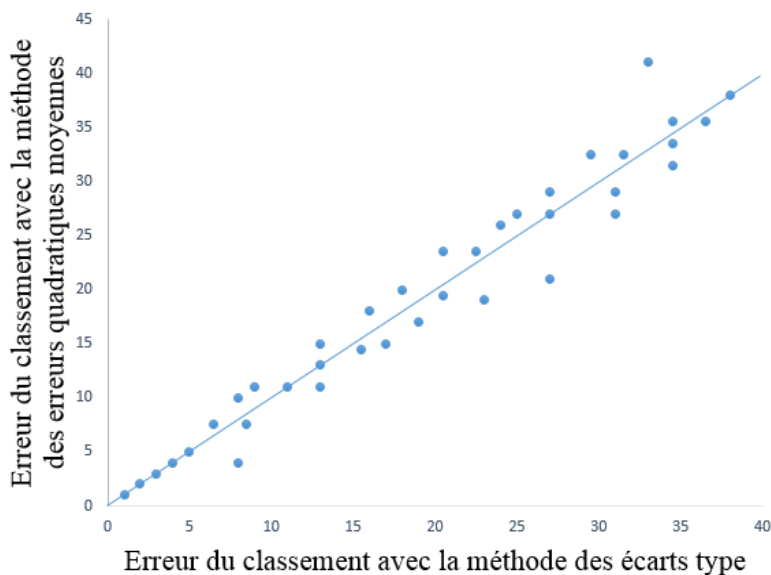


Figure 4-10 : Différence de classement de la méthode des erreurs quadratiques moyennes en fonction de la méthode des écarts type pour chaque mouvement

4.9 Méthodologie pour l'analyse des facteurs d'influence

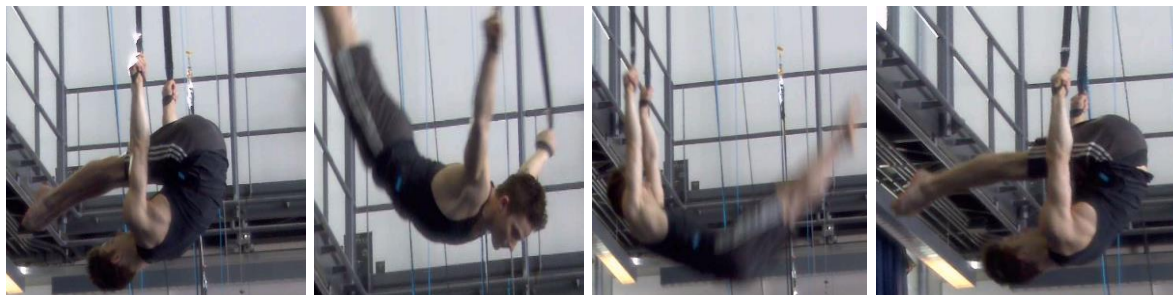


Figure 4-11 : Mouvement de « dislocation » en sangles commencé en position carpé : quatre photographies montrant l'évolution du mouvement.

Les paramètres d'entrée sont analysés avec la méthode d'analyse de la variance en mesures répétées, appelée ANOVA, pour chaque paramètre de sortie. Ce test statistique permet de mesurer l'influence des paramètres d'entrées sur les paramètres de sortie. Le résultat de ce test est présenté sous forme de diagramme Pareto dont les barres représentent l'ensemble des scores

obtenus rangés par ordre croissant. Cette représentation graphique permet d'identifier aisément les paramètres les plus significatifs. Le mouvement sélectionné pour l'analyse des facteurs d'influence est le mouvement de « dislocation » effectué en sangles (Figure 4-11).

4.9.1 Paramètres d'entrée

Le diagramme de causes à effets d'Ishikawa à la Figure 4-12 présente les différents paramètres ayant une influence sur la force mesurée. Les paramètres d'entrée entourés en rouge ont été retenus dans l'analyse. Les paramètres entourant l'environnement, la mesure ainsi que l'usure des sangles ou l'intensité d'effort sont difficilement contrôlable ou même mesurable. L'âge n'a pas été pris en compte du fait que les participants de l'étude ont tous entre 18 et 21 ans. La position finale n'a pas non plus été considérée car seuls deux échantillons ont été fait avec une position finale différente des autres et que la partie du signal gardée pour l'étude n'impliquait pas la fin du mouvement. Enfin le niveau de compétence et le fait que le mouvement soit bien effectué sont étroitement liés. Un étudiant ayant un meilleur niveau effectuera plus de mouvement bien effectué qu'un étudiant d'un niveau inférieur. La dépendance entre ces deux paramètres a été mise en évidence et il a été choisi de ne garder que le paramètre mouvement bien effectué.

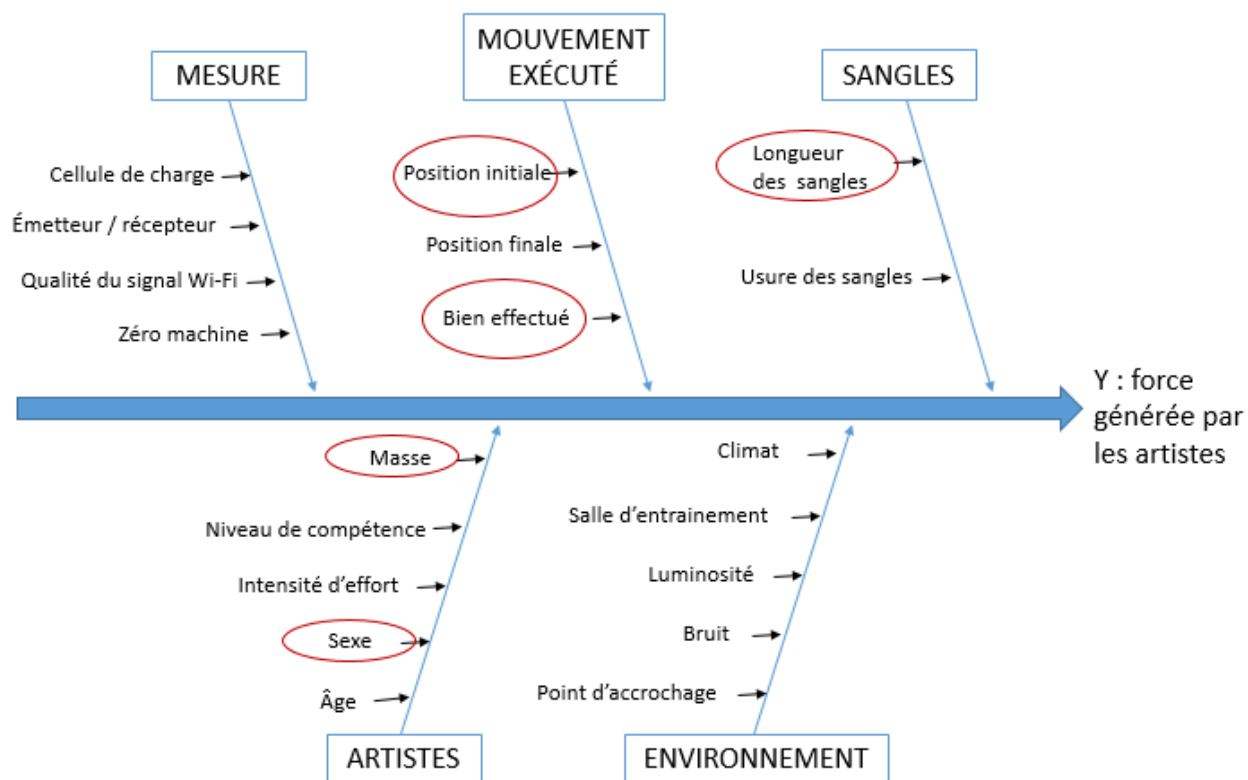


Figure 4-12 : Diagramme des causes à effets d'Ishikawa sur la prise de mesure de « dislocation » en sangles

Les plages de valeurs pour les différents paramètres d'entrée n'ont pas été choisies. Six artistes en sangles ont accepté de participer au projet. Un artiste est de sexe féminin, les cinq autres de sexe masculin. Les masses vont de 59kg à 72kg, la moyenne du groupe est de 66.3kg. Les six étudiants ont réalisé plusieurs fois le mouvement de la « disloc » présenté à la Figure 4-11. Le total des échantillons récoltés est de 48 mais il n'est pas également réparti par artistes. Enfin les artistes ont commencé le mouvement avec deux positions initiales : en position carpé (corps fléchi aux hanches) comme dans la Figure 4-11 ou en position tendue. Lorsque l'artiste commence en position tendue, son corps est droit et à l'envers, il passe par la position carpé pour ensuite lancer leurs jambes et continuer le mouvement comme dans la Figure 4-11. La longueur des sangles va de 3.03m à 4.89m, la moyenne des longueurs des sangles utilisées est de 4.01m. Les enregistrements vidéo ont été visionnés par un professeur de l'ÉNC. Chaque mouvement effectué a été classé dans une des trois catégories suivantes : bien effectué, moyennement bien effectué et mal effectué.

4.9.2 Paramètres de sortie

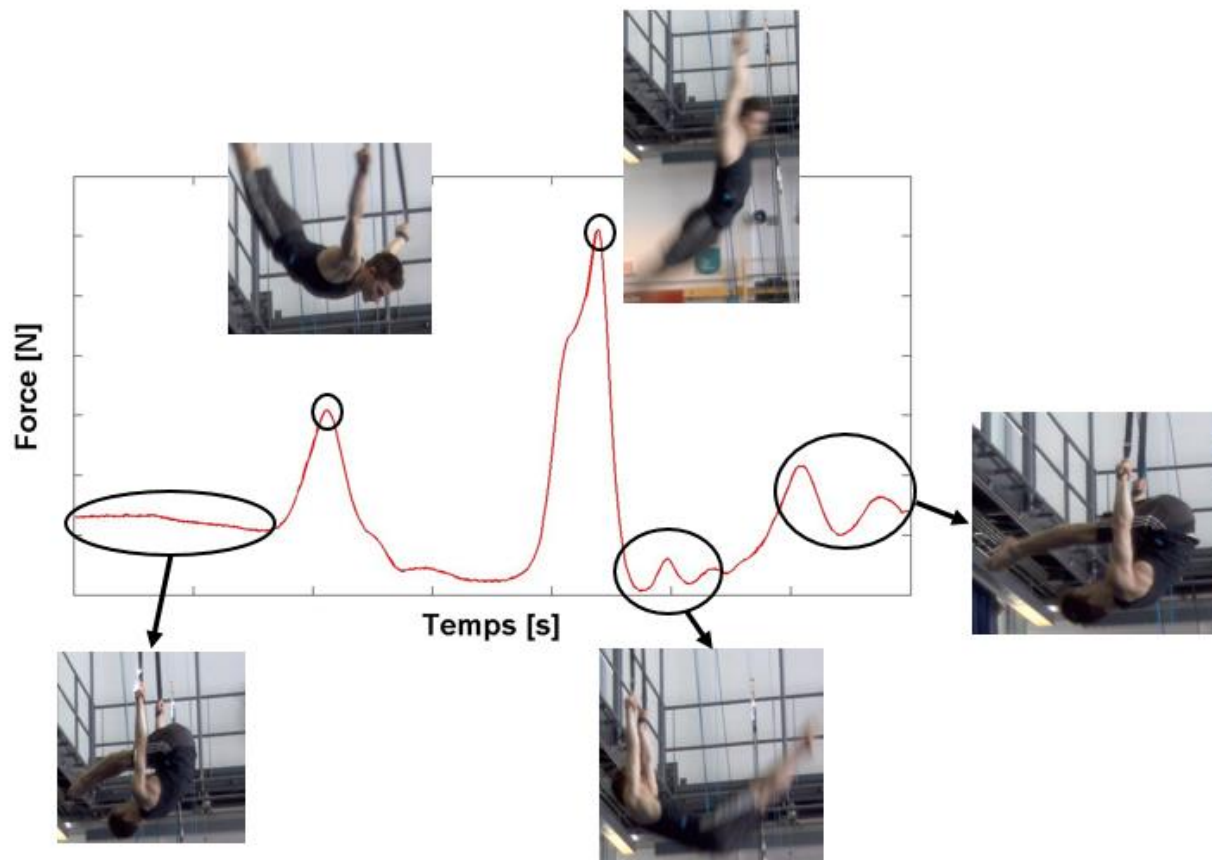


Figure 4-13 : Courbe générée par le mouvement de la « disloc » en sangles avec les positions de l'artiste correspondante.

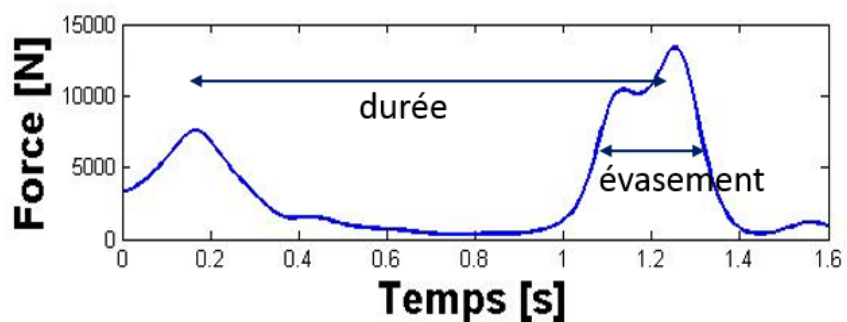


Figure 4-14 : Mise en évidence des paramètres durée et évasement sur une courbe générée par le mouvement de la « disloc » en sangles.

Les courbes utilisées dans l'analyse des facteurs d'influence ont été moyennées après avoir été placées à la meilleure synchronisation grâce à la méthode de la corrélation croisée présentée au 4.8.1.

La courbe générée par le mouvement de la « disloc » à la Figure 4-13 comprend deux sommets. Les paramètres de sortie sélectionnés sur le signal de force et sont les suivants : des points de référence tels les forces maximales des deux sommets et les forces minimales des deux creux ainsi que d'autres éléments tels le taux de chargement maximal, l'évasement du grand sommet pris la moitié de la force maximale (Figure 4-14), la durée entre les deux sommets (Figure 4-14) et enfin l'impulsion (aire sous la courbe.)

4.10 Synthèse

La Figure 4-15 présente un récapitulatif des méthodologies utilisées ainsi que les paramètres sur lesquelles elles sont utilisés.

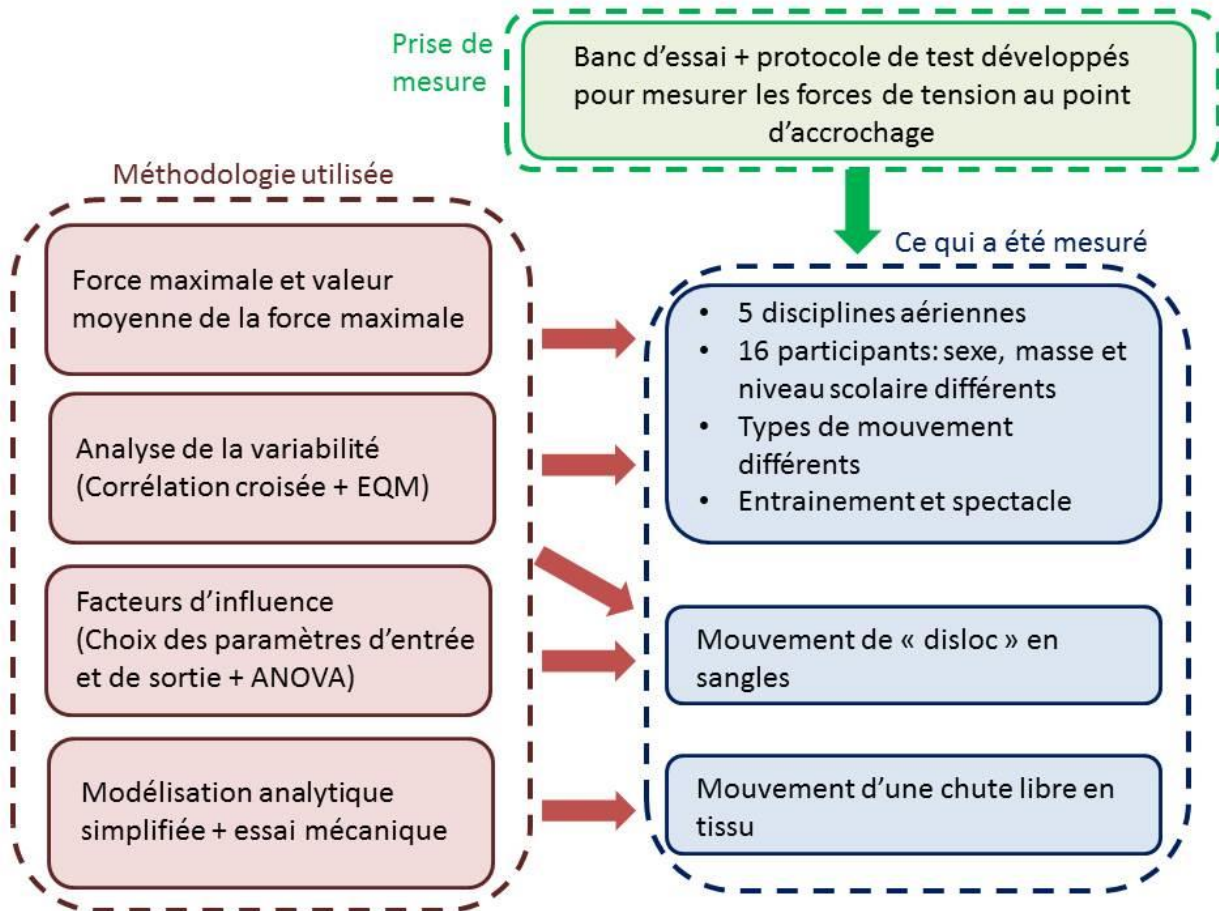


Figure 4-15 : Schéma récapitulatif des méthodologies utilisées ainsi que des différents paramètres mesurés et étudiés.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS BRUTS

5.1 Forces maximales mesurées

Les forces maximales ont été trouvées et classées selon la discipline, le type de mouvement et la masse de l'artiste. Il est important de s'intéresser à la force maximale plutôt que tout autre paramètre du signal car le but est de recommander des pratiques sécuritaires en accrochage ou en conception. Il faut donc regarder donc le cas le plus critique soit la force maximale.

5.1.1 Forces maximales par discipline

Les forces maximales mesurées par discipline sont classées au Tableau 5-1. La force maximale en poids corporel représente la charge maximale normalisée par le poids de l'artiste.

Tableau 5-1 : Force maximale mesurée par agrès.

Discipline	Force maximale mesurée	Masse de l'artiste	Force maximale en poids corporel
Sangles	5.3 kN	68kg	7.9
Corde lisse	4.2 kN	75kg	5.7
Trapèze danse	3.0 kN	64kg	4.8
Tissu	2.8 kN	64kg	4.5
Cerceau	1.8 kN	55kg	3.3

Il est difficile de comparer réellement les disciplines entre elles du fait que l'agrès pour chaque discipline est de forme et de matière différente et va donc réagir de façon très différente. De plus, les types de mouvements effectués entre les disciplines sont assez éloignés, mis à part peut-être le tissu avec la corde lisse. Néanmoins les valeurs sont très utiles pour les gréeurs et les concepteurs. Ils peuvent en effet adapter leurs pratiques sécuritaires en s'appuyant sur les charges

réelles mesurées. Les sangles ont généré la force maximale la plus élevée, ce qui est en accord avec l'idée commune des gréeurs mais la valeur est bien plus élevée que celle qu'ils pensaient.

5.1.2 Forces maximales par type de mouvements

Pour comprendre un peu plus la signification des valeurs du Tableau 5-1, nous allons analyser la répartition des forces maximales selon le type de mouvement. Les forces maximales par type de mouvement et par discipline sont classées dans le Tableau 5-2.

Tableau 5-2 : Force maximale par type de mouvement et par discipline

	Cerceau	Corde	Sangles	Tissu	Trapèze danse
Chute libre		4.2 kN		2.8 kN	2.3 kN
Chute déroulée		2.5 kN	2.8 kN	2.3 kN	2.0 kN
Mouvements avec tempo	1.7 kN		4.5 kN	1.3 kN	3.0 kN
Mouvements avec grand ballant	1.4 kN		2.6 kN		
Mouvements acrobatiques	1.8 kN		4.7 kN	2.0 kN	2.4 kN
Tour sur l'axe du câble	0.9 kN				
Mouvements combinant plusieurs catégories		2.1 kN	5.3 kN		2.3 kN

Plusieurs observations peuvent être faites à partir du Tableau 5-2:

- Les forces maximales en tissu et en corde lisse sont générées pour des chutes directes.
- En trapèze danse et en sangles, ce sont des mouvements comportant du ballant qui donnent des forces maximales.
- En sangles, le mouvement qui génère la force maximale est un mouvement combinant des tempos puis des tours.
- Le cerceau est la discipline dont les forces maximales sont les moins élevées des cinq disciplines. Cela s'explique sûrement par le fait que les deux artistes participant au projet

en cerceau ont des performances plus statiques et donc comportent moins de mouvements dynamiques. Avec une performance dynamique, les résultats auraient été bien différents. En réalité, nous pouvons supposer que les forces réagiraient de façon similaire avec le trapèze danse, car le cerceau et le trapèze danse permettent des mouvements similaires. De plus les deux participants ont eu de la difficulté à réaliser leurs mouvements à cause du poids de la cellule de charge qui induisaient une réaction différente de l'agrès.

- Il est à noter que ce tableau rend compte des mesures effectuées lors de l'étude à l'ÉNC. D'autres facteurs, non retranscrit dans le tableau, sont évidemment à prendre en compte, comme la masse de l'artiste ou sa position sur l'agrès par exemple. D'autres mouvements ou d'autres artistes effectuant les mouvements de l'étude pourraient générer plus (ou moins) de force avec d'autres conditions. Le Tableau 5-3 présente les mêmes résultats sous forme du poids corporel pour avoir une meilleure idée du lien entre la masse de l'artiste et des forces maximales générées.

Tableau 5-3 : Force maximale en poids corporel par type de mouvement et par discipline.

	Cerceau	Corde	Sangles	Tissu	Trapèze danse
Chute libre		5.7		4.5	3.6
Chute déroulée		3.4	4.1	3.7	3.2
Mouvements avec tempo	2.3		7	2.4	4.8
Mouvements avec grand ballant	1.8		3.9		
Mouvements acrobatiques	3.4		7.1	3.9	3.8
Tour sur l'axe du câble	1.3				
Mouvements combinant plusieurs catégories		2.3	7.9		3.7

5.1.3 Lien avec la revue de littérature

- La force maximale mesurée en corde lisse au Tableau 5-2 est pour une chute directe, ce qui est accord avec les résultats de la prise de mesure menée par le groupe de travail « Conception et fabrication des Agrès de cirque. » Leur force maximale mesurée était pour une « chute glissée » et a généré 3.03kN avec un artiste pesant 65kg (Loriaux, 2004). La force maximale mesurée dans ce projet est de 4.2kN, ce qui représente 5.7 fois le poids de l'artiste.
- La force maximale en trapèze dance est en accord avec les résultats du mémoire de Vogel qui avait mesuré une force maximale de 3.4kN, ce qui représente un ratio de 4.94 fois le poids du participant (Vogel, 2014). Cependant le mouvement exécuté est bien différent. Vogel a mesuré la force maximale pour un mouvement de « assis avec rebond » et non pas un mouvement avec tempo. Dans ce projet, la force maximale en trapèze danse a été effectué avec un mouvement de tempo et vaut 3.0kN, ce qui représente 4.8 fois le poids de l'artiste (Tableau 5-2 et Tableau 5-3.)

5.2 Valeur moyenne de la force maximale

La valeur moyenne de la force maximale est évaluée en effectuant la moyenne de la force maximale des différentes répétitions effectuées pour un même mouvement et un même artiste. Le but est ici de voir s'il se dégage un schéma d'apparition des forces maximales en ne se basant pas sur les cas extrême mais bien sur une valeur moyenne.

5.2.1 Valeur moyenne de la force maximale en fonction de la discipline

La valeur moyenne de la force maximale a été trouvée pour 38 mouvements et a été classé par discipline (Figure 5-1 et Figure 5-2). Chaque point représente la valeur moyenne de la force maximale pour un mouvement effectué plusieurs fois par un artiste. La valeur moyenne des forces maximales est comprise entre 1.1kN et 4.6kN (Figure 5-1) et entre 1.9 et 6.8 en poids corporel (Figure 5-2) sur l'ensemble des cinq disciplines. La valeur moyenne des forces maximales pour plusieurs mouvements est plus élevée en sangles, en rouge à la Figure 5-1, par

rapport à la plupart des autres disciplines. Un mouvement en corde lisse a aussi généré une force vraiment élevée par rapport aux trois autres disciplines que sont le trapèze danse, le tissu et le cerceau. Ce mouvement est une chute libre retenue à la cuisse. La hauteur de chute libre étant vraiment grande dans cette chute, la force générée correspondante est donc élevée. Le tissu et la corde lisse sont deux agrès rectilignes sur lesquels les artistes effectuent des types de mouvements assez semblables. Cependant le tissu se retrouve plus bas dans ce classement, grâce à son élasticité et son amortissement. Même si la valeur moyenne des forces maximales des mouvements en tissu est moins élevée que celle des autres disciplines, le poids corporel reste élevé et monte à 4.5. Les étudiants en tissu ont une masse moins élevée qu'en corde lisse et ont donc généré des forces en newton moins élevées mais quand même élevée en poids corporel. La force en effet dépend beaucoup de la masse de l'artiste. En cerceau, un seul mouvement a été considéré; il est donc difficile de savoir s'il génère plutôt des forces maximales élevées ou non au sein de cette discipline. Par contre, on voit que ce mouvement génère un poids corporel faible.

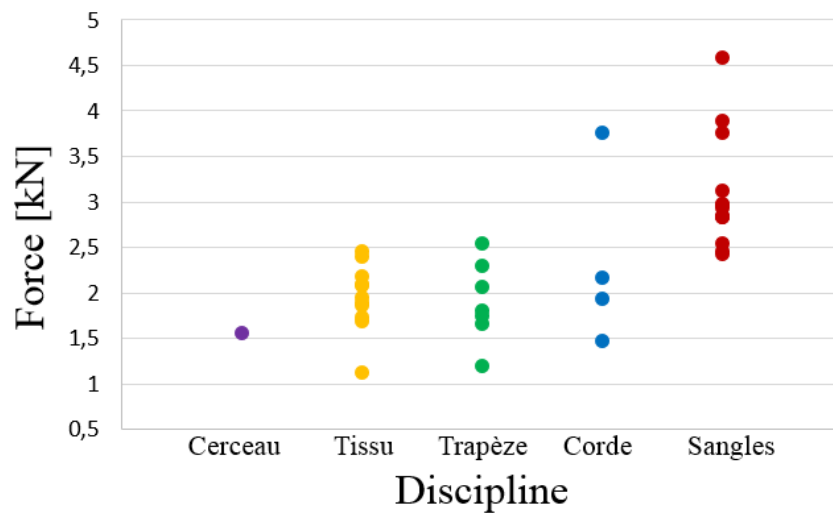


Figure 5-1 : Valeur moyenne de la force maximale en fonction de la discipline.

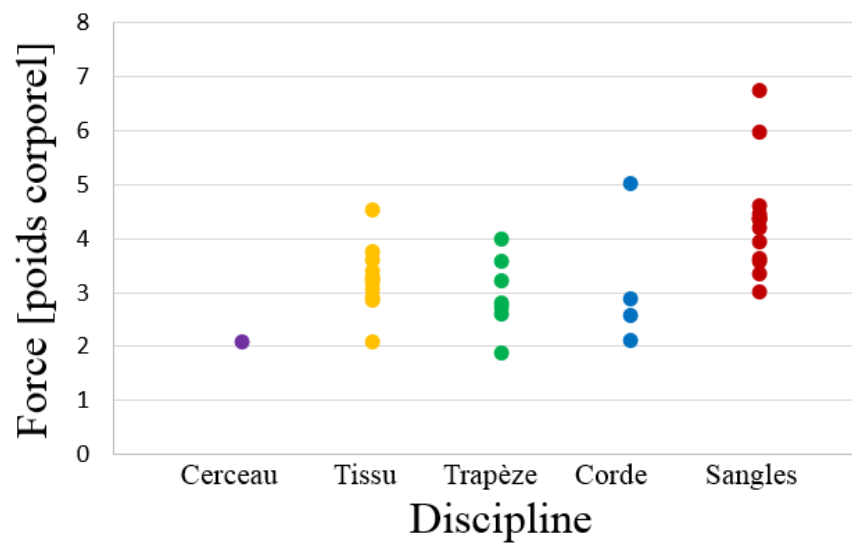


Figure 5-2 : Valeur moyenne de la force maximale en poids corporel en fonction la discipline.

5.2.2 Valeur moyenne de la force maximale en fonction du niveau scolaire

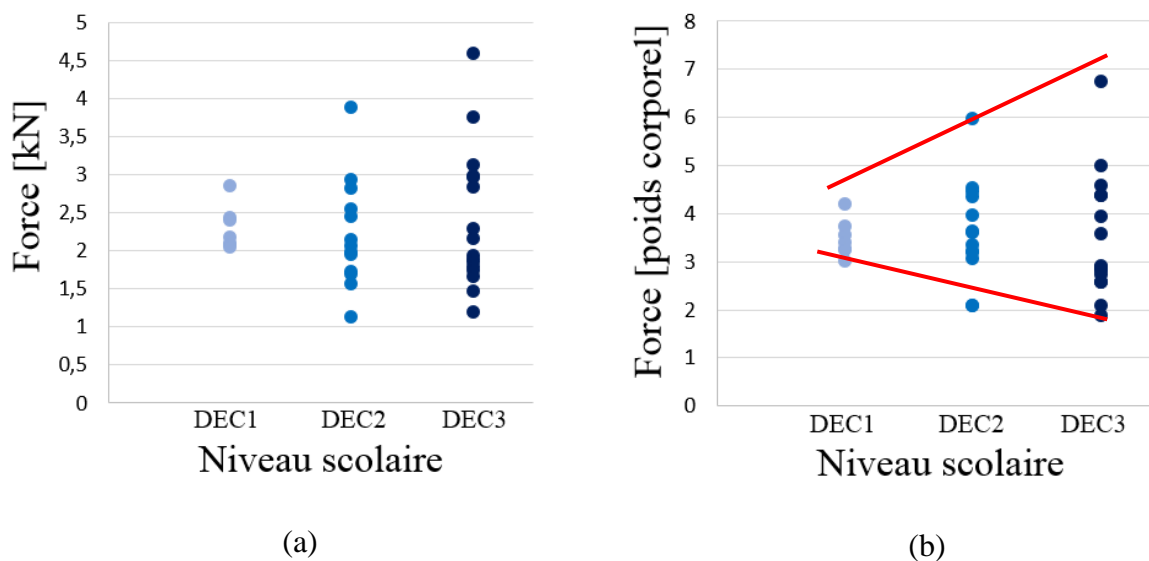


Figure 5-3 : Valeur moyenne de la force maximale en fonction du niveau scolaire avec la force exprimée en : (a) kN et (b) poids corporel.

À la Figure 5-3, l'intensité de couleur indique l'année scolaire de l'étudiant. Plus la couleur est claire, plus l'étudiant est dans ses premières années scolaires et est considéré comme proche du « débutant », même si la plupart des étudiants qui entrent à l'ÉNC ont déjà pratiqué du cirque en loisir avant. À l'inverse une couleur foncée indique que l'étudiant est dans ses derniers moments d'apprentissage et peut être considéré comme proche d'un « professionnel. » Les valeurs moyennes des forces maximales les plus élevées (supérieures à 3.5kN) ont été générées par des étudiants de 2^{ème} et 3^{ème} année. Les étudiants de 1^{ère} année ont généré des valeurs moyennes de forces entre 2 et 3kN. La plage des forces devient de plus en plus grande lorsque le niveau scolaire augmente. La valeur moyennes des forces maximales augmentent et diminuent avec le niveau scolaire (trait rouge sur la Figure 5-3). En effet, un étudiant de troisième année a un vocabulaire plus grand de mouvement. Il connaît bien plus de mouvements et des mouvements de type différent. Cela a des répercussions dans la mesure des forces maximales. Une conclusion importante pour le milieu du cirque est que le niveau de compétence d'un étudiant ou d'un artiste

n'est pas révélateur d'une force élevée. Plus l'étudiant monte dans les années scolaires, plus la force maximale générée est élevée. Cependant un étudiant débutant peut générer des forces très élevées (plus de 4 fois son poids corporel) dans des mouvements simples.

5.2.3 Valeur moyenne de la force maximale en tissu

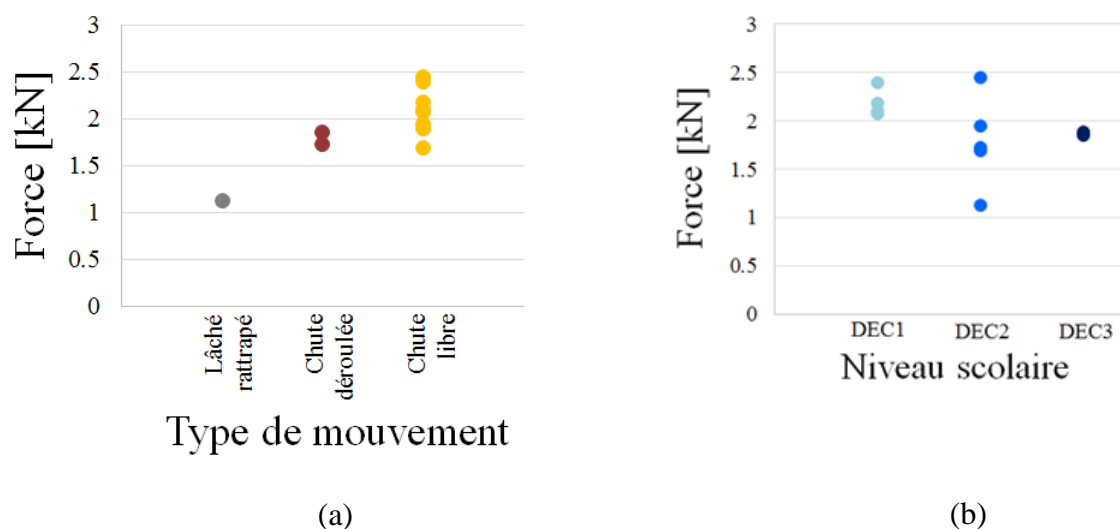


Figure 5-4 : Valeur moyenne de la force maximale en tissu en fonction du : (a) type de mouvement et (b) niveau scolaire.

Les mouvements mesurés en tissu, présenté à la Figure 5-4 (a) sont de trois types : chute libre, chute déroulée et lâché rattrapé. Les chutes directes ont une valeur des forces maximales plus élevée que les autres types de mouvements. Les étudiants de première année et de deuxième année ont généré une valeur moyenne des forces maximales plus élevée que les étudiants de troisième année (Figure 5-4 (b)). Il est difficile d'expliquer cette différence puisque les mouvements effectués sont bien différents entre l'étudiant de troisième année et ceux de deuxième et première année. Une étude plus approfondie de la hauteur de chute réelle pourrait aider à l'interprétation des résultats. La même conclusion s'applique en corde lisse (non illustré).

5.2.4 Valeur moyenne de la force maximale en trapèze danse

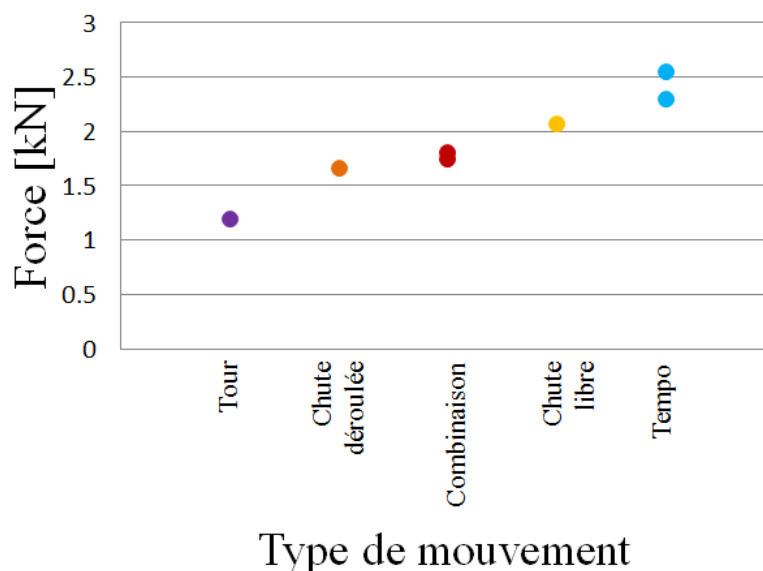


Figure 5-5 : Valeur moyenne de la force maximale en trapèze danse en fonction du type de mouvement.

Les mouvements mesurés en trapèze danse, présentés à la Figure 5-5, sont de cinq types : tempo, chute libre, combinaison de deux mouvements, chute déroulée et un tour. Les deux mouvements combinant plusieurs catégories sont une vrille en lâché rattrapé et un lâché rattrapé avec tempo. Le type de mouvement qui génère les forces les plus élevées en trapèze danse sont des mouvements avec tempo. La même conclusion s'applique au cerceau (non illustré).

5.2.5 Valeur moyenne de la force maximale en sangles

Les mouvements mesurés en sangles, présentés à la Figure 5-6, sont de quatre types : tour, combinaison de deux mouvements, tempo et chute déroulée. Le mouvement de « dislocation », par la suite appelé « disloc », est un mouvement où l'artiste attaché aux sangles aux poignets commence en position carpé et effectue un tour complet en effectuant une rotation des épaules (Figure 4-11) et fait donc partie de la catégorie tour. Le mouvement « enchainement tours » est lorsque l'artiste effectue plusieurs dislocations à la suite en gardant le corps tendu, sans passer par la position carpé. L'artiste peut aussi commencer par quelques temps avant d'avoir l'amplitude suffisante pour effectuer plusieurs tours. Le mouvement « diloc salto » consiste en un

mouvement de « disloc » puis une vrille et est donc une combinaison de deux catégories. Enfin ces trois mouvements peuvent être considérés comme un mouvement de « tempo » plus fort, dans le sens où dans un tempo, l'artiste se balance en n'excédant pas la position horizontale alors qu'un tour pourrait être considéré comme un tempo avec une amplitude tellement élevée que l'artiste finirait par faire un tour complet. Le classement des quatre mouvements présentés précédemment selon leur degré de difficulté d'exécution serait (du plus facile au plus difficile) : tempo, disloc, disloc salto, enchainement tours. Le classement des valeurs moyennes de la force maximale suit cette gradation de difficulté des mouvements : tempo < disloc < disloc salto < enchainement tours. Elle est mise en évidence par les croix pour un même participant (Figure 5-6) mais la conclusion reste la même pour les autres participants.

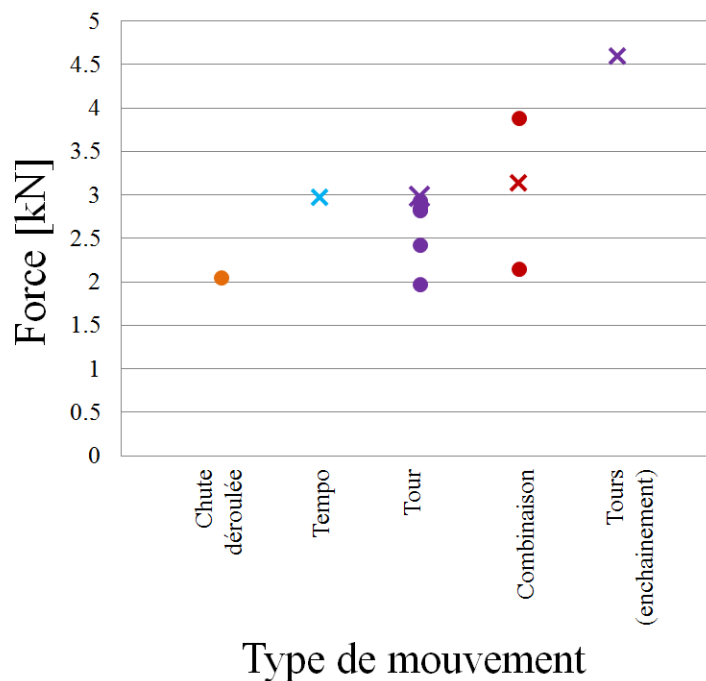


Figure 5-6 : Valeur moyenne de la force maximale en sangles en fonction du type de mouvement pour différents participants : les croix pour le participant P013 et les ronds pour les cinq autres participants.

5.2.6 Force maximale en entraînement et en spectacle

Un numéro entier, appelé enchaînement, a été mesuré trois fois en condition d'entraînement, une fois à l'ÉNC et deux fois à la Tohu, et deux fois durant le spectacle de fin d'année à la Tohu. L'étudiant, de sexe masculin, est en DEC3 et performe en corde lisse.

Dix mouvements dynamiques ont été gardés de l'enchaînement pour l'analyse des forces maximales. La force maximale a été trouvée pour chacun des mouvements (Tableau 5-4). Puis l'écart relatif des forces maximales entre deux prises de mesure a été calculé pour chacun des mouvements (Tableau 5-5). Les écarts relatifs moyens sont relativement faibles : -2.8% entre l'entraînement réalisé le 28/05/15 et le spectacle réalisé le 29/05/15, 3.5% entre l'entraînement réalisé le 04/06/15 et le spectacle réalisé le 04/06/15.

Tableau 5-4 : Forces maximales pour les dix mouvements de l'enchaînement complet effectués aux cinq prises de mesures.

Mouvement #	Force maximale en entraînement ÉNC 11/05/15	Force maximale en entraînement Tohu 28/05/15	Force maximale en spectacle Tohu 29/05/15	Force maximale en entraînement Tohu 04/06/15	Force maximale en spectacle Tohu 04/06/15
1	1474 N	1454 N	1279 N	1442 N	1326 N
2	1539 N	1534 N	1436 N	1475 N	1565 N
3	1703 N	1562 N	1474 N	1478 N	1501 N
4	1342 N	1347 N	1209 N	1307 N	1247 N
5	1712 N	1584 N	1606 N	1535 N	1660 N
6	1216 N	1176 N	1256 N	1174 N	1258 N
7	1337 N	1145 N	1188 N	1133 N	1198 N
8	1642 N	1637 N	1608 N	1644 N	1696 N
9	2397 N	2199 N	2089 N	2130 N	2249 N
10	1448 N	1206 N	1216 N	1246 N	1378 N

Tableau 5-5 : Écart relatif des forces maximales pour les dix mouvements et valeur moyenne de l'écart relatif entre spectacle 29/05/15 et entraînement 28/05/15, entre spectacle 04/06/15 et entraînement 04/06/15 et entre spectacle 29/05/15 et spectacle 04/06/15.

Mouvement #	Écart relatif entre spectacle 29/05/15 et entraînement 28/05/15	Écart relatif entre spectacle 04/06/15 et entraînement 04/06/15	Écart relatif entre spectacle 29/05/15 et spectacle 04/06/15
1	-12.0 %	-8.0 %	-3.5 %
2	-6.4 %	6.1 %	-8.2 %
3	-5.6 %	1.6 %	-1.8%
4	-10.2 %	-4.6 %	-3.0%
5	1.4 %	8.1 %	-3.3 %
6	6.8 %	7.1 %	-0.2 %
7	3.8 %	5.7 %	-0.8 %
8	-1.8 %	3.2 %	-5.2 %
9	-5.0 %	5.6 %	-7.1 %
10	0.8 %	10.6 %	-11.8%
Moyenne	-2.8 %	3.5 %	-4.6 %

Ces écarts sont relativement faibles. Une idée commune est que les artistes, sous le stress ou l'adrénaline, mettent plus d'intensité dans leurs mouvements et que donc les forces maximales sont plus élevées en spectacle qu'en entraînement. Ces valeurs présentées ici ne vont pas dans ce sens. Toutefois, plusieurs remarques peuvent être faites : l'artiste participant à cette prise de mesure a un très grand contrôle de soi et ne présentait pas de signe apparent de stress ni pendant, ni avant la représentation; les mouvements présents dans son enchaînement peu dynamiques; les mouvements présents dans la discipline de la corde lisse sont moins sujets à de la variabilité contrairement au trapèze danse, au cerceau ou aux sangles (Chapitre 6.1) ; enfin son professeur m'a indiqué que l'artiste était consciencieux en effectuant la prise de mesure et elle se demandait si l'artiste ne se mettait pas en condition de spectacle dès lors qu'une prise de mesure était effectuée.

5.3 Taux de chargement

5.3.1 Valeur moyenne du taux de chargement maximal

Les matériaux de chaque agrès de l'étude sont utilisés pour leur comportement mécanique adapté à chaque besoin. Les équipements ont été dimensionnés pour supporter les charges estimées générées par les artistes. Cependant, on peut se demander si la force générée par les artistes est plus de l'ordre d'une force de choc. Une force de choc est une force qui apparaît très rapidement avec une très grande amplitude. Elle peut être causée par un tremblement de terre, une explosion ou dans le cas du cirque une chute ou un impact. La valeur moyenne du taux de chargement maximal est évaluée en effectuant la moyenne des taux de chargement maximal des différentes répétitions effectuées pour un même mouvement et un même artiste. Le but est ici de voir s'il se dégage un schéma d'apparition des taux de chargement maximal en ne se basant pas sur une valeur moyenne. Dans ce chapitre, afin de simplifier l'écriture, la nomenclature suivante sera utilisée : le taux de chargement maximal réfèrera à la valeur moyenne du taux de chargement maximal ainsi que la force maximale réfèrera à la valeur moyenne de la force maximale. Le taux de chargement maximal présent aux Figure 5-7, Figure 5-8 et Figure 5-9 se trouve en cas de chargement, c'est-à-dire, dans la montée d'un sommet.

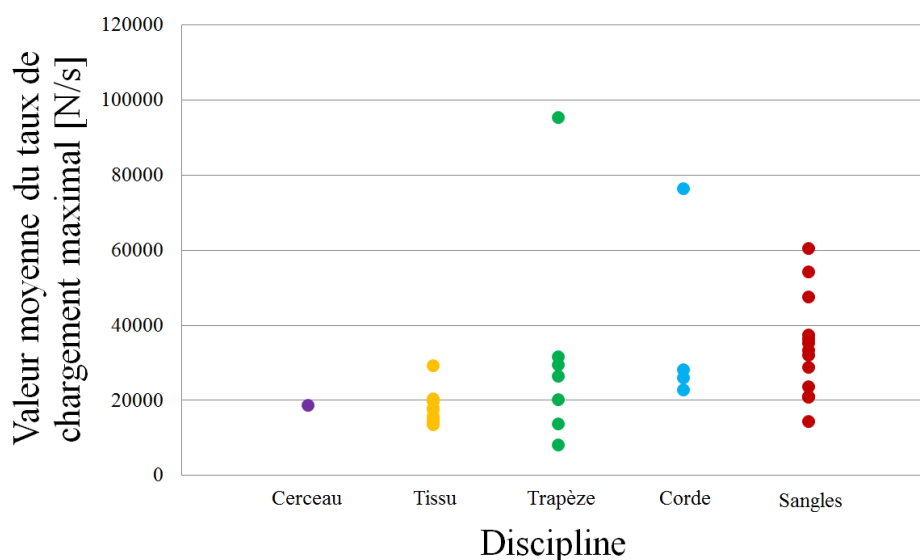


Figure 5-7 : Taux de chargement maximal en N/s par discipline.

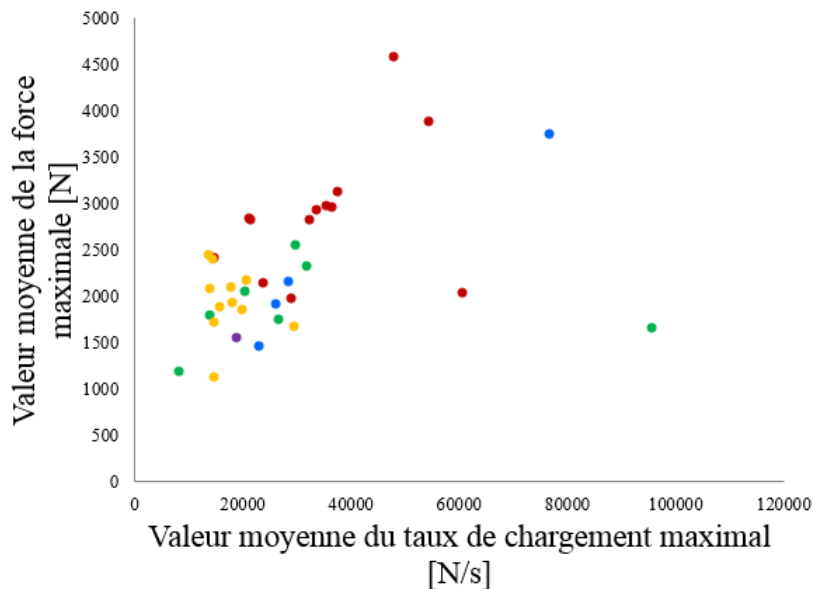


Figure 5-8 : Force maximale en fonction du taux de chargement maximale, le code couleur suit la discipline : rouge pour les sangles, vert pour le trapèze danse, bleu pour la corde lisse, jaune pour le tissu et violet pour le cerceau.

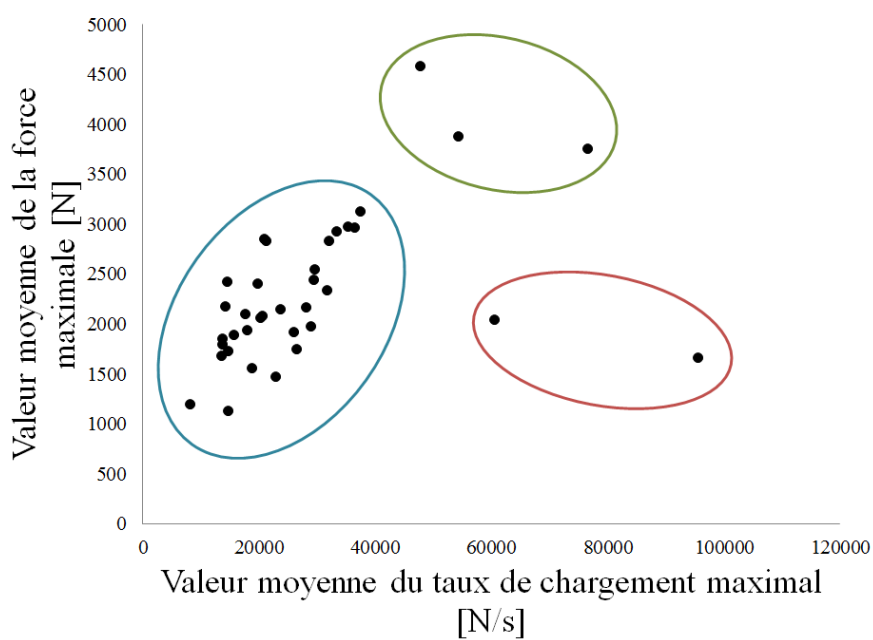


Figure 5-9 : Force maximale en fonction du taux de chargement maximale et mise en évidence de trois zones : comportement linéaire en bleu, force maximale et taux de chargement maximal très élevés en vert et taux de chargement élevée avec une force maximale peu élevée en rose.

De même que pour les forces maximales, les mouvements exécutés en sangles, à la Figure 5-7, ont un taux de chargement maximal plus élevée par rapport aux autres disciplines. De même aussi que pour les forces maximales, les mouvements exécutés en tissu, ont un taux de chargement maximal faible par rapport aux autres disciplines. Deux mouvements exécuté, l'un en trapèze danse et le second en corde lisse, se retrouvent en haut du classement. Ce sont deux chutes : celle en trapèze danse est une chute déroulée, celle en corde lisse est une chute directe. Le mouvement ayant le plus fort taux de chargement est un mouvement en trapèze danse ayant une valeur moyenne des forces maximales assez faible : 1.7kN. Le mouvement est une chute déroulée où l'artiste s'enroule autour des cordes maintenant la barre, puis se laisse tomber, ce qui fait déroulé les cordes jusqu'à ce qu'il se retienne à la barre. Il est quand même assez surprenant que ce mouvement est généré un taux de chargement aussi élevé.

Un mouvement ayant un taux de chargement élevé n'implique pas forcément une force élevée. Les mouvements peuvent être classés en trois catégories avec la valeur moyenne du taux de chargement maximal. La plupart des points sont entourés en bleu à la Figure 5-9 et présentent un comportement linéaire entre la valeur moyenne de la force maximale et celle du taux de chargement maximal. Il semble en effet naturel que plus une force est élevée, plus son taux de chargement l'est aussi. Trois mouvements entourés en vert à la Figure 5-9 admettent une force maximale et un taux de chargement maximal tous deux vraiment plus élevés que le reste des autres mouvements. Enfin la dernière catégorie comprend deux mouvements et est entouré d'un cercle rose à la Figure 5-9. Cette dernière catégorie se caractérise par un taux de chargement élevée mais une force maximale faible. Il n'existe aucun mouvement ayant un taux de chargement faible mais une force maximale élevée. Il s'agit là peut-être d'un moyen pour créer de nouveaux mouvements.

5.3.2 Vitesse de déformation du trapèze danse

Le comportement du matériau dépend du taux de chargement et de la température. Selon la valeur du taux de chargement, le matériau sera dans un des trois cas suivants : chargement quasi-statique, chargement à haute vitesse ou chargement du type barres d'Hopkinson (Split Hopkinson Pressure Bars.) Les valeurs données dans la littérature ne sont pas des taux de chargement mais des vitesses de déformation. Nous allons calculer la vitesse de déformation dans le cas du trapèze danse et comparer cette valeur à celle donnée dans la littérature. Le trapèze danse est fixé à son point d'accrochage par deux câbles d'acier galvanisé 7x19 et de diamètre 4.76mm. Le tableau à l'annexe F et la Figure 5-7 donnent un taux de chargement maximal de 95.6kN/s.

Avec le module d'Young $E = 47.5 \text{ MPa}$ et $A = \pi \times 0.00238^2 = 1.78 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, on obtient une vitesse de déformation de 57 s^{-1} avec l'équation [3].

Pour savoir quelle vitesse de déformation se trouve dans quel cas de chargement, Zhang a effectué des essais mécaniques avec une vitesse de déformation variant de 0.001 s^{-1} à 16000 s^{-1} sur des échantillons d'acier (Zhang, 2012). La courbe de la vitesse de déformation est ensuite ajustée à la courbe du modèle modifié de Johnson and Cook (Johnson & Cook, 1983). Les vitesses de déformation limites de chaque cas sont définies (Tableau 5-6).

Tableau 5-6 : Les différents cas et leur vitesse de déformation correspondante pour l'acier (Zhang, 2012).

Cas de chargement	Vitesse de déformation
Quasi statique	10^{-3} à 1100 s^{-1}
Dynamique	1100 s^{-1} à 8000 s^{-1}
SHPB	8000 s^{-1} à 16000 s^{-1}

Dans le cas du trapèze danse, la vitesse de déformation et donc le taux de chargement maximal mesuré se trouve dans le cas quasi-statique. Le taux de chargement n'est donc pas critique. La conclusion est la même pour le cerceau étant donné que son taux de chargement mesuré est bien inférieur à celui du trapèze.

5.3.3 Cas du tissu, des sangles et de la corde lisse

Étant donné que la composition chimique des matériaux ainsi que le module d'élasticité ou le pourcentage d'élongation sont inconnus pour les trois équipements restant, il est impossible de conclure si le taux de chargement maximal mesuré est critique.

CHAPITRE 6 ANALYSE DES RÉSULTATS

6.1 Résultats de la variabilité

La variabilité des signaux de forces des participants exécutant le même mouvement plusieurs fois est analysée dans ce chapitre.

6.1.1 Variabilité selon le niveau scolaire et le type de mouvement

La variabilité selon les différents niveaux scolaires et le type de mouvement est mise en avant à la Figure 6-1. Plus la valeur des erreurs quadratiques moyennes est élevée, plus la variabilité est forte. Les étudiants de première année qui pourraient être considérée plus « débutants » ont une variabilité plus faible dans le mouvement de chute libre et de tour que les étudiants de troisième année qui pourraient être considérés plus « professionnels ». Seul en chute libre, l'étudiant de première année a une variabilité plus élevée que les étudiants des autres niveaux scolaires.

La chute libre est le type de mouvement qui a la variabilité la plus faible (Figure 6-1). La plupart des erreurs quadratiques moyennes se trouvent entre 80 et 160N sauf pour deux mouvements. En effet, lors de ce mouvement, l'artiste se laisse tomber et agit « peu » sur le mouvement en tant que tel. La force générée est la réaction de l'équipement à la chute et par conséquent, la variabilité est faible. La chute déroulée a une variabilité plus forte que la chute libre, car chaque déroulement peut se faire avec un temps différent ou une amplitude différente selon comment l'artiste l'a enroulé (plus de jeu dans l'enroulement ou non par exemple), ou selon comment l'artiste réagit à chaque vrille (résistance ou non dans le mouvement, gainage plus ou moins tonique par exemple.)

Le lâché rattrapé s'apparente à une chute libre mais l'artiste a une action importante à effectuer : attraper l'agrès avec ses mains et se rattraper. Sa variabilité est faible mais pas aussi faible que la chute directe car ici la variabilité va être affecté par comment et avec quel rapidité il se rattrape ainsi que comment son corps amortit la chute. La vrille est un mouvement plus complexe et demande une action entière de l'artiste, c'est pourquoi sa variabilité est plus forte.

Il est intéressant de voir que le lâché rattrapé en vrille qui combine deux mouvements, lâché rattrapé et une vrille se retrouve dans l'intersection des deux catégories (Figure 6-1). Il est difficile d'être certain de ces résultats pour les trois catégories suivantes : vrille, lâché rattrapé et

vrille en lâché rattrapé. Chacune n'a que 3 échantillons de mesure, il est donc impossible de donner une généralité sur la variabilité de ce type de mouvement.

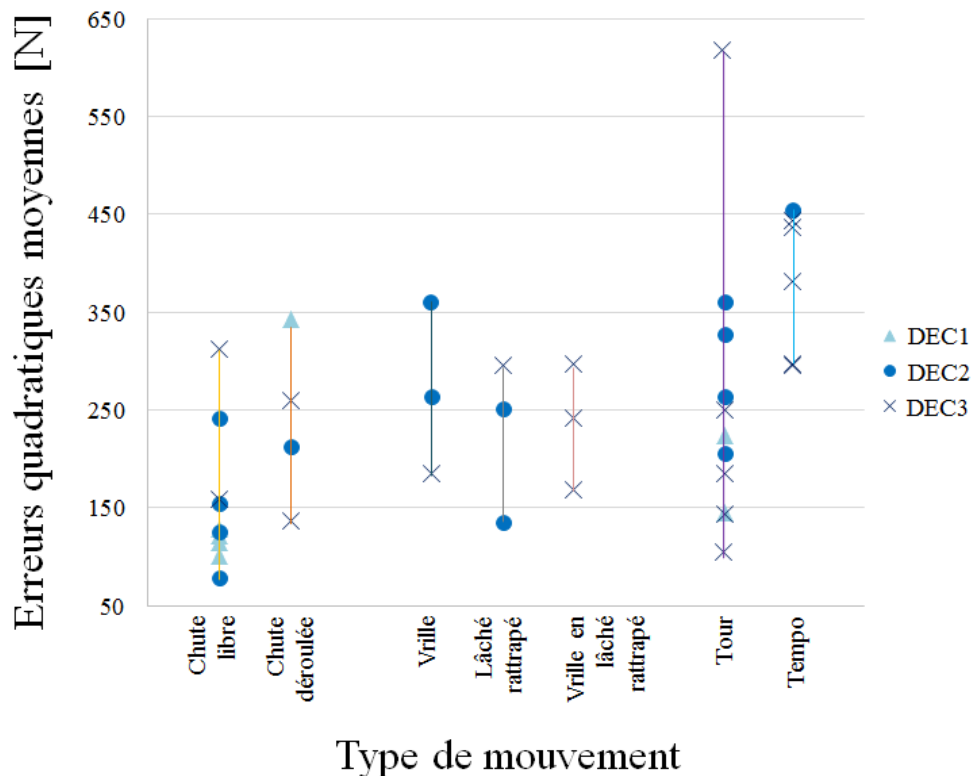








Figure 6-1 : Erreurs quadratiques moyennes en fonction du type de mouvement et du niveau scolaire des étudiants.

Le tour est le mouvement le plus complexe. Cette catégorie comprend les « disloc » en trapèze danse et sangles, les « disloc salto » ainsi que les « enchainements tours » en sangles. La variabilité peut être aussi bien faible que forte dépendamment de la discipline, de la difficulté du mouvement, ou de l'artiste qui l'effectue. Le mouvement ayant la variabilité la plus élevée est un enchainement de tours en sangles. Ce mouvement est très complexe et peu d'artistes savent le faire. La variabilité vient de la variation dans la durée ou dans l'amplitude des tours ainsi que de l'intensité mise pour remonter son corps. Les « tempo » forment la catégorie avec la plus forte variabilité du fait qu'il y ait un rythme ou une amplitude au balancement qui peut différer d'un moment à un autre. Notons que le tour, surtout dans le mouvement « enchainement

tours » peut être considéré comme une forme de « tempo ». Il n'est donc pas surprenant de retrouver ce mouvement ayant la plus forte variabilité et que la plage de la catégorie « tour » dépasse la plage de la catégorie « tempo » (Figure 6-1).

6.1.2 Résultats pour le mouvement de « disloc »

Tableau 6-1 : Classement des étudiants selon la variabilité pour le mouvement de « disloc ».

Participant	Niveau scolaire	Classement variabilité (plus faible au plus fort)		Classement par compétence
P013	DEC3	1		2
P015	DEC2	2		3
P008	DEC2	3		1
P007	DEC1	4		4
P012	DEC3	5		5
P014	DEC2	6		6

Le mouvement de « disloc » en sangles a été réalisé par 6 étudiants de l'ÉNC ayant des niveaux de compétence très différents pour ce mouvement. Les vidéos de ces mouvements ont été visionnées par un professeur de l'ÉNC, qui a ensuite établi le classement des artistes selon s'ils ont plus ou moins bien effectué ce mouvement. Indépendamment de ce classement, les artistes ont aussi été classés selon leur variabilité évaluée par la méthode des erreurs quadratiques moyennes. Les deux classements sont comparés dans le Tableau 6-1, avec l'hypothèse que les étudiants avec la plus faible variabilité seraient ceux qui exécutent le mieux le mouvement.

Le classement de la variabilité suit le classement donné par le professeur sauf pour l'étudiant P008. L'étudiant P008 est classé premier en compétence par le professeur pourtant dans le classement de la variabilité, il apparaît au troisième rang. En superposant tous les signaux de

force générés par cet artiste, une seule courbe a un tempo bien différent des autres (voir flèche, Figure 6-2 (a)). La superposition des signaux de l'artiste ayant la variabilité la plus faible est présente à la Figure 6-2 (b) à titre de comparaison. En enlevant le signal problématique de P008, son classement suit exactement celui du professeur.

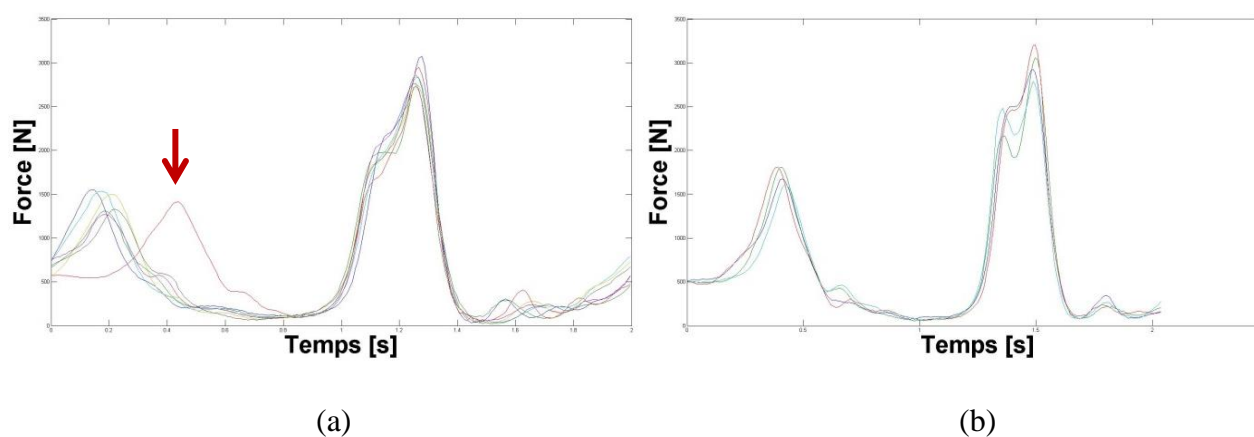


Figure 6-2 : Superposition des signaux générés dans la « disloc » pour les participants (a) P008 et (b) P013.

6.1.3 Résultats entre entraînement et spectacle

Tableau 6-2 : Valeur moyenne des erreurs quadratiques moyennes des sept mouvements pour toutes les combinaisons de signaux entre deux dates de prise de mesure.

	Entraînement 28/05/15	Spectacle 29/0515	Entraînement 04/06/15	Spectacle 04/06/15
Entraînement 11/05/15	236	279	265	244
Entraînement 28/05/15		185	202	171
Spectacle 29/0515			250	191
Entraînement 04/06/15				219

Sept mouvements d'un même enchaînement ont été pris en compte pour l'analyse de la variabilité. Les erreurs quadratiques moyennes ont été calculées pour les sept mouvements et ce pour toutes les paires de signaux. Les différents signaux à prendre en compte correspondent aux cinq prises de mesure suivantes : entraînement effectué à l'ÉNC le 11/05/15, un entraînement

effectué à la Tohu le 28/05/15, un spectacle effectué à la Tohu le 29/05/15, un entraînement effectué à la Tohu le 04/06/15 et un spectacle effectué à la Tohu le 04/06/15. Les erreurs quadratiques moyennes de tous les mouvements sont ensuite moyennées par paires de date dans le Tableau 6-2. (Par exemple, la valeur moyenne des erreurs quadratiques moyennes des sept mouvements entre l'entraînement du 11/05/15 et l'entraînement du 28/05/15 est de 236N.)

Le code couleur permet de mettre en évidence une variabilité plus forte en rouge et une variabilité plus faible en vert. Les erreurs quadratiques de tous les mouvements se trouvent la plupart entre 150 et 350N à la Figure 6-1. Même si les valeurs des erreurs quadratiques moyennes mesurées dans l'enchaînement se trouvent dans cet intervalle aussi, il est possible de les comparer entre eux. La variabilité la plus forte est pour les combinaisons avec l'entraînement réalisé le 11/05/15 à l'ÉNC. Plusieurs éléments sont à prendre en compte pour expliquer ceci : l'enchaînement réalisé le 11/05/15 est celui qui a la date la plus éloignée des autres enchaînements; l'enchaînement réalisé le 11/05/15 a été réalisé au début de son apprentissage de son enchaînement et on peut supposer que l'artiste, même s'il maîtrise chaque mouvement individuellement, a plus de difficulté à les enchaîner dans un numéro au complet; les 4 autres prises de mesure ont été effectuées à la Tohu et on peut émettre l'hypothèse que l'artiste peut agir différemment en changeant de salle et que le point d'accrochage ou le plafond réagit différemment aux forces générées par l'étudiant. La variabilité les plus faibles sont pour la combinaison des enchaînements réalisés en entraînement le 28/05/15 et en spectacle le 29/05/15 et, plus surprenant, pour la combinaison des enchaînements réalisés en entraînement le 28/05/15 et en spectacle le 04/06/15. La combinaison des enchaînements réalisés le même jour, le 04/06/15, avec deux conditions différentes, en entraînement et en spectacle, n'a pas une variabilité faible mais une variabilité moyenne. La variabilité présentée ici est en accord avec l'idée des professeurs de l'ÉNC, c'est-à-dire que plus la date du spectacle est proche ou plus l'artiste s'entraîne, plus la variabilité entre deux dates ne diminue. Notons tout de même que ces valeurs sont relativement faibles comparées avec celle mesurées au 6.1.1, ce qui était attendu puisque l'artiste a inséré dans son enchaînement des mouvements sur lesquels il s'est entraîné plusieurs mois voire plusieurs années.

6.2 Résultats des facteurs d'influence

Les facteurs d'influence sont examinés pour un mouvement réalisé en sangles, le mouvement de « disloc » présenté à la figure la Figure 4-11.

6.2.1 Valeurs moyennes des signaux générés par les six participants

La Figure 6-3 présente les valeurs moyennes des signaux générés par les six participants en sangles pour le mouvement de « disloc » (Figure 4-11).

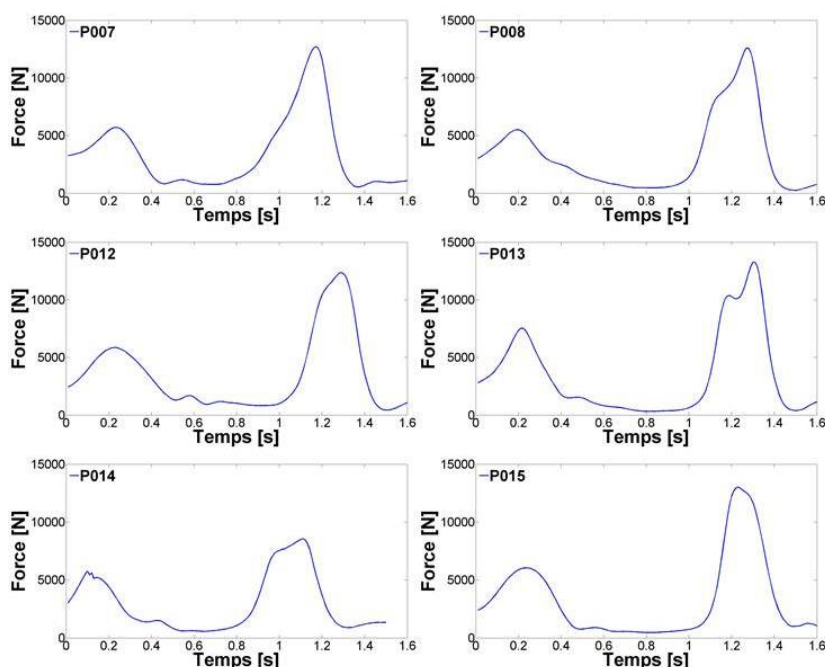


Figure 6-3 : Courbe moyenne du mouvement « disloc » réalisé par les six participants en sangles.

L'allure des courbes est semblable d'un artiste à un autre (Figure 6-3). La valeur moyenne de la force maximale est relativement la même pour tous les artistes sauf pour P014. La valeur moyenne de la force maximale du premier sommet (petit sommet) est relativement la même sauf pour P013. La durée totale du mouvement est plus courte pour P014 par rapport à toutes les autres courbes. Enfin la forme du grand sommet est différente selon les artistes : P007 a un sommet très prononcé (forme hyperbolique); P012, P014 et P015 ont un sommet plus rectangulaire et P008 et P013 ont une vague formant un double sommet. Cette différence provient sûrement du moment où chaque artiste donne une impulsion pour remonter ses jambes et son

corps. Selon la forme du grand sommet, l'hypothèse peut être émise sur le moment où l'artiste se donne de l'impulsion par rapport au moment où il passe la verticale. P007 semble donner cette impulsion juste au moment où il passe l'axe vertical, P012 et P014 semblent donner cette impulsion après être passés la verticale, P008 et P013 semblent donner cette impulsion bien après être passés la verticale, tandis que P015 semble donner cette impulsion avant de passer la vertical.

6.2.2 Diagramme Pareto

Les diagrammes Pareto tracés à la Figure 6-4 montrent l'importance des paramètres d'entrée sur chaque paramètre de sortie. La ligne rouge représente la limite à partir duquel le paramètre est considéré comme ayant une influence. Les paramètres d'entrée considérés sont la masse et le sexe de l'artiste, la longueur des sangles, la position initiale du mouvement et s'il a bien effectué le mouvement. Les paramètres de sortie sont la force maximale du grand et petit sommet, la force minimale des deux creux, la durée entre les deux sommets, l'évasement du grand sommet, le taux de chargement maximal et l'impulsion.

La masse est le paramètre qui a le plus d'influence et ce pour tous les paramètres de sortie. Le paramètre « mouvement bien effectué » est le paramètre qui a la deuxième influence la plus forte et ce pour tous les paramètres de sortie sauf deux : la force maximale du petit sommet et l'impulsion. Il est difficile de conclure sur l'influence des trois autres paramètres d'entrée que sont le sexe, la position initiale et la longueur des sangles. Selon le paramètre d'entrée, ils peuvent avoir une influence mais s'ils en ont une, elle apparaît bien plus faible que celle de la masse.

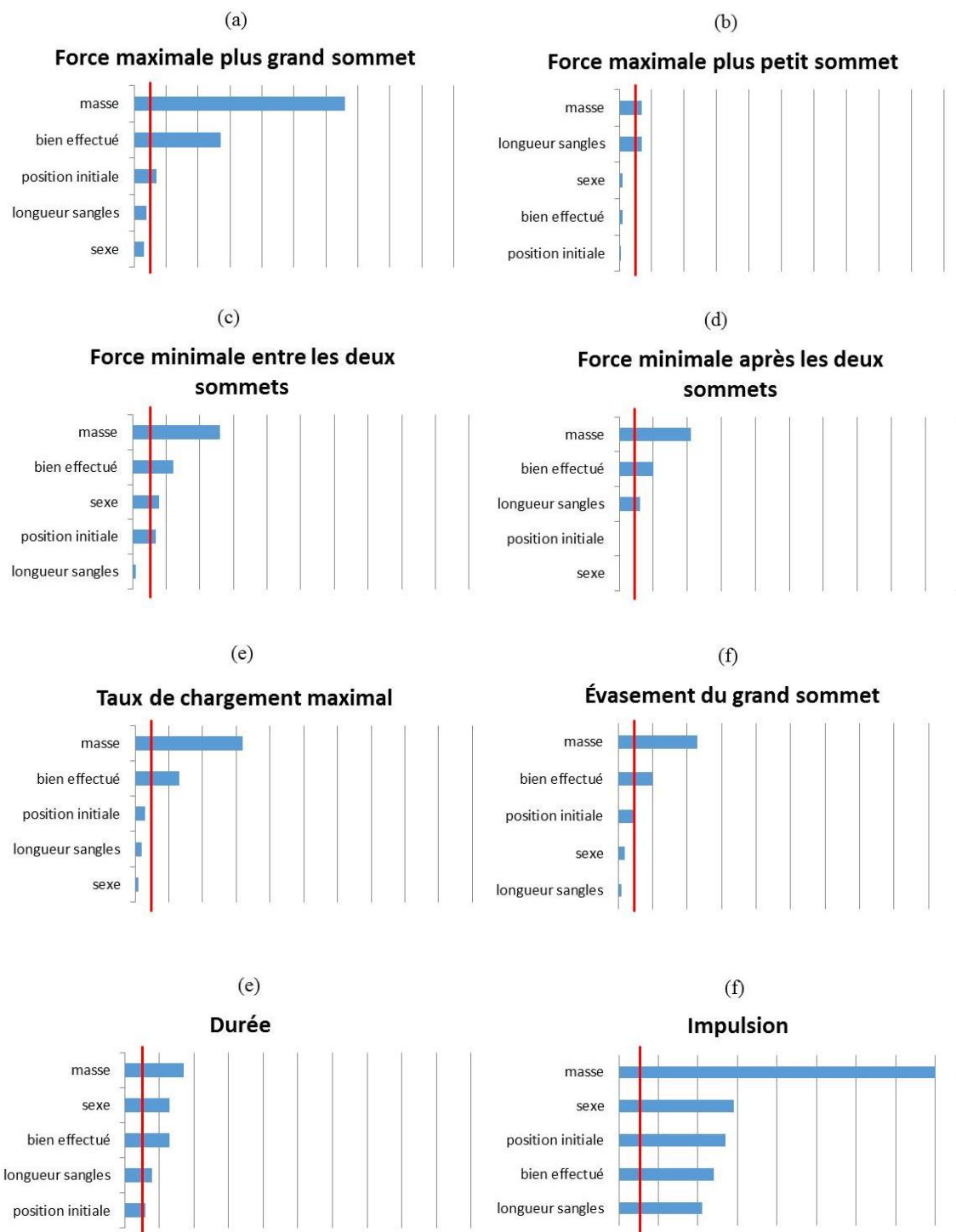


Figure 6-4 : Diagramme Pareto de l'influence des paramètres d'entrée sur : (a) force maximale du grand sommet, (b) force maximale du petit sommet, (c) force minimale entre les deux sommets, (d) force minimale après les deux sommets, (e) taux de chargement maximale, (f) évasement du grand sommet, (g) durée et (h) impulsion.

CHAPITRE 7 DISCUSSION

7.1 Pratiques sécuritaires à l'ÉNC

La force a été mesurée pour plusieurs disciplines aériennes et pour plusieurs types de mouvements dans chaque discipline. Même s'il est difficile de comparer les disciplines ou les mouvements entre eux, ces résultats offrent des données intéressantes pour le milieu cirassien.

Avec ces résultats, il est possible de nous assurer que les pratiques en accrochage et en conception soient bien sécuritaires.

L'ÉNC se fournissent chez *Barry*⁶ (Montréal, Canada) pour les sangles et la corde lisse, chez *Knitrama*⁷, (Montréal, Canada) pour le tissu et font fabriquer sur mesure le trapèze danse et le cerceau. Les forces maximales mesurées sont inférieures aux charges à la rupture des différents équipements comme le montre le Tableau 7-1.

En accrochage, les points d'accrochage de l'ÉNC ont une charge de travail limite de 15kN. La force maximale mesurée est de 5.3kN < 15kN ce qui représente un facteur de sécurité de 2.8 (Tableau 7-1).

Le facteur de sécurité en accrochage utilisé pour les autres équipements servant à l'accrochage (mousquetons, câbles...etc) est 10. Cela veut dire que les gréeurs utilisent de l'équipement servant à l'accrochage ayant une charge à la rupture dix fois plus grande que le poids statique de l'artiste et de son équipement. Or la force maximale mesurée en poids corporel est de 7.9 poids corporel < 10. Cette mesure, de plus, ne considère pas le poids de l'équipement. Il y a donc en pratique un facteur de sécurité réel (en termes d'ingénierie) de 1,2 (=10/7.9), ce qui est très faible compte tenu que la sécurité des artistes est en jeu. Le poids des sangles qui est l'équipement considéré ici dans le calcul est négligeable (2N pour le poids des sangles contre 5.3kN pour la force maximale) et n'est donc pas pris en compte dans le calcul. Il est conseillé à l'ÉNC d'observer comment les pratiques et les morphologies des artistes évoluent. Au besoin, il pourrait

⁶ <https://www.barry.ca/> [consulté le 24/08/15]

⁷ <http://www.knitrama.ca/> [consulté le 24/08/15]

s'avérer nécessaire de refaire des prises de mesure dans les prochaines années pour vérifier la validité du facteur 10 utilisé par les gréeurs dans la conception de l'accrochage.

Tableau 7-1 : Charge à la rupture et force maximale mesurée pour les cinq équipements de cirque du projet à l'ÉNC.

Discipline	Charge à la rupture		Force maximale mesurée	Ratio de la charge à la rupture de l'agrès sur la force maximale mesurée	Ratio de la charge à la rupture du point d'accrochage sur la force maximale mesurée
	Agrès	Point d'accrochage			
Sangles	37kN	15kN	5.3kN	7	2.8
Corde lisse	22kN	15kN	4.2kN	5.2	3.6
Tissu	7.7kN	15kN	2.8kN	5.5**	5.3
Trapèze danse*	19kN	15kN	3kN	6.3	5
Cerceau*	19kN	15kN	1.9kN	10	7.9

*La charge à la rupture du cerceau et du trapèze danse est celle du câble d'acier présent dans les cordes soutenant la barre de métal.

**La force à la rupture donnée pour le tissu est pour un seul pan de tissu, or il est très rare que l'artiste se rattrape sur un seul pan. Ainsi, le ratio est donné pour deux pans.

7.2 Recommandations sur les pratiques sécuritaires

Dans le cas où un particulier veut un point d'accrochage chez lui pour s'entraîner, la charge de travail limite recommandée est de 2000lbs, soit 8.9kN par Simply Circus (Santos, 2014). La force maximale mesurée lors du projet est de 5.3kN, ce qui donne un facteur de sécurité de 1.7. Lors du présent travail de recherche, la force maximale mesurée a été générée par un mouvement avancée en sangles et il est probable que peu de particuliers connaissent ce genre de mouvement.

Cependant, même si la force maximale mesurée a été réalisée par un mouvement avancé, de nombreux mouvements que des débutants peuvent effectuer génèrent aussi des forces élevées. Des débutants en tissu ou en corde lisse apprennent des chutes libres assez rapidement et c'est ce type de mouvement qui génère des forces élevées dans ces deux disciplines. De même en trapèze danse et en cerceau, des tempos peuvent être réalisés par des étudiants ayant un niveau intermédiaires. La force maximale en corde lisse pour une chute libre est de 4.2kN, ce qui donne un facteur de sécurité de 2.1 avec la charge à la rupture de 8.9kN. Sur la base de ces observations, un facteur de sécurité de 4 par rapport à la force maximale mesurée est recommandé en accrochage, soit une charge de rupture de 22kN ou de 5000lbs. Cette recommandation est valable non seulement pour le point d'accrochage, mais aussi pour tous les équipements et structures qui soutiennent l'équipement de cirque. En cas de doute, il est conseillé de faire un essai pour mesurer les charges générées avec un dynamomètre et ainsi de vérifier que les charges générées sont bien en dessous de la charge de rupture. Si vraiment les conditions ne semblent pas sécuritaires, par exemple l'élément le plus faible dans l'accrochage semble usé ou mal adapté, il est conseillé d'éviter tout risque et d'annuler l'accrochage de l'équipement ou la performance. Le but n'est pas de contraindre les professionnels mais bien de réduire les risques de blessure.

De même en conception des équipements circassiens, un facteur de sécurité de 4 par rapport aux charges maximales mesurées est recommandé, et ce, pour les cinq équipements de l'étude. Cela donne une charge de rupture de 22kN pour les sangles, 17kN pour la corde lisse, 12kN pour le tissu, le trapèze danse et le cerceau.

Notons qu'il est préconisé de ne pas différencier un équipement destiné à des débutants ou à des professionnels car, rappelons-le, des débutants peuvent générer des forces élevées dans certains types de mouvements. Enfin, les recommandations précédentes peuvent être utilisées aussi pour un usage destiné à des enfants. En effet, même si le comité d'éthique à la recherche avec des êtres humains de l'École Polytechnique ne peut pas délivrer de certification pour des mineurs, les recommandations, quoique conservatrices pour des enfants, restent tout de même valables. En effet, la masse moyenne entre 1999 et 2002 pour un homme aux États-Unis entre 20 et 29ans est de 87kg et celle pour une femme entre 20 et 29ans est de 75kg (Ogden *et al.*, 2004). Dans la même période, celle d'un enfant, fille et garçon, entre 6 et 11ans est de 34kg, celle d'un garçon entre 11 et 17ans est de 64kg et celle d'une fille entre 11 et 17 ans est de 59kg. Les étudiants de l'ÉNC ont des masses bien inférieures à ces moyennes mais cela montre l'écart de masse entre un

enfant et un adulte. Enfin dans le cas d'un artiste qui a une masse beaucoup plus importante que celle dans cette étude, il est difficile de prédire exactement la force qu'il va générer. Il est sûr que la force sera plus grande puisqu'elle dépend beaucoup de la masse (chapitre 7.4) mais il est difficile de dire si le ratio de la force maximale sur le poids de la personne est le même que trouvé dans cette étude. D'autres mesures avec des masses très différentes ou une modélisation ou la valeur de la masse pourrait être modifiée permettraient de vérifier cette idée. Un élément important n'a pas été pris en compte dans l'étude : la fatigue des équipements. En effet, un équipement soumis à des charges répétées voit ses propriétés locales modifiées. Il est recommandé à tout utilisateur ou toute personne responsable de la sécurité d'inspecter régulièrement les équipements et en cas de doute, il ne faut pas hésiter à remplacer les équipements. Enfin, toutes personnes susceptibles d'acheter des agrès de cirque ou de l'équipement servant à l'accrochage, doivent bien faire attention aux caractéristiques données par le fournisseur. Il ne faut non plus hésiter à leur demander plus d'informations quant aux procédures de fabrication ou de test.

7.3 Discussion sur les résultats de la variabilité

Contrairement à ce qui était attendu, les étudiants de première année scolaire ont une variabilité plus faible sur l'ensemble des mouvements mesurés (Figure 6-1). Les étudiants de première année ont exécuté beaucoup de chutes libres et seuls trois échantillons se retrouvent dans les autres types de mouvements. Or la chute libre est un mouvement où il est difficile d'avoir une forte variabilité du fait de peu « d'action » de l'artiste. À l'inverse, les mouvements de tempo et les mouvements de tour pouvant avoir une forte variabilité ont été effectués pour la plupart par des étudiants de deuxième et troisième année scolaire. La variabilité ne dépend donc pas seulement du niveau scolaire mais aussi du type de mouvement effectué. Pour un mouvement où l'artiste a plus d'action à réaliser comme celui de la « disloc » en sangles, les résultats de variabilité respectent le niveau de compétence évalué par les professeurs (chapitre 6.1.2).

Un point important n'a, de plus, pas été pris en compte : l'influence de l'apprentissage sur la variabilité. En effet, la campagne de mesure a été menée sur trois mois où les participants effectuaient leurs mouvements une fois par semaine. Or durant ces trois mois, le participant,

étudiant à l'ÉNC, continue de progresser et ce, même sur les mouvements pris en compte dans l'étude.

Une question à laquelle le projet visait à répondre était : quelle est la variabilité entre un débutant et un professionnel qui maîtrise le mouvement? La définition de débutant et de professionnel est difficile à éclaircir dans ce cas-ci. Les étudiants de première année ne sont pas complètement débutant mais sont loin d'être des professionnels encore. De même, les étudiants de troisième année ne peuvent pas être considérés comme des professionnels à part entière même s'ils le deviennent quelques mois plus tard. Tous les participants de l'étude sont en réalité en formation plus que des débutants ou des professionnels.

7.4 Discussion sur les paramètres d'influence

Il n'est pas étonnant que les paramètres, « masse » et « mouvement bien effectué », sont les deux paramètres qui ont le plus d'influence sur les paramètres de sortie sélectionnés sur la courbe de la force générée. En effet, la masse de l'artiste et la force générée sont très liées. De même, un mouvement qui est plus ou moins bien réussi va forcément voir l'allure de sa force modifiée. Un artiste a par exemple lancé ses jambes trop haut ou trop bas (2^{ème} image de la Figure 4-11) et donc la durée du mouvement va en être affectée ainsi que les forces maximales. Si l'artiste a lancé ses jambes trop haut, le corps de l'artiste va avoir un effet de lourdeur et va comme « tomber », ce qui visuellement n'est pas souhaitable mais cela peut générer une force maximale plus élevée, étant donné que la hauteur de chute est plus grande. Enfin si l'artiste lance ses jambes à une hauteur trop basse, cela est dangereux. Il doit alors se dépêcher de tourner ses épaules pour pouvoir effectuer le mouvement (c'est de là que vient le nom du mouvement « dislocation », car cela peut entraîner la dislocation de l'épaule). Cela veut aussi dire que la durée entre les deux sommets est plus petite et que la force maximale est moins grande. Il serait intéressant de vérifier si la masse et le mouvement bien effectué sont aussi les facteurs le plus influant pour d'autres types de mouvements et d'autres disciplines.

Un autre point intéressant à analyser serait l'influence du centre de masse du corps humain et de la force musculaire, cela pourrait peut-être expliquer pourquoi le sexe a une influence sur la durée du mouvement. Notons que deux paramètres pouvant avoir une grande influence sur la force

générée n'ont pas été pris en compte : la réaction du point d'accrochage et l'intensité mis par l'artiste. Pour compléter l'analyse, il faudrait caractériser la réaction du point d'accrochage et de tous les équipements servant à l'accrochage. Il serait sûrement possible de la modéliser par un système ressort-amortisseur. Il faudrait, par exemple, effectuer des mesures comme la différence de position du point d'accrochage sans rien et avec une masse suspendue. Il faudrait ainsi caractériser tous les points d'accrochage de l'ÉNC et vérifier s'il existe une grande différence entre chacun des points.

CHAPITRE 8 CONCLUSION

Synthèse des travaux

Le but de l'étude était de mesurer les efforts dynamiques générés par les artistes de cirque dans cinq disciplines aériennes : la corde lisse, le cerceau, le tissu, le trapèze danse et les sangles. Le banc d'essai a été développé au sein de l'ÉNC et permet de mesurer la force de tension au point d'accrochage des agrès aériens.

Les équipements plus rigides, les sangles, la corde lisse et le trapèze danse, ont naturellement généré des forces plus élevées contrairement au tissu qui est élastique. Les sangles sont l'équipement qui a généré les forces maximales les plus élevées. La force maximale mesurée en sangles représente pratiquement 8 fois le poids de l'artiste. Il n'y a pas de lien évident entre le niveau scolaire et les forces maximales élevées. Les forces élevées dépendent plus du type de mouvement. En corde lisse et en tissu, les forces maximales élevées sont générées pour des chutes libres. En sangle, en trapèze danse et en cerceau, ce sont des mouvements comportant des tempos ou des tours (pouvant être considérés comme des tempos avec une plus grande amplitude.) La différence n'est pas significative entre les forces générées entre entraînement et spectacle dans la prise de mesure réalisée lors du projet.

Les pratiques sécuritaires de l'ÉNC ont été validées que ce soit en accrochage ou en conception. Je recommande toutefois :

- à l'équipe technique de l'ÉNC de faire des mesures avec le banc d'essai développé à cet effet en cas de doute. Si la masse des artistes ainsi que les mouvements effectués ont tendance à évoluer, la force générée pourrait augmenter et approcher de la limite en accrochage.
- à toute personne, que ce soit pour un usage récréatif ou professionnel, de vérifier les charges de rupture du point d'accrochage, de tous les éléments servant à l'accrochage et de l'agrès de cirque. La charge de rupture du point d'accrochage ainsi que de tous les équipements servant à l'accrochage doit être supérieure à 22kN. Si les conditions ne semblent pas sécuritaires, je conseille d'éviter tout risque et d'annuler l'accrochage de l'équipement ou la performance. Le but est d'éviter tout risque de blessure.

La variabilité des artistes a été analysée avec la méthode des erreurs quadratiques moyennes. La variabilité est d'abord inhérente à certains types de mouvement selon si l'artiste a une action à réaliser ou non. Un mouvement a été analysé en particulier, « dislocation » en sangles a été effectué par six artistes. La variabilité de chaque étudiant reflète bien le niveau de compétence donné par un professeur de l'ÉNC. Il est difficile de répondre entièrement à la question sur la différence de variabilité entre débutants et professionnels. Aucun des étudiants ne peut être considéré débutant ou professionnel.

Enfin le mouvement est la « discloc » en sangles a été analysé pour connaître les facteurs qui influencent la force générée. Les facteurs les plus influant sont la masse de l'artiste et si le mouvement a bien été effectué. La masse et la force sont naturellement très liées. Et un mouvement qui est plus ou moins bien réussi va forcément voir l'allure de sa force modifiée.

A ce jour, les seules mesures effectuées sur des agrès de cirque ont été réalisées sur le trapèze volant et son filet (Hors-les-murs, 2002), la corde lisse (Loriaux, 2004), le trapèze ballant (Loriaux, 2004), la corde volante (Loriaux, 2004), le cadre aérien (Loriaux, 2004), le fil tendu (Loriaux, 2004), les longes du trapèze ballant (Loriaux, 2008) et le trapèze danse (Vogel, 2014). Le projet présenté dans ce mémoire apporte des données sur des autres disciplines et ceci pour un large panel de situations (sexe, discipline, type de mouvement, niveau scolaire, spectacle.) De nouvelles méthodologie ont de plus été développée afin d'étudier la variabilité des artistes et les facteurs d'influence de la force. Les pratiques du cirque sont en constante évolution et des mouvements nouveaux sont chaque année créés. Le lien a été fait entre les forces maximales et les différentes situations afin de recommander des pratiques sécuritaires en accrochage et en conception.

Perspectives

Les propriétés mécaniques des équipements de cirque étudiées dans ce projet sont inconnues. Des essais mécaniques avec des échantillons de chacun permettraient de les mettre en évidence. Par la suite, il serait alors plus simple de modéliser certains mouvements ou certains types de mouvements pour avoir plus de compréhension sur les forces générées. Des équipements de cirque, comme les sangles ou le tissu, sont de plus vendus avec l'annotation « dynamique » ou « statique ». Cela quantifie le degré d'élasticité de l'équipement. Certains artistes préfèrent des

équipements plus rigides ou plus élastiques. Le projet n'a pas pris en compte cette distinction. L'ÉNC met à disposition des tissus dits « élastiques » et des sangles dites « rigides » aux étudiants. D'autres mesures pourraient mettre en évidence les différences de forces générées pour les deux types d'équipement.

Le point d'accrochage et l'équipement servant à l'accrochage ont certainement une influence sur la force en tension mesurée entre l'agrès de cirque et le plafond. De même, des tests permettraient de mettre en évidence les différences entre les différents points d'accrochage de l'ÉNC voire dans d'autres salles de spectacles. Les artistes ressentent cette différence lorsqu'ils passent d'une salle à une autre. Des mesures permettraient de quantifier cette différence et peut-être donner les paramètres optimaux pour que l'artiste ait une meilleure performance ou un accrochage sécuritaire.

La progression d'apprentissage n'a pas été considérée dans le projet. Or les étudiants s'entraînent et s'améliorent tous les jours et ce, pendant trois ans. Les forces générées pourraient être reliées avec la progression d'apprentissage. Un autre point auquel le projet n'a pas pu donner de réponse mais qui suscite beaucoup de questions dans le milieu circassien est la différence des forces générées entre un mouvement contrôlé et un mouvement manqué ou une chute (non volontaire.)

Enfin, l'artiste n'a pas spécialement été pris en compte à part son niveau scolaire, sa masse ou son sexe. Or la morphologie du corps humain ou la biomécanique du mouvement humain a un lien évident avec la force générée dans la structure. Des mesures prenant en considération la morphologie du corps humains comme la taille ou la masse de ses différents segments ou son centre de masse pourraient être analysées afin de mieux comprendre les forces générées. Enfin la dynamique du mouvement humain pourrait être enregistrée avec des caméras à haute vitesse et les données récoltées pourraient être analysées afin de comprendre les forces ou les accélérations du corps humains et faire le lien avec les forces générées dans la structure.

Le projet s'est concentré particulièrement sur cinq disciplines aériennes accrochées en un point d'accrochage. Le milieu de cirque a plusieurs autres disciplines dans lesquelles aucune mesure n'a été effectuée : le mât chinois, la barre russe, la planche coréenne, le trapèze fixe, la roue allemande, la roue simple etc. De plus, même si des mesures ont déjà été effectuées, une analyse plus approfondie pourrait être réalisée dans les disciplines ou équipements suivants : le trapèze ballant, la trampoline, le fil de fer, les longues etc.

RÉFÉRENCES

- Agence canadienne de normalisation. (1979). *Dispositifs antichutes, descendeurs et cordes d'assurance*. Norme CAN/CSA Z259.2-M1979. Mississauga, Ontario.
- Agence canadienne de normalisation. (1990). *Harnais de sécurité*. Norme CAN/CSA Z259.10-M90. Mississauga, Ontario.
- Agnesina, G., Talbi, N., Taïar, R., Mostefaoui M., & Perugia, A. D. (2007). Analyse biomécanique chez l'artiste de cirque pour l'activité du cadre aérien. *18^{ème} Congrès Français de Mécanique*.
- Albrecht, E. (2002). Le nouveau cirque américain. *L'Annuaire théâtral*, 32, 37-46.
- Ambroziak, A., & Klosowski, P. (2013). Mechanical properties of polyvinyl chloride-coated fabric under cyclic tests. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 1-10.
- Arampatzis, A., & Brüggemann, G.-P. (1999). Mechanical energetic processes during the giant swing exercise before dismounts and flight elements on the high bar and uneven parallel bars. *Journal of Biomechanics*, 32, 811-820.
- Arrêté du 18 décembre 1992 relatif aux coefficients d'épreuve et aux coefficients d'utilisation applicables aux machines, accessoires de levage et autres équipements de travail soumis à l'article L. 233-5 du code du travail pour la prévention des risques liés aux opérations de levage.
- Arteau, J., & Lan, A. (1991). *Protection contre les chutes de hauteur – Conception de câbles de secours horizontaux* (Études et recherches / Guide technique T-18). Montréal, QC, Canada: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). Disponible : <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/T-18.pdf>. [Consulté le 14 mai 2015].
- Association HorslesMurs (2003). *Mémento de la conception et de la fabrication des agrès de cirque*. AERISC. Disponible : http://www.aerisc.fr/FR/AERISC_ressources_mementos.html. [Consulté le 11 novembre 2014].
- Bedogni, V., & Manes, A. (2011). A constitutive equation for the behaviour of a mountaineering rope under stretching during climber's fall. *Procedia Engineering*, 10, 3353-3358.

- Chapouthier, A., Ganem, Y., Grusenmeyer, C., Laborde, L., Larcher, C. & Zana, J. P. (2009). Prévention dans les arts du spectacle. *INRS - Hygiène et sécurité du travail*, 215, 35- 46.
- Comité européen de normalisation. (2012). *Équipement d'alpinisme et d'escalade - Cordes dynamiques – Exigences de sécurité et méthodes d'essai*. Norme CEN: EN 892:2012. Bruxelles, Belgique.
- Demey, S. & Wellington, J. (2010). *Théorie, conseils et bonnes pratiques pour l'entraînement : Manuel Pédagogique*. Bruxelles, Belgique : FEDEC.
- Donovan, H. (2008). *Entertainment Rigging : A Practical Guide for Riggers, Designers and Managers*, Seattle, États-Unis : Rigging Seminars.
- Drouin, G, Gou, M., Thiry, P., & Vinet, R. (1988). *Éléments de machines* (2^{ème} éd.) Montréal, Canada : Presses internationales Polytechnique.
- Ernst, B., & Vogel, W. (2009). Determination of the redistribution shock load in climbing double rope systems. *Engineering Failure Analysis*, 16, 751-764.
- FEDEC, (2007). *Manuel d'instruction de base pour les arts du cirque*. Bruxelles, Belgique : FEDEC.
- Ferrari, A., Cutti, A. G. & Cappello, A. (2010). A new formulation of the coefficient of multiple correlation to assess the similarity of waveforms measured synchronously by different motion analysis protocols. *Gait & Posture*, 31, 540-542.
- Ganem, Y., Larcher, C., Chapouthier, A., Laborde, L., Zana, J.P.,... Grusenmeyer, C. (2009). Dossier medico-technique: Arts du spectacle et risques professionnels. *INRS - Documents pour le Médecin du Travail*, 121, 421-436.
- Glerum, J. O. (2007). *Stage Rigging Handbook* (3^{ème} éd.). Carbondale, États-Unis: Southern Illinois University Press.
- Gupta, T. C. (2007). Identification and experimental validation of damping ratios of different human body segments through anthropometric vibratory model in standing posture. *Journal of Biomechanical Engineering*, 129.
- Harvie, J. & Hurley, E. (1999). States of Play: Locating Quebec in the Performances of Robert Lepage, Ex Machina, and the Cirque du Soleil, *Theatre Journal*, 51(3), 229-315.

- Hendrickson, A. & Buckhurst, C. (2008). *Mechanical design for the stage*, Boston, États-Unis: Elsevier : Focal Press.
- Hiley, M. J., Zuevsky, V. V., & Yeadon, M. R. (2013). Is skilled technique characterized by high or low variability? An analysis of high bar giant circles. *Human Movement Science*, 32, 171-180.
- Hiley, M. J., Apostolidis, A., & Yeadon, M. R. (2011). Loads on gymnastics safety support system during maximal use. *Proc. IMechE Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 225(1), 1-7.
- Higgs, C. (2008). *An Introduction to Rigging in the Entertainment Industry* (2^{ème} éd.). Cambridge, Angleterre: Entertainment Technology Press Ltd.
- Jaques, H. P. (2008). *Determining and modelling the forces exerted by a trampoline suspension system*. (M.Phil. Thesis, Loughborough University, Royaume-Uni).
- Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1983). A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceeding of the Seventh International Symposium on Ballistics*, 541-547.
- Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H. K., Wootten, M. E., Gainey, J., Gorton, G. & Cochran, G. V. B. (1989). Repeatability of Kinematic, Kinetic, and Electromyographic Data in Normal Adult Gait. *Journal of Orthopaedic Research*, 7, 849-860.
- Kerwin, D. G., & Hiley, M. J. (2003). Estimation of reaction forces in high bar swinging. *Sports Engineering*, 6, 21-30.
- Ledoux, É., Cloutier, E., Ouellet, F., Gagnon, I., Thuilier, C. & Ross, J. (2008). *Les risques du métier dans le domaine des arts de la scène : Une étude exploratoire* (Rapport R-555). Montréal, QC, Canada : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). Disponible : <http://www.irsst.qc.ca/-publication-irsst-les-risques-du-metier-dans-le-domaine-des-arts-de-la-scene-une-etude-exploratoire-r-555.html>. [Consulté le 11 novembre 2014].
- Leroux, P. (2009). Le Québec à Las Vegas : pérégrinations postidentitaires dans l'hyper-Amérique, *L'Annuaire théâtral : revue québécoise d'études théâtrales*, 45, 9-20.

- Loriaux, T. (2002). *Mesures dynamiques des agrès de cirque : trapèze volant et filet*. Paris, France : Association Hors les murs. Disponible : http://www.aerisc.fr/FR/AERISC_ressources_agres.html. [Consulté le 11 novembre 2014].
- Loriaux, T. (2004). *Mesures dynamiques des agrès de cirque : cadre aérien*. Bruxelles, Belgique : Association AERISC. Disponible : http://www.aerisc.fr/FR/AERISC_ressources_agres.html. [Consulté le 11 novembre 2014].
- Loriaux, T. (2004). *Mesures dynamiques des agrès de cirque : corde lisse*. Bruxelles, Belgique : Association AERISC. Disponible : http://www.aerisc.fr/FR/AERISC_ressources_agres.html. [Consulté le 11 novembre 2014].
- Loriaux, T. (2004). *Mesures dynamiques des agrès de cirque : corde volante*. Bruxelles, Belgique : Association AERISC. Disponible : http://www.aerisc.fr/FR/AERISC_ressources_agres.html. [Consulté le 11 novembre 2014].
- Loriaux, T. (2004). *Mesures dynamiques des agrès de cirque : fil tendu*. Bruxelles, Belgique : Association AERISC. Disponible : http://www.aerisc.fr/FR/AERISC_ressources_agres.html. [Consulté le 11 novembre 2014].
- Loriaux, T. (2004). *Mesures dynamiques des agrès de cirque : trapèze ballant*. Bruxelles, Belgique : Association AERISC. Disponible : http://www.aerisc.fr/FR/AERISC_ressources_agres.html. [Consulté le 11 novembre 2014].
- Loriaux, T. (2008). *Mesures dynamiques des agrès de cirque : autolonges de trapèze ballant*. Bruxelles, Belgique : Association AERISC. Disponible : http://www.aerisc.fr/FR/AERISC_ressources_agres.html. [Consulté le 11 novembre 2014].
- Low, K. S., Win, W. N. N., & Er, M. J. (2005). *Wireless sensor networks for industrial environments*. Communication présentée à Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, et International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, Vienne, Autriche (p. 271-276). Tiré de IEEE Xplore, <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1631480&tag=1>. [Consulté le 08 juillet 2015]

- McCauley, C. J., & Oberg, E. (2012). *Machinery's handbook: a reference book for the mechanical engineer, designer, manufacturing engineer, draftsman, toolmaker, and machinist* (29^{ème} éd.). New York, États-Unis : Industrial Press.
- Ministère de la Culture – Cramif – Conseil Supérieur de la scénographie, (1999). *Mémento de la Sécurité dans le Spectacle Vivant*. AERISC. Disponible : http://www.aerisc.fr/FR/AERISC_ressources_mementos.html. [Consulté le 11 novembre 2014].
- Narcisse S.-L. (2015). *Analyse de la variabilité de mouvements acrobatiques chez des artistes de cirque* (Rapport MEC3900-Projet intégrateur III STO-Stage en génie mécanique). Montréal, Canada : École Polytechnique.
- Nikooyan, A. A., & Zadpoo, A. A. (2015). Mass-spring-damper modelling of the human body to study running and hopping – an overview. *Journal of Engineering in Medicine*, 225.
- Ogden, C. L., Fryar, C. D., Carroll, M. D., & Flegal, K. M. (2004). Mean Body Weight, Height, and Body Mass Index United States 1960-2002. *Advanced Data*, 347, 1-17.
- Qi, C. Z., Wang, M. Y., & Qian, Q. H. (2009). Strain-rate effects on the strength and fragmentation size of rocks. *International Journal of Impact Engineering*, 36, 1355-1364.
- Queen, R. M., Gross, T. M. & Liu, H. Y. (2006). Repeatability of lower extremity kinetics and kinematics for standardized and self-selected running speeds. *Gait & Posture*, 23, 282-287.
- Rothbart, H. A., & Brown, T. H. (2006). *Mechanical design handbook: measurement, analysis, and control of dynamic systems* (2^{nde} éd.). New York; Toronto, Canada: McGraw-Hill.
- Santos, S. (2014). *Introduction to Rigging: Aerialist Essentials*. Los Angeles, États-Unis: Simply Circus.
- Shrier, I. (2009). Injury Patterns and Injury Rates in the Circus Arts: An Analysis of 5 Years of Data From Cirque du Soleil. *The American Journal of Sports Medicine*, 37(6), 1143-1149.
- Talbi, N., Agnesina, G., Taïar, R., & Perugia, A. D. (2007). Étude des contraintes dynamiques et l'interaction homme-cadre aérien chez les artistes du cirque. 18^{ème} Congrès Français de Mécanique.

- Union Internationale des Associations d'Alpinisme. (2013). *Dynamic Ropes*. Norme UIAA 101:2013. Bern, Suisse: Union Internationale des Associations d'Alpinisme.
- Vogel, E. J. (2014). *Measuring the forces involved in single point aerial dance trapeze*. (Mémoire de maîtrise, Université de Wisconsin-Madison, Madison, États-Unis).
- Vogwell, J., & Minguez, J. M. (2007). The safety of rock climbing protection devices under falling loads. *Engineering Failure Analysis, 14*, 1114-1123.
- Voisembert, N. (2004). Suivi médical et prévention : du mouvement dans le monde du cirque. *Travail et sécurité, 640*, 2-8.
- Zhang, H., Suo, T., & Li, Y. L. (2012). Mechanical behavior of a stainless steel material at elevated temperatures and high strain rates. *Journal of Aeronautical Materials, 32*, 78-83.
- Zhou, Z., & Griffin, M. J. (2014). Response of the seated human body to whole-body vertical vibration: biodynamic responses to sinusoidal and random vibration. *Ergonomics, 57*(5), 693-713.

ANNEXE A – CALCUL DE LA FORCE DE CHOC

Si on considère une force constante F_0 , la conservation de l'énergie mécanique d'un objet de masse m qui chute avec une distance de chute libre D_F et une distance d'arrêt D_S donne :

$$mgD_F = \int_0^{D_S} F_0 dx$$

Soit après résolution, on obtient la force de choc qui suit l'équation suivante :

$$F = \frac{mgD_F}{D_S} + mg = \frac{W \times D_F}{D_S} + W$$

en posant W comme étant le poids. L'équation donnée par Donovan et Glerum pour évaluer la force de choc est ainsi retrouvée (Donovan, 2008; Glerum, 2007).

Si on considère à présent une force de type élastique s'écrivant sous la forme :

$$F_1 = kx$$

avec k est la constante de raideur du matériau. La conservation de l'énergie mécanique s'écrit de même :

$$mgD_F = \int_0^{D_S} kx dx$$

Après résolution, on obtient la force de choc qui suit l'équation suivante :

$$F = 2 \frac{mgD_F}{D_S} + mg = 2 \frac{W \times D_F}{D_S} + W$$

ANNEXE B – CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU TISSU

Test de rupture

Un test de rupture a été effectué sur du tissu donné par l'ÉNC. Il s'agit là de vérifier que la force de rupture donnée par le fournisseur est la même que celle dans nos essais de rupture. L'éprouvette est tenue en deux points dans la machine par une pince. La longueur initiale de l'éprouvette entre les deux pinces est de 50mm. La direction dans laquelle est testé le tissu est la même qu'utilisé dans la pratique de cirque («chaîne»). La machine utilisée pour les essais est une MTS Insight (Figure 8-1). La vitesse d'étirement configurée est de 100mm/min. La fréquence d'échantillonnage pour acquérir la position et la force est de 10Hz.



Figure 8-1 : Photographie de l'éprouvette dans la machine d'essai.

Il a été observé que plus la largeur de l'échantillon pris dans le test de rupture augmente, plus la contrainte à la rupture diminue. En effet, statistiquement, plus il y a de fils, plus il y a de risque que l'un se casse. Le test a donc été effectué avec une éprouvette de différentes largeurs : 2 échantillons avec une largeur de 2cm, 2 échantillons avec une largeur de 6cm, 2 échantillons avec une largeur de 10 cm, 2 tests avec une largeur de 20cm. La largeur totale du tissu est de 1.6m.

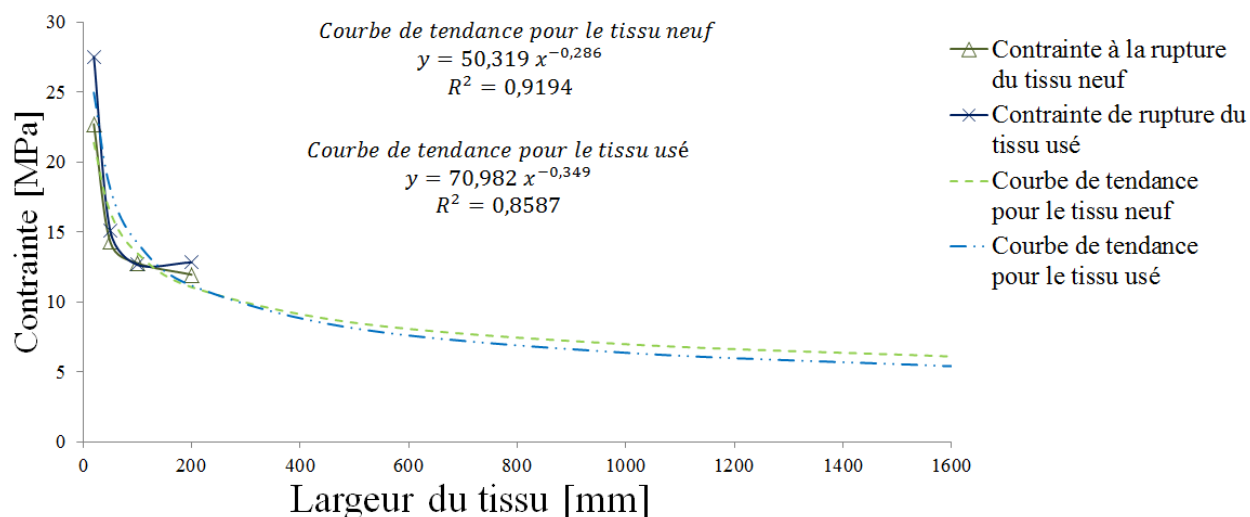


Figure 8-2 : Valeur moyenne des contraintes mesurées à la rupture en fonction de la largeur ainsi que leur courbe de tendance associée pour le tissu neuf et le tissu usé.

Les contraintes mesurées à la rupture sont ensuite moyennées pour chaque largeur. La courbe de tendance de la contrainte à la rupture pour les deux types de tissu en fonction de la largeur est ensuite tracée à la Figure 8-2 pour trouver la contrainte à la rupture du pan entier. De plus, les essais ont été réalisés sur un tissu neuf, jamais utilisé, et sur un tissu usé, utilisé pendant longtemps fois et considéré en fin de vie.

Il n'a pas été possible d'effectuer de test de rupture avec une plus grande largeur de tissu. L'accrochage dans la MTS était devenu impossible. Une trop grande quantité de tissu ne rentrait pas dans le format des mors utilisés, ou le tissu glissait des mors bien avant la rupture. C'est pourquoi une courbe de tendance a été utilisée pour avoir une idée de la contrainte à la rupture du pan entier de tissu. La courbe de tendance utilisée est une fonction puissance et le coefficient de corrélation est indiqué sur chaque des courbes à la Figure 8-2. La valeur trouvée pour la contrainte de rupture du pan entier ne reflètera pas entièrement la réalité. En effet la courbe de tendance ne suit pas exactement la contrainte réelle. Plus la largeur augmente, plus la tangente à la courbe de la contrainte diminue jusqu'à ce que la courbe de contrainte s'approche d'une courbe horizontale. Or la courbe de tendance n'a pas le même comportement et a une contrainte plus basse lorsque la largeur du tissu augmente que la contrainte réelle.

Le tissu usé a une charge à la rupture mesurée supérieure à celle du tissu neuf pour les 4 largeurs. Or, une photographie au microscope (50x) à la Figure 8-3 montre que la densité des fils est plus élevée dans le tissu usé que dans le tissu neuf. Le nombre d'espace entre les fils (points bleus sur la Figure 8-3) est plus élevé sur la photographie du tissu neuf que sur le tissu usé. Le tissu usé, à force d'être étiré lors de mouvement, garde une partie de son élongation sûrement en déformation plastique, ce qui fait que les fils se resserrent entre eux dans l'axe de la largeur (la trame). La largeur totale du tissu est d'ailleurs différente entre le tissu neuf et le tissu usé. Il est de 1.6m pour le tissu neuf et de 1.5m pour le tissu usé. La contrainte de rupture du tissu usé doit donc être prise avec une largeur de 1.5m.

Les contraintes de rupture par extrapolation sur la pleine largeur du tissu sont donc de 6.1MPa pour le tissu neuf et de 5.5MPa pour le tissu usé (Figure 8-2). Les charges à la rupture correspondantes sont donc de 4.9kN pour le tissu neuf et de 4.1kN pour le tissu usé. Le fournisseur donne une charge à la rupture de 7.7kN. Cependant il ne donne aucune précision sur la prise de mesure. La grande différence provient de l'approximation faite pour trouver la contrainte à la rupture depuis l'essai mécanique. La courbe choisie pour représenter le comportement du tissu ne représente pas le comportement du tissu pour le pan entier et sous-estime beaucoup la valeur réelle. Malheureusement sans mesure directe à une largeur de pan entier, il est impossible de vérifier la valeur donnée par le fournisseur.

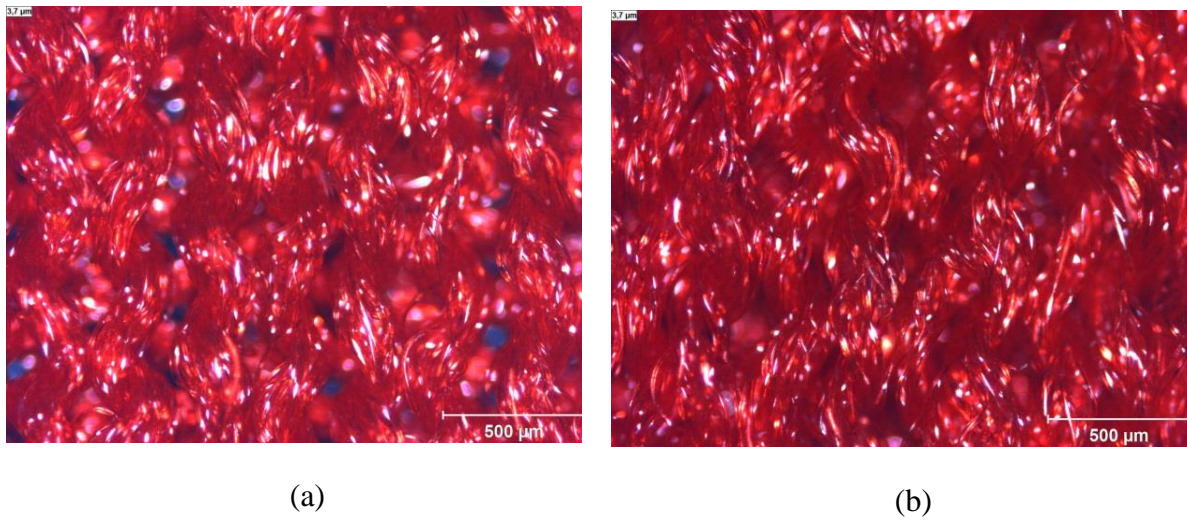


Figure 8-3 : Photographie du tissu au microscope avec un agrandissement de 50x : (a) le tissu neuf et (b) le tissu usé.

Test en chargement alterné

Trois essais en chargement alterné sont effectués sur les deux types de tissu et pour trois fréquences de cycle : 0.5Hz, 1Hz et 2Hz. Il s'agit de trouver les constantes de raideur et d'amortissement du tissu. L'éprouvette utilisée est un morceau de tissu rectangulaire de largeur 500mm plié en 5 épaisseurs et d'épaisseur 0.5mm. La longueur initiale entre les deux pinces est différente selon les fréquences de cycle afin de ne pas dépasser les limites de la machine : 5cm pour 0.5Hz, 2.5cm pour 1Hz et 1cm pour 2Hz. La machine utilisée pour les essais est une MTS318-10. L'échantillon est installé avec une pré-tension de 200N. Le chargement alterné se fait à amplitude contrôlée, dont l'amplitude est fixée par la contrainte maximale mesurée sur le tissu. La force maximale mesurée lors de la prise de mesure sur le tissu est de 2.8kN soit une valeur de contrainte de 3.36MPa. La fréquence d'échantillonnage pour acquérir la position et la force est de 200Hz. Les cycles d'hystérésis sont ensuite obtenus à partir des données expérimentales de la charge et du déplacement en fonction du temps (Figure 8-4). La forme de la courbe de la force en fonction du déplacement nous informe que le tissu a un comportement du type non linéaire raidissant. Cela veut dire que plus la force augmente, plus la rigidité augmente.

Un programme Matlab a été créé pour trouver les constantes d'amortissement et de raideur du tissu à partir des données expérimentales. La force mesurée est considérée comme étant égale à :

$$F = c\dot{x} + kx$$

où x est le déplacement, \dot{x} est la vitesse de déplacement et c et k sont respectivement la constante d'amortissement et de raideur.

Le programme permet d'ajuster la force mesurée à la forme théorique à l'aide la fonction *Curve fit* et ainsi de trouver les constantes de raideur et d'amortissement correspondantes. Cependant comme le tissu est non linéaire, la modélisation de la forme $F = c\dot{x} + kx$ ne représente pas entièrement la réalité. La Figure 8-5 montre la superposition de la force mesurée et de la force théorique. La force théorique est considéré linéaire et se place donc au milieu de la force mesurée.

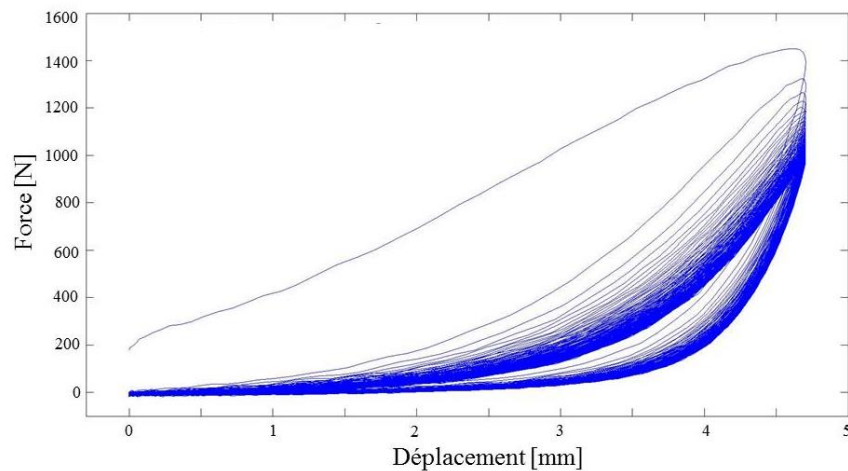


Figure 8-4 : Force en fonction du déplacement pour 200 cycles lors d'un essai en chargement alterné à 2Hz sur le tissu utilisé.

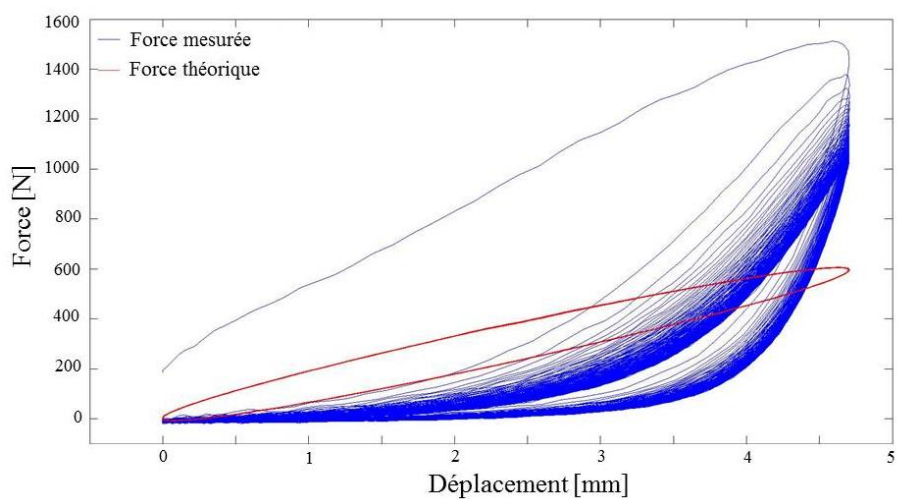


Figure 8-5 : Superposition de la force mesurée lors de l'essai en chargement alterné et de la force théorique en fonction du déplacement.

Tableau 8-1 : Constantes de raideur et d'amortissement évaluées suite à l'essai en chargement alterné avec les fréquences de 2Hz, 1Hz et 0.5Hz pour le tissu neuf et le tissu usé.

	2Hz		1Hz		0.5Hz	
	k (kN/m)	c (kN.s/m)	k (kN/m)	c (kN.s/m)	k (kN/m)	c (kN.s/m)
Neuf	86.3	1.60	43.8	1.40	24.9	1.45
Usé	116	1.93	51.5	1.48	40.9	2.08
Moyenne	101	1.77	47.7	1.44	32.9	1.77
Moyenne pan entier	323	5.66	152	4.61	105	5.66

Les valeurs trouvées des constantes de raideur et d'amortissement pour les trois essais sont ensuite moyennées entre le tissu neuf et le tissu usé (Tableau 8-1). La valeur moyenne est ensuite donnée pour la largeur du pan entier en multipliant par le ratio de la largeur totale du tissu (1.6m) sur la largeur du tissu dans l'essai mécanique (0.5m). Les valeurs obtenues pour la constante de raideur sont très élevées, mais sont en accord avec les valeurs obtenues pour un test similaire sur du tissu enduits de PVC : les valeurs se situaient entre 200 et 1300kN/m selon la partie de la courbe considérée (Ambroziak & Klosowki, 2013). Le tissu n'a en réalité pas qu'une seule valeur de la constante de raideur car il a un comportement bien plus complexe. En outre les valeurs sont pour chaque cas plus élevées pour le tissu usé que pour le tissu neuf (Tableau 8-1). Cela provient du fait que le tissu usé a une densité de fils plus élevée que le tissu neuf. Pour comparer réellement les propriétés mécaniques des deux tissus, il aurait fallu prendre un nombre égal de fils et non pas une largeur égale. Ceci permet tout de même de constater que le modèle simplifié linéaire de la force ne correspond pas à la réalité. Il aurait fallu prendre un modèle prenant en compte la non-linéarité du comportement du tissu. Il serait intéressant de faire cet essai sur les différents types de tissu existants. En effet, le tissu de cirque est vendu en deux types : rigide ou souple. L'essai a été effectué sur du tissu souple, tissu qui utilise l'ÉNC. Mais de nombreuses écoles de cirque pour débutant utilisent du tissu dit rigide. Cet essai en chargement alterné serait une bonne méthode pour quantifier la différence de rigidité entre les deux types de tissu.

ANNEXE C – MODÉLISATION D’UNE CHUTE LIBRE EN TISSU

Le but est de modéliser un mouvement acrobatique basique en tissu de façon analytique et simplifiée afin de trouver la constante de raideur et d’amortissement équivalente du tissu soumis à un mouvement acrobatique. Le signal de la force mesurée et le signal de la force évaluée à partir de la modélisation sont comparées afin de trouver la constante de raideur et d’amortissement équivalente du tissu. Elles sont trouvées en minimisant l’erreur quadratique entre les forces maximales du modèle et de la mesure ainsi qu’en forçant la durée entre les deux sommets à la celle de la force mesurée. L’objectif est de savoir s’il est possible de modéliser un des équipements de cirque, le corps de l’artiste et un mouvement acrobatique par un système simple. Des tests de rupture et de vibration ont été effectués sur le tissu afin d’évaluer sa constante de raideur et d’amortissement. Les constantes de raideurs et d’amortissement évalués dans les essais mécaniques sont ensuite comparées à celles du modèle analytique.

Description du mouvement acrobatique effectué

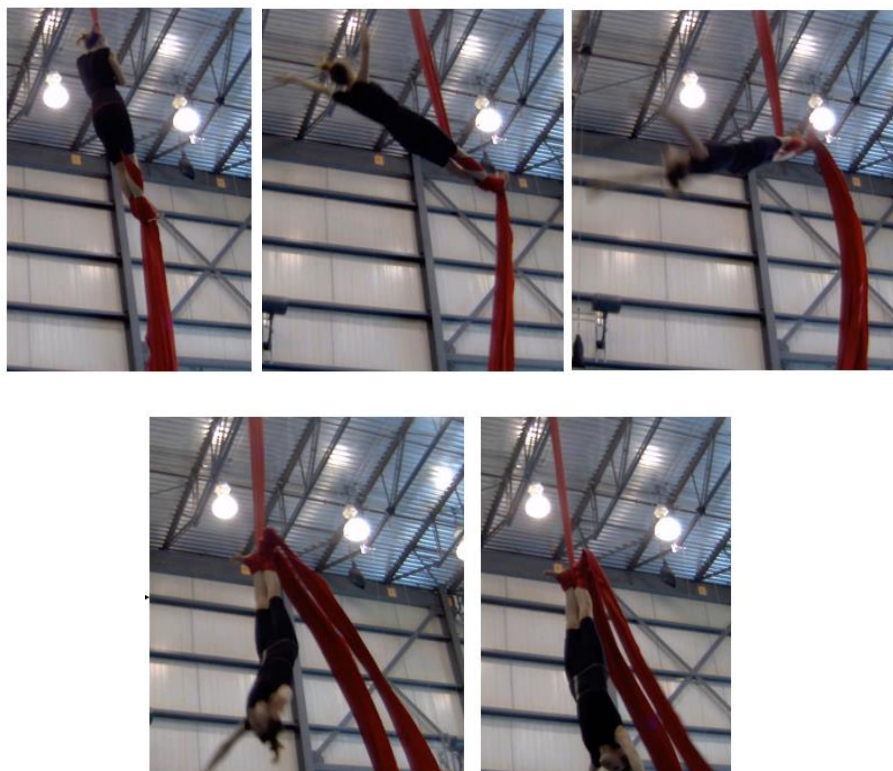


Figure 8-6 : Chute libre attachée aux chevilles par une clé en huit détaillée image par image (ordre chronologique d'apparition : de gauche à droite).

Il s'agit d'une chute libre basique attachée aux chevilles par une clé en huit. L'artiste bloque ses chevilles dans le tissu par un nœud puis se laisse tomber en arrière. Son corps bascule jusqu'à arriver à l'envers maintenue par ses chevilles. L'artiste garde son corps tonifié et ses pointes de pied vers soi durant tout le mouvement comme sur la Figure 8-6. Trois artistes, de masse 54, 55 et 64kg, ont effectué chacun cinq fois ce mouvement sur le même tissu et à la même hauteur sur le tissu. Une fois les cinq signaux placés à la meilleure similitude grâce à la méthode de la corrélation croisée expliquée au 4.8.1, ils sont moyennés en chaque point pour obtenir une courbe de la force moyenne.

Modélisation

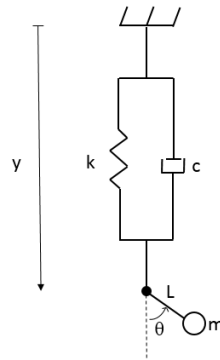


Figure 8-7 : Système équivalent tissu-corps de l'artiste.

Le tissu est modélisé par un système ressort-amortisseur. Le corps de l'artiste est modélisé par un pendule rigide. L'inertie en rotation de l'artiste ainsi que les mouvements de l'artiste sur lui-même sont négligés. La cellule de charge serait ici placée entre l'encastrement et le tissu représenté par le système ressort-amortisseur.

La Figure 8-7 présente le système équivalent. Les équations de mouvement du système équivalent ont été trouvés par les équations de Lagrange et sont données par :

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = m(g - L\ddot{\theta}\sin\theta - L\dot{\theta}^2\cos\theta) ;$$

$$L\ddot{\theta} + \ddot{y}\sin\theta + g\sin\theta = 0 ;$$

où θ est l'angle entre le corps de l'artiste et l'axe vertical, $\dot{\theta}$ est la vitesse angulaire du corps de l'artiste, $\ddot{\theta}$ est l'accélération angulaire du corps de l'artiste, y est la longueur de tissu avec l'artiste suspendu mais sans qu'il ait commencé le mouvement, \dot{y} est la vitesse de déformation du tissu, \ddot{y} est l'accélération de déformation du tissu, g est l'accélération gravitationnelle, k est la constante de raideur du tissu, c est la constante d'amortissement du tissu, L est la longueur entre les pieds et le centre de masse de l'artiste (le point noir représente l'attache du tissu aux pieds de l'artiste, le rond blanc représente le centre de masse de l'artiste à la Figure 8-7) et m est la masse de l'artiste. La masse du tissu n'est pas considéré car elle est négligeable devant la masse de l'artiste. La masse donné par le fournisseur pour le tissu est de $130g/m^2$, ce qui donne pour une longueur au-dessus de l'artiste de 3m et une largeur de 1.6m une masse de 624g, soit 86 fois la masse de l'artiste le plus léger.

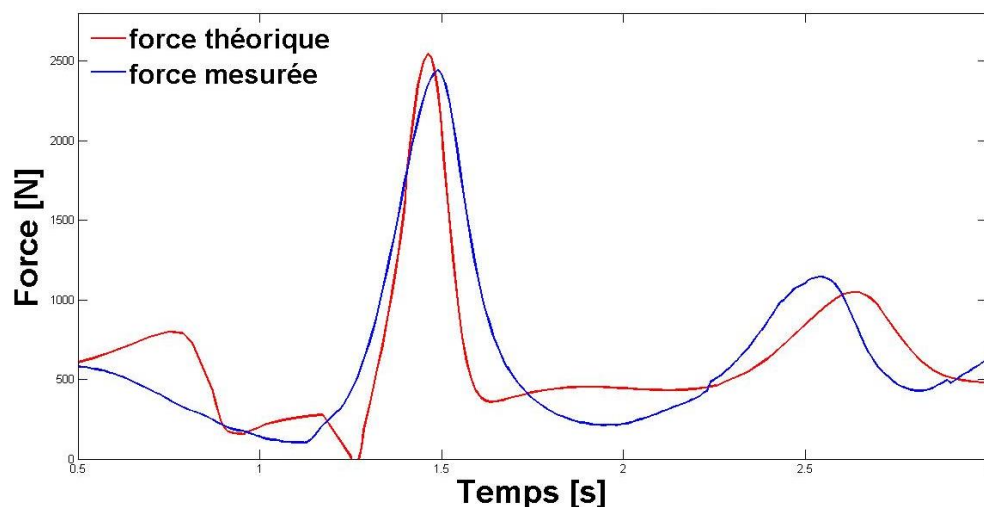


Figure 8-8 : Superposition de la force théorique et de la force moyenne mesurée pour P006.

La Figure 8-8 est la superposition de la courbe obtenue de la force modélisée et de la force moyenne mesurée pour un des trois participants. L'allure des deux courbes est similaire. La distance entre les deux sommets et leur amplitude sont relativement similaires. Les constantes de raideur et d'amortissement du modèle sont trouvées pour minimiser l'erreur quadratique entre les forces maximales du modèle et de la mesure (Tableau 8-2.) L'écart relatif entre les forces maximales est compris entre 3.9% et 9.2%. Bien que les trois participants aient utilisé le même tissu, les constantes de raideur et d'amortissement trouvés pour ajuster la courbe sont bien différentes pour les trois participants car chaque participant n'agit pas de la même façon. L'action du corps a un impact sur la force mesurée.

Tableau 8-2 : Constante de raideur, d'amortissement, force maximale trouvée dans la modélisation et force maximale des signaux moyennés pour chaque participant.

Participant	Intervalle entre les deux premiers sommets (s)	Constante de raideur (N/m)	Constante d'amortissement (kg/s)	Force maximale moyenne mesurée (N)	Force maximale obtenue avec le modèle (N)	Écart relatif de la force maximale
P004	1.07	1860	568	1948	2145	9.2%
P006	1.05	2286	645	2443	2543	3.9%
P016	0.58	6415	1075	1687	1801	6.3%

Fréquence des sous systèmes

L'ensemble tissu – artiste peut aussi être divisé en deux sous-systèmes : le corps humain peut être associé à un pendule simple et le tissu à un système masse-ressort-amortisseur. Les fréquences de chacun des deux sous-systèmes peuvent être calculées de la façon suivante :

La fréquence d'un pendule simple est donnée par :

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}};$$

et la fréquence du système masse-ressort est :

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

où g est l'accélération gravitationnelle, l est la distance du pendule (ici c'est la distance entre les pieds et le centre de masse de l'artiste), k est la constante d'amortissement et m est la masse.

Les valeurs numériques suivantes ont été utilisées : $l = 1.1m$ (environ la distance pied-centre de masse du corps humain), $m = 55kg$ (masse de l'artiste P004), $k = 47710 N/m$ (résultats du test en chargement alterné à 1Hz).

Les valeurs des fréquences sont donc : $f_1 = 0.47Hz$ et $f_2 = 4.7Hz$.

Or les courbes générées par les trois artistes ont une durée d'environ 1s entre les deux premiers sommets, comme à la Figure 8-8, ce qui représente une fréquence d'environ 1Hz. Il est donc impossible de diviser le système en deux sous-systèmes simples. Le problème est que le couplage des deux parties n'est pas considéré.

Discussion

Rappelons que la constante de raideur trouvée pour modéliser le tissu dans la modélisation est de 1860N/m pour P004, 2286N/m pour P006 et 6415N/m pour P016. Il faut noter aussi que les courbes générées par les trois artistes ont une durée d'environ 1s entre les deux sommets, ce qui représente une fréquence d'environ 1Hz. Pour une fréquence de chargement de 1Hz, la constante de raideur mesurée lors du test de chargement alterné sont respectivement de 152kN/m (Annexe B). La constante est très éloignée de celles trouvées dans la modélisation.

Le problème vient du fait que la modélisation est trop simplifiée par rapport à la réalité. Le tissu a été supposé linéaire pour trouver les constantes d'amortissement et de raideur. Le tissu doit en réalité être considéré non linéaire raidissant, donc l'équation reliant la force au déplacement doit certainement comporter un terme cubique pour s'ajuster à la courbe présente à la Figure 8-4. De plus, la partie au-dessus du tissu ne peut pas être considérée comme un encastrement. Le tissu est rattaché au point d'accrochage par un câble d'acier puis par une corde type corde Spectra. Chaque élément, le câble d'acier, la corde et le point d'accrochage ont une raideur et un amortissement. La simplification la plus importante a été effectuée sur l'artiste. L'artiste est modélisée par une tige rigide et une masse. Or le corps humain a une réponse dynamique bien différente selon s'il bouge (Nikooyan & Zadpoor, 2015) ou s'il est immobile ou encore selon s'il est assis (Zhou & Griffin, 2014) ou s'il est debout. Chaque segment de corps peut être modélisé comme étant un système masse-ressort-amortisseur (Gupta, 2007).

ANNEXE D – VALEUR MOYENNE DE LA FORCE MAXIMALE EN TISSU

Mouvement	Participant	Niveau scolaire	Valeur moyenne de la force maximale (kN)
chute main	p004	dec2	2.45
chute cheville	p006	dee1	2.40
chute retenue cuisse	p006	dee1	2.18
chute vrille retenue cuisse	p006	dee1	2.10
chute vrille	p006	dee1	2.08
chute cheville	p004	dec2	1.95
chute hanche	p003	dec3	1.89
chute « blender »	p003	dec3	1.86
vrille aux hanches un tour	p004	dec2	1.73
chute cheville	p016	dec2	1.69
lâché rattrapé jambes en écart	p004	dec2	1.13

**ANNEXE E – VALEUR MOYENNE DE LA FORCE MAXIMALE EN
TRAPÈZE DANSE**

Mouvement	Participant	Niveau scolaire	Valeur moyenne de la force maximale (kN)
tempo	p009	dec2	2.55
enchainement tempo	p010	dec3	2.30
chute barre a une autre	p009	dec2	2.07
napoléon twist	p010	dec3	1.80
lâché rattrapé barre avec swing	p010	dec3	1.75
chute déroulée	p010	dec3	1.66
disloc	p010	dec3	1.20

ANNEXE F – VALEUR MOYENNE DE LA FORCE MAXIMALE EN SANGLES

Mouvement	Participant	Niveau scolaire	Valeur moyenne de la force maximale (kN)
enchaînement tours	p013	dec3	4.59
disloc salto	p008	dec2	3.89
disloc salto	p013	dec3	3.13
disloc	p013	dec3	2.98
tempo	p013	dec3	2.97
disloc	p015	dec2	2.94
disloc	p007	dec1	2.85
disloc	p012	dec3	2.84
disloc	p008	dec2	2.83
disloc « split »	p007	dec1	2.43
disloc salto	p014	dec2	2.15
chute	p007	dec1	2.05
disloc	p014	dec2	1.98

**ANNEXE G – VALEUR MOYENNE DU TAUX DE CHARGEMENT
MAXIMAL**

Mouvement	Discipline	Valeur moyenne des forces maximales (N)	Valeur moyenne du taux de chargement maximal (N/s)
chute déroulée	trapèze	1661	95546
chute retenue cuisse	corde	3756	76553
chute	sangles	2049	60573
disloc salto	sangles	3885	54420
enchaînement tour	sangles	4590	47726
disloc salto	sangles	3128	37482
tempo	sangles	2965	36432
disloc	sangles	2977	35395
disloc	sangles	2935	33451
disloc	sangles	2838	32129
enchaînement tempo	trapèze	2336	31764
tempo	trapèze	2554	29619
chute main	tissu	2448	29463
disloc	sangles	1983	28907
chute déroulée	corde	2168	28240
barre swing	trapèze	1753	26526
salto	corde	1926	26086
disloc salto	sangles	2147	23732
vrille	corde	1474	23011
disloc	sangles	2833	21280
disloc	sangles	2850	20995
chute vrille	tissu	2083	20559
chute barre a une autre	trapèze	2065	20279
chute cheville	tissu	2403	19873
tour hanche	cerceau	1558	18828
chute cheville	tissu	1945	18031
chute vrille retenue cuisse	tissu	2104	17653
chute hanche (coffin)	tissu	1893	15771
tour hanche	tissu	1728	14716
descendu ecart	tissu	1129	14672

disloc split	sangles	2428	14552
chute retenue cuisse	tissu	2176	14311
chute blender	tissu	1856	13804
napoelon twist	trapèze	1797	13782
chute cheville	tissu	1687	13608
disloc	trapèze	1201	8219