

Université de Montréal

Analyses biomécaniques de l'interaction acrobate-équipement de cirque dans la performance  
acrobatique en planche coréenne

Par

Marion Cossin

Département de pharmacologie et physiologie/ Institut de génie biomédical/ Faculté de  
médecine

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor - Doctorat (Ph.D.)  
en génie biomédical

Octobre 2021

© Cossin Marion, 2021



Université de Montréal

Département de pharmacologie et physiologie/ Institut de génie biomédical/ Faculté de  
médecine

---

*Cette thèse intitulée*

**Analyses biomécaniques de l'interaction acrobate-équipement de cirque dans la performance  
acrobatique en planche coréenne**

*Présentée par*

**Marion Cossin**

*A été évaluée par un jury composé des personnes suivantes*

**Louis de Beaumont**

Président-rapporteur

**François Prince**

Directeur de recherche

**Annie Ross**

Codirectrice

**Maxime Raison**

Membre du jury

**Philippe Gorce**

Examineur externe



## Résumé

La planche coréenne est une discipline de cirque exigeante d'un point de vue technique. Il s'agit d'une longue planche à bascule sur laquelle deux acrobates, placés à chaque extrémité, se catapultent continuellement pour effectuer des sauts acrobatiques. Les acrobates utilisent une technique spécifique pour le décollage et l'atterrissage. La planche coréenne, comme tout équipement de cirque, n'a pas de standard de fabrication et il existe une grande variété de planches. Les acrobates, les entraîneurs et les concepteurs d'équipements bénéficieraient d'avoir plus d'informations sur la biomécanique de la performance et sur la mécanique de la planche, afin d'améliorer le développement des techniques acrobatiques et la conception des planches.

L'objectif de la thèse était de mieux comprendre l'interaction entre l'équipement de cirque et la performance acrobatique en planche coréenne. À cet égard, les quatre objectifs spécifiques étaient de : (1) Établir l'influence de la hauteur de saut, du participant, de la planche et de la technique de réception sur les forces d'impact et les taux de chargement; (2) Quantifier l'influence de plusieurs facteurs biomécaniques cinématiques sur la hauteur de saut; (3) Déterminer la différence de contribution musculaire et de durée des phases du mouvement entre acrobates débutants et acrobates élités; et (4) Caractériser mécaniquement différentes planches et mettre en évidence la contribution du renvoi de flexion de la planche sur la hauteur de sauts. Cette thèse présente l'ensemble des travaux effectués pour lier les caractéristiques de la planche au mouvement de l'acrobate. En effet, le mouvement de l'acrobate, sauter à grande hauteur, génère des forces élevées sur la planche lors de la réception, ce qui met en mouvement la planche. L'équipement ensuite permet un transfert de force vers l'acrobate qui s'élance. Finalement, ce dernier doit utiliser une technique optimale avec une synchronisation et une contribution musculaire précis, afin de gagner une hauteur suffisante pour la performance.

Nos différentes études ont permis de montrer que le facteur qui influence le plus les forces d'impact et le taux de chargement lors de la réception est la hauteur de saut (40% d'influence relative). La force maximale mesurée est de 13.5 fois le poids corporel de l'acrobate, ce qui peut représenter un risque de blessure. La hauteur de saut est en majorité influencée par la vitesse

verticale du centre de masse de l'acrobate-partenaire qui se réceptionne, de la vitesse verticale de la planche et de l'amplitude des hanches lors du décollage. Ces deux derniers paramètres peuvent être contrôlés par les acrobates ou les concepteurs de planche coréenne. Nous démontrons, de plus, que les acrobates débutants sont plus longs dans la préparation au décollage, le décollage et l'atterrissage comparativement aux acrobates experts. Cependant, il n'y avait pas de différence claire entre les débutants et les professionnels quant à l'activité musculaire lors du décollage et atterrissage, ce qui indique que la temporalité est sûrement plus importante que l'activité musculaire. Nous trouvons aussi que le renvoi de flexion (énergie élastique de la planche) est non négligeable (46 % d'influence relative) et contribue donc à la hauteur de saut. Finalement, le paramètre mécanique le plus important pour quantifier et comparer les planches est la raideur. Les quatre planches de l'étude ont une raideur qui varie entre 12.2 kN/m et 19.6 kN/m. Ce paramètre peut probablement guider les futures conceptions de planche. Collectivement, ces quatre études mettent en évidence que la synchronisation temporelle du mouvement des acrobates et du mouvement de la planche est l'élément crucial dans cette discipline.

**Mots-clés :** planche coréenne, cirque, performance, acrobate élite, biomécanique, mécanique, cinématique, forces d'impact, taux de chargement, activité musculaire, renvoi de flexion.

## Abstract

Korean teeterboard is a technically demanding circus discipline. The apparatus resembles a seesaw, and two acrobats take turns jumping vertically, performing complex acrobatic figures and landing back on the apparatus. Acrobats use a specific technique during take-off and landing. Furthermore, like most circus equipment, there are no standards regarding the design of the teeterboard and there is a wide variety of teeterboards. Acrobats, trainers and equipment's designers would benefit to know more about the relationship between the biomechanics of the performance and the mechanics of the board. This understanding would help improving acrobatic techniques and optimize the design of teeterboards.

The purpose of the thesis was to better understand the interaction between the circus equipment and the acrobats' performance in Korean teeterboard. To this end, this thesis was divided into four specific goals: (1) Define the influence of the jump height, the teeterboard and the landing technique on impact forces and loading rates; (2) Quantify the influence of various kinematic factors to the jump height; (3) Determine the differences between expert and novice acrobats with respect to muscular contribution and duration of the phases of the movement ; and, (4) mechanically characterize different types of teeterboards and highlight the contribution of the recoil effect to the jump height. This thesis covers the work carried out to link the characteristics of the teeterboard to the movement of the acrobat. The movement of the acrobat, i.e., jumping at high height, generates high forces during landing, which set in motion the board. The equipment then enables the transfer of this force to the other acrobat taking-off. This acrobat should use an optimal technique with a precise timing and muscular contribution, to gain sufficient height for their performance.

This body of work demonstrated that the most important factor influencing the impact forces and loading rates was jump height (40% of relative influence). Maximal recorded force was 13.5 times the acrobat's bodyweight, raising concerns about risk of injury. Jump height was mainly influenced by the vertical velocity of the center of mass of the acrobat landing, the vertical velocity of the teeterboard and the hip range of motion at take-off. The last two parameters can

be controlled by acrobats, trainers, or designers of Korean teeterboard. We also found that novice acrobats are longer in the following phases: preparation for take-off, take-off, and landing. However, there was no clear difference in muscular amplitude during take-off and landing between novice and professional acrobats. This indicates that timing may be more important than muscular amplitude. We showed that recoil effect (elastic strain energy of the board) strongly contributed to the jump height (46% of relative influence). Finally, the most important mechanical parameter to quantify and compare teeterboards was the stiffness. The stiffness of the four teeterboards analyzed in this study ranged from 12.2 kN/m to 19.6 kN/m. This result can guide future designs of teeterboard. The results from this thesis highlight the fact that temporal synchronization of the movement from both acrobats and the movement of the board is crucial in this discipline.

**Keywords:** Korean teeterboard, circus, performance, elite acrobat, biomechanics, mechanics, kinematics, impact forces, muscular activity, recoil effect.

# Table des matières

Résumé .....	5
Abstract .....	7
Table des matières .....	9
Liste des tableaux .....	13
Liste des figures .....	15
Liste des sigles et abréviations .....	19
Remerciements .....	21
Chapitre 1 – Introduction .....	23
1.1 Contexte .....	23
1.2 Problématique générale .....	25
Chapitre 2 – Revue de littérature .....	29
2.1 Les arts du cirque et la planche coréenne .....	29
2.1.1 Les arts du cirque .....	29
2.1.2 La planche coréenne .....	30
2.1.3 Technique acrobatique en planche coréenne .....	33
2.1.4 Mécanique de la planche coréenne .....	37
2.2 Le saut .....	40
2.2.1 La découpe en phases .....	40
2.2.2 La biomécanique du saut .....	42
2.2.3 Les forces de réaction du sol .....	45
2.2.4 L'activité musculaire .....	48
2.3 Comparaison avec des activités sportives similaires .....	49

2.3.1 Trampoline .....	49
2.3.2 Le plongeon .....	51
2.4 Le hockey.....	53
2.5 Analyse des performances sportives et outils de mesures.....	55
2.5.1 Capturer le mouvement.....	55
2.5.2 Mesurer les forces de réaction .....	57
2.5.3 Mesurer l'activité musculaire.....	59
2.6 Conclusions.....	61
Chapitre 3 – Objectifs et plan de la thèse .....	62
3.1 Objectifs de la thèse .....	62
3.2 Aperçu des méthodes .....	63
3.2.1 Participants.....	64
3.2.2 Planches utilisées .....	66
3.2.3 Protocole expérimental.....	68
3.2.4 Traitement statistique des données .....	74
3.3 Structure de la thèse .....	75
3.4 Structure du manuscrit .....	76
Chapitre 4 – L'influence de la hauteur de saut, de la technique de réception, du participant et de la planche sur les forces d'impact et taux de chargement .....	78
4.1 Avant-propos.....	78
4.2 Article 1 .....	80
4.2.1 Abstract .....	81
4.2.2 Introduction.....	81
4.2.3 Methods .....	84

4.2.4 Results .....	89
4.2.5 Discussion .....	93
4.2.6 Conclusion .....	97
4.3 Données complémentaires .....	98
Chapitre 5 – Facteurs cinématiques influençant la hauteur de saut en planche coréenne .....	101
5.1 Avant-propos .....	101
5.2 Article 2 .....	103
5.2.1 Abstract .....	103
5.2.2 Introduction.....	104
5.2.3 Methods .....	105
5.2.4 Results .....	110
5.2.5 Discussion and implications .....	112
5.2.6 Conclusion .....	114
Chapitre 6 – Phase de saut et activation musculaire chez des acrobates débutants et professionnels en planche coréenne .....	117
6.1 Avant-propos.....	117
6.2 Article 3 .....	119
6.2.1 Abstract .....	119
6.2.2 Introduction.....	120
6.2.3 Methods .....	123
6.2.4 Results .....	127
6.2.5 Discussion .....	133
6.2.6 Conclusion .....	136

Chapitre 7 – L’influence du renvoi de flexion de la planche dans la performance circassienne de planche coréenne.....	139
7.1 Avant-propos.....	139
7.2 Article 4 .....	141
7.2.1 Abstract .....	141
7.2.2 Introduction.....	141
7.2.3 Materials and Methods.....	145
7.2.4 Results .....	150
7.2.5 Discussion.....	153
7.2.6 Conclusion .....	156
7.2.7 Appendix: energy calculation.....	157
7.3 Adéquation des forces de réaction entre la capture de mouvement et les semelles à capteurs de pression .....	159
Chapitre 8 – Discussion et conclusion générale.....	161
8.1 Synthèse des travaux .....	161
8.2 Originalité .....	164
8.3 Limites et améliorations.....	165
8.3 Perspectives .....	168
8.4 Conclusion générale .....	169
Références bibliographiques.....	171
Annexe 1: copie du questionnaire pour mieux comprendre la discipline .....	189

## Liste des tableaux

Tableau 1. –	Information sur les participants de l'étude 1. ....	65
Tableau 2. –	Informations sur les participants de l'étude 3. ....	65
Tableau 3. –	Informations sur les participants de l'étude 2 et 4. ....	65
Tableau 4. –	Planche utilisée pour chaque étude. ....	66
Tableau 5. –	Forces de réaction moyennes et hauteur moyennes pour des sauts normaux...	99
Tableau 6. –	Hauteur de saut moyenne (m) par participant et par planche pour des sauts normaux.	99
Tableau 7. –	The mean, standard deviation, and percentage of the contribution of input variables for acrobat 1 and acrobat 2 .....	110
Tableau 8. –	Description of the jump phases.....	124
Tableau 9. –	Comparisons of duration of phases and knee kinematic between experts and novices.	127
Tableau 10. –	Mechanical properties and dimensions of the teeterboards.....	151
Tableau 11. –	Mean $\pm$ standard deviation values for the nine explanatory and output variables, and the BRT results. ....	152



## Liste des figures

- Figure 1.** – Planche coréenne, École nationale de cirque © Roland Lorente .....27
- Figure 2.** – Exemple de performance en planche sautoir, ([http://expositions.bnf.fr/cnac/grand/cir\\_2468.htm](http://expositions.bnf.fr/cnac/grand/cir_2468.htm)). © Photo Daniel Cande / Bibliothèque nationale de France. 31
- Figure 3.** – Mouvement et déformation de la planche lors d’une réception (acrobate de gauche) et du décollage (acrobate de droite) .....34
- Figure 4.** – Séquence de mouvements en planche coréenne.....36
- Figure 5.** – Planche de l’École nationale de cirque sans la mousse qui recouvre toute la planche. 37
- Figure 6.** – Photographie du studio Chapiteau à l’École nationale de cirque et mise en avant de la fenêtre et du rideau couvrant tout un mur © Roland Lorente.....64
- Figure 7.** – Schéma explicatif de la structure de thèse : les énoncés dans les pastilles blanches ont été étudiés durant cette thèse tandis que les énoncés des pastilles bleues sont des possibilités futures. 75
- Figure 8.** – Étape 1 de la structure de thèse : mesure des forces de réaction. ....79
- Figure 9.** – Sequence of movement in Korean teeterboard: (1) Aerial phase for the acrobat on the left, ground phase for the acrobat on the right, (2) Preparation for landing for the acrobat on the left, preparation for take-off for the acrobat on the right, (3) Landing for the acrobat on the left, take-off for the acrobat on the right, (4) Ground phase for the acrobat on the left, aerial phase for the acrobat on the right, (5) Preparation for take-off the acrobat on the left, preparation for landing for the acrobat on the right, and (6) Take-off for the acrobat on the left, landing for the acrobat on the right. ....82
- Figure 10.** – Korean teeterboard geometrical and mechanical characteristics for Cirque du Soleil (CDS), École nationale de cirque (ENC), and Machine de cirque (MDC). ....85
- Figure 11.** – Example of force-time profile from a trial of participant #3 during landing with normal technique. PLF is the first peak force (expressed in BW). Maximum loading rate expressed

in BW/s, was calculated as the maximum slope between three force samples between contact (time=0) and PLF. ....87

**Figure 12.** – A, Average and standard deviation of Peak Landing Force (PLF) and B, Maximal Loading Rate (MLR) with respect to jump heights, participants, landing techniques, and teeterboard types. Percentages of deviance explained from the BRT model are in parentheses. Mean value of empty board is presented in the Landing Techniques Figures as an extreme landing condition. École nationale de cirque (ENC), Cirque du Soleil (CDS) and Machine de cirque (MDC).

91

**Figure 13.** – Étape 2 de la structure de thèse : mesure de la cinématique des acrobates. ...102

**Figure 14.** – A. Description of the movement: (a) maximum jump height for the acrobat on the left and ground phase for the acrobat on the right, (b) descent for the acrobat on the left and flexion of the hips and knees for the acrobat on the right, (c) flexion of the hips and knees for the acrobat on the left and extension of the hips and knees for the acrobat on the right, (d) first contact with the teeterboard for the acrobat on the left and extension of the hips and knees for the acrobat on the right, (e) maximum flexion for the acrobat on the left, extension of the hips and knees for the acrobat on the right and rotation of the teeterboard, (f) extension of the hips and knees for the acrobat on the left, straight position for the acrobat on the right and rotation of the teeterboard, (g) contact with the mat for the acrobat on the left and last contact for the acrobat on the right, and (h) ground phase on the mat for the acrobat on the left and aerial phase for the acrobat on the right ; and B. Sequence of the three analyses corresponding to the sequence of performance: 1) landing, 2) rotation of the teeterboard and 3) take-off. Input and response variables are provided for the three analyses.....108

**Figure 15.** – Knee and hip angle and vertical velocity of the teeterboard at the foot location for landing (A) and take-off (B) phases. The two vertical lines represent the beginning and the end of the rotation of the teeterboard, defined by the minimum and maximum positions of the marker at the end of the teeterboard.  $\diamond$ , maximum hip or knee flexion and,  $\circ$ , maximal upward or downward vertical velocity of the teeterboard.....109

**Figure 16.** – Étape 3 de la structure de thèse : mesure de l'activité musculaire.....118

**Figure 17.** – Picture of Korean teeterboard and two acrobats © Roland Lorente (photo courtesy of École nationale de cirque de Montréal) .....121

**Figure 18.** – Examples of time history of normalized EMG (%) of vastus lateralis (VL), gastrocnemius lateralis (GL) and biceps femoris (HAMS); vertical position (m) of the marker of the sternum and the marker at the end of the teeterboard; and knee angle (°) during a jump cycle for A. an expert acrobat; and B. a novice acrobat. Vertical lines represent the limits of the phases. Phases are shaded as: green = preparation for take-off; purple = take-off; pink = preparation for landing; and blue = landing. ....130

**Figure 19.** – Mean and standard deviation of normalized EMG (%) of vastus lateralis (VL), gastrocnemius lateralis (GL) and biceps femoris (HAMS) for A. preparation for take-off (PTO); B. take-off (TO); C. preparation for landing (PL); and D. landing (LA), for the two expert and the two novice acrobats. ....132

**Figure 20.** – Étape 4 de la thèse : mouvement et mécanique de la planche. ....140

**Figure 21.** – Teeterboard events: bending angle and recoil effect during take-off and landing. 143

**Figure 22.** – A. Setup protocol. B. Bending angles are calculated for the five segments on each side of the teeterboard:  $\theta_1 \cdot 2$  and  $\theta_2 \cdot 3$  are illustrated for example. The total deflection angle,  $\theta_{total}$  is calculated between segment 1 and segment 5. ....148

**Figure 23.** – Bending angles during take-off (A) and landing (C) from a typical trial. Bending angular velocity during take-off (B) and landing (D). The two vertical lines represent the beginning and the end of the teeterboard movement. o, minimum bending angles and bending angular velocities, and \*, maximum bending angles and bending angular velocities. ....149

**Figure 24.** – En haut : forces de réaction calculées par la dynamique inverse; en bas : position verticale de la planche et mise en évidence par les lignes verticales du début et de la fin du mouvement de la planche. ....159

**Figure 25.** – Schéma d’une planche coréenne tiré de <https://www.dreamstime.com/stock-images-circus-teeter-board-acrobatics-vector-illustration-image35939754> .....191



## Liste des sigles et abréviations

AE : aerial phase

BRT : Boosted Regression Tree

BW : bodyweight

CDS : Cirque du Soleil

COM : Center of mass

EMG : electromyography

ENC : École nationale de cirque

GL : gastrocnemius lateralis

HAMS : biceps femoris

LA : landing

MDC : Machine de Cirque

MLR : Maximal Loading Rate

PL : preparation for landing

PLF : Peak Landing Force

PTO : preparation for take-off

SD : standard deviation

TA: tibialis anterior

TO : take-off

VL : vastus lateralis



## Remerciements

Je voudrais commencer par remercier mes directeurs de thèse, François Prince et Annie Ross, pour leurs conseils, leurs enseignements et leurs discussions.

Je tiens également à remercier Patrice Aubertin d'avoir soutenu ma recherche, de m'avoir accueillie au Centre de recherche, d'innovation et de transfert en arts du cirque (CRITAC) et de m'avoir offert un emploi en lien avec mon domaine. Je ne pense pas que j'aurais complété ma thèse sans le CRITAC, le personnel du CRITAC, ni Patrice Aubertin.

Je tiens également à remercier les Professeurs Louis de Beaumont, Maxime Raison et Philippe Gorce pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je tiens aussi à remercier tous les gens qui ont contribué à ces travaux de près ou de loin, les stagiaires, les autres étudiants des cycles supérieurs, les acrobates ou les compagnies de cirque.

Finalement, un gros merci à mon copain, Renato Henriques Da Silva, qui m'a soutenu dans l'envie de me dépasser, qui m'a supporté moralement et émotionnellement, et qui a enduré toutes mes angoisses et mes réflexions. Merci du fond du cœur.



# Chapitre 1 – Introduction

*(Dans le texte qui suit, le générique masculin est utilisé uniquement dans le but d'en alléger la forme et d'en faciliter la lecture.)*

## 1.1 Contexte

L'impact économique du cirque à Montréal et le Québec est colossal. Le Cirque du Soleil, la compagnie de plusieurs milliards de dollars, garde la création et l'administration à son siège social à Montréal (Spiegel et Parent, 2018). Au début de l'année 2012, le Cirque du Soleil a créé plus de vingt-cinq productions uniques au cours de ses vingt-huit ans d'histoire. Cette compagnie a eu un impact indéniable sur le milieu du divertissement mondial de la fin du XXe siècle et du début du XXIe siècle. Son esthétique, sa vision artistique et son intérêt vers les technologies suscitent l'intérêt. L'influence locale du Cirque du Soleil est également phénoménale. Cette compagnie a engendré l'émergence d'un certain nombre de compagnies à Montréal, comme le Cirque Éloïse ou Les 7 Doigts de la Main. Ces deux compagnies ont un budget opérationnel d'environ 10 à 12 millions de dollars chacune (Leroux et Batson, 2016). Le Québec compte également de nombreuses troupes, des organismes de cirque social, l'École nationale de cirque (école de formation professionnelle), le festival Montréal complètement cirque, la Tohu (salle de spectacle dédiée aux arts du cirque), le Centre de recherche, d'innovation et de transfert en arts du cirque (CRITAC) et toutes les autres écoles et studios professionnels ou récréatifs.

Les arts du cirque se sont dernièrement popularisés et suscitent un vif intérêt chez les amateurs, comme illustré par le nombre croissant d'écoles de loisirs. L'enseignement des arts du cirque se faisait traditionnellement par une famille de cirque, qui prenait sous son aile le futur artiste. Aujourd'hui cette tradition est remplacée par des écoles professionnelles qui forment au métier d'artiste de cirque professionnel. Les techniques acrobatiques ainsi que les réflexions sur les techniques d'apprentissage ont subi un accroissement (Etienne et al., 2014; Froissart et Thomas, 2018). Plusieurs éléments expliquent cet accroissement. On peut notamment citer le développement des écoles de loisirs, de la reconnaissance via un diplôme, de la formation au

métier d'acrobate et de l'influence d'autres arts et sports (Centre national des arts du cirque et al., 2018).

Les spectacles de cirque fascinent et captivent énormément de spectateurs. Les artistes du Cirque du Soleil font en moyenne 476 spectacles par an et s'entraînent 2h par jour (InBody, 2017). Alors que la portée des arts du cirque et les opportunités de développement des artistes ont augmentés ces dernières années, les méthodologies utilisées pour soutenir les artistes continuent de s'appuyer largement sur les pratiques du cirque traditionnel. Certaines compagnies essaient d'introduire des approches provenant du milieu sportif. Cette situation a entraîné des lacunes importantes dans les connaissances concernant l'optimisation des équipements ou de la performance dans les arts du cirque. Aujourd'hui, la volonté des compagnies de cirque est de mieux comprendre l'impact de l'activité du cirque sur le corps afin d'optimiser l'entraînement et de garder les artistes à leur plus haut niveau le plus longtemps possible. Le processus de prise de décision est conçu de manière éclairée et il passe par une meilleure compréhension des charges de travail lors de la performance par l'acquisition et l'analyse de données. Cette connaissance améliorera la capacité des entraîneurs à prendre des décisions objectives sur l'état de préparation d'un artiste et peut-être à prévoir les moments où un artiste peut ne pas être à pleine puissance. Afin de mieux comprendre des systèmes complexes, le milieu sportif incorpore de plus en plus des systèmes d'aide à la décision basés sur de l'analyse de données (Robertson, 2020) et c'est aussi la direction vers laquelle tend le cirque.

Les artistes et compagnies de cirque amènent des compétences techniques ainsi que du contenu artistique, mais leur performance est soumise aux exigences du public, des employeurs ou des diffuseurs. Ils doivent sans cesse innover pour rester concurrentiels ou attirer du public. Pour garder la performance des artistes à leur plus haut niveau, les équipements de cirque sont optimisés. En effet soumis à aucune régulation ou standardisation, les équipements de cirque peuvent être personnalisés pour s'adapter au mieux à la performance souhaitée, comme le sont certains équipements de sport comme les skis. Cependant, modifier la forme ou les matériaux d'un équipement de cirque amène des inconnus. Les impacts sur la performance restent encore peu clairs et l'optimisation des équipements de cirque se base le plus souvent sur de l'essai-erreur. De plus, de nombreuses compagnies n'ont pas les moyens de se permettre la fabrication

de plusieurs prototypes, donc très souvent le premier prototype fabriqué est souvent l'équipement qui se retrouver sur scène. Ainsi l'acrobate doit adapter son mouvement à l'équipement.

Traditionnellement, la conception d'appareils, outils ou équipements (ex. : sportifs) vise à maximiser l'ajustement entre l'objet et son utilisateur basé sur des contraintes biomécaniques et musculosquelettiques liées à l'anatomie et la physiologie de l'utilisateur (Dul et al., 2012; Salvendy, 2012). Cette approche permet d'améliorer l'efficacité, la performance, le bien-être ou la sécurité de l'utilisateur. Les utilisateurs d'outils ou d'équipements (comme les sportifs de haut niveau ou les acrobates de cirque), experts de leur discipline, poussent à l'extrême leur efficacité à utiliser un outil ou un équipement (ex. : un bâton de hockey ou un trapèze), qui devient une extension de leur corps et ainsi de leur perception et action. Réussir un mouvement avec un outil ou un équipement dépend à la fois des caractéristiques de l'outil ou de l'équipement, de l'action de l'utilisateur et donc de l'interaction résultante entre les deux systèmes, humain et équipement. En sport, tout changement dans l'environnement de performance entraîne une adaptation de certains aspects des mouvements des athlètes (Shan, 2008). La modification des équipements peut donc altérer les performances. Sans une compréhension approfondie des interactions entre la modification des équipements et l'adaptation des commandes motrices humaines, l'optimisation des équipements peut vite devenir une approche imprécise. Les analyses d'équipements sportifs comme les bâtons de hockey ou les clubs de golf consistent à quantifier le mouvement avec plusieurs conceptions d'équipement pour trouver le produit qui améliore le mouvement (Shan, 2008). Cette façon de procéder révèle les différences entre les produits, mais n'explique pas les causes sous-jacentes. Pour cela il faut étudier l'interaction entre l'athlète et l'équipement puisque toute variation d'équipement induit une variation de performance.

## **1.2 Problématique générale**

L'équipement de cirque étudié durant cette thèse est la planche coréenne. La planche coréenne est constituée d'une longue planche en bois qui bascule autour d'un point de pivot au milieu situé sur une base en métal (Figure 1). Les acrobates placés à chaque extrémité sautent chacun à leur

tour, grâce au mouvement de bascule et de retour de flexion de la planche. La planche travaille donc en grand déplacement et avec un comportement élastique. Le système dynamique constitué de la planche et des deux acrobates est riche et difficile à modéliser avec précision. En effet, le mouvement de la planche et des deux acrobates est interreliés : la réception d'un acrobate fait pivoter la planche, ce qui permet à l'autre acrobate de s'élancer dans les airs, qui se réceptionne à son tour, etc. La technique pour l'impulsion dans les airs consiste à déplier les membres inférieurs lors de la rotation de la planche, il convient de commencer juste avant la rotation de la planche. Les professionnels emploient le terme d'allègement (FEDEC, 2009). Lors de la réception, les acrobates utilisent ce qu'ils appellent une poussée. Il s'agit d'avoir une flexion et une extension des jambes lors de la réception avec la planche, similaire à la technique de trampoline, pour effectuer un transfert mécanique pour l'autre acrobate. La flexion est en général commencée avant le premier contact avec la planche. Se réceptionner d'une hauteur de 3-4m de haut sur une planche rigide mobile d'une largeur de 42 cm n'est pas sans risque. Cependant, même si les blessures des acrobates de cirque sont documentées (Shrier et al., 2009), aucune n'est spécifique à la discipline de planche coréenne, il est donc très difficile d'avoir des chiffres précis. L'entraîneur de l'École nationale de cirque et du Cirque du Soleil explique que ce sont surtout des blessures aux chevilles, en énonçant le chiffre d'une cheville par mois environ au Cirque du Soleil. L'artiste Karim Randé, co-fondateur de la compagnie française Bancale, s'est fait amputer la jambe suite à une chute en bascule coréenne en 2014, dans laquelle il se brise la cheville de manière irréversible (Belotti, 2021).

La planche est fabriquée dans un matériau naturel (le bois) et a une épaisseur qui varie le long de sa longueur. Les dimensions de fabrication de la planche sont en constante évolution. Les professionnels sont pris entre l'accroissement des performances acrobatiques et le manque de connaissance du lien entre la conception de la planche et la performance acrobatique. Les acrobates, les entraîneurs et les concepteurs d'équipements bénéficieraient d'avoir plus d'informations sur la biomécanique spécifique de la performance en planche coréenne afin d'améliorer le développement des techniques acrobatiques et la conception des planches. À ce jour, à notre connaissance, aucune mesure ou analyse mécanique ou biomécanique n'a été réalisée sur la discipline de planche coréenne.



**Figure 1.** – Planche coréenne, École nationale de cirque © Roland Lorente

Au hockey sur glace, les bâtons en bois ont été remplacés par des bâtons en matériaux composites. L'intérêt vers les matériaux composites est dû à la capacité de modifier les caractéristiques mécaniques, rigidité et masse, pour répondre aux besoins individuels des athlètes. Il est très fort probable que la fabrication de planche coréenne se tourne aussi vers les matériaux composites. Or sans données de caractérisation mécanique ou biomécanique, il est difficile de concevoir de nouvelles planches.

Il est courant pour les entraîneurs, les acrobates ou les compagnies de cirque d'initier des changements dans la fabrication de leur planche coréenne pour diverses raisons : augmentation des techniques acrobatiques, amélioration des performances, prévention des blessures, niveau d'apprentissage (planche pour étudiants vs planche pour professionnels), aspect esthétique, etc. Le processus de modification de la conception des planches a un impact direct sur la performance et sur le « modèle » utilisé dans le milieu. Pourtant ces modifications de conception et leur impact relèvent de l'essai-erreur et n'ont pas été étudiés en profondeur.

Il n'existe à ce jour aucun écrit dans la littérature scientifique rapportant une analyse biomécanique, cinétique ou cinématique, en planche coréenne ni d'analyse mécanique du

comportement planche. À part le rapport sur les techniques de base de la fédération européenne des écoles de cirque professionnelles (FEDEC, 2009), la technique acrobatique n'a jamais été étudiée ou expliquée en détail. Étant donné le manque de recherche spécifique au cirque et notamment sur la discipline de la planche coréenne, il est essentiel que nous commençons à développer un ensemble de connaissances spécifiques sur le mouvement des acrobates.

## Chapitre 2 – Revue de littérature

Le but de ce chapitre est de fournir une revue de littérature de la discipline de planche coréenne en cirque et des techniques de mesure en biomécaniques. Ce chapitre se décompose en quatre parties. La première permet de définir les arts du cirque et la planche coréenne. Dans les parties suivantes, l'analyse du saut puis l'analyse de sport similaire à la performance de planche coréenne sont exposées. Enfin, les outils utilisés pour mesurer la cinématique, la cinétique et l'activité musculaire ainsi que l'outil statistique utilisé sont introduits dans la dernière partie.

### 2.1 Les arts du cirque et la planche coréenne

#### 2.1.1 Les arts du cirque

Le cirque est un spectacle qui expose les prouesses physiques et artistiques défiant les limites des réalités physiques (Harvie et Hurley, 1999), tout comme l'incroyable fragilité du corps. Goudard (2011) définit le cirque par une prise de risque:

L'artiste de cirque rompt l'état stable statique ou dynamique en se plaçant volontairement une situation de déséquilibre qu'il résout par une figure ou une posture pour revenir ensuite à l'état stable.

Le cirque est encore relativement peu formalisé au niveau des terminologies donc plusieurs termes peuvent exister ou ne pas être clairement défini. Plusieurs modèles de production dessinent le paysage du cirque : le cirque traditionnel, le cirque d'aujourd'hui, le Nouveau Cirque et le cirque contemporain (Perahia, 2021; Bibliothèque Nationale de France, 2009; Trapp, 2019; Lavers et al., 2019). Le cirque traditionnel est un art populaire qui se définit par une succession de numéros sans rapport les uns avec les autres, par un côté spectaculaire important, dans une forme familiale et généralement avec animaux. Le Nouveau Cirque est né en France dans les 1970 et évoluent ensuite vers le cirque contemporain. Ce courant est influencé par les autres formes d'art (théâtre, danse, musique...) et se caractérise par l'abandon des animaux et du côté spectaculaire, ainsi que l'apparition d'une narration. Le terme de cirque contemporain peut être connoté et n'est pas accepté par tous les acrobates (Perahia, 2021). Les spectacles actuels gardent

encore les traces de cette histoire. Le cirque d'aujourd'hui est l'ensemble des formes de cirques actuels, hormis le cirque traditionnel. En Amérique du Nord, la création du Cirque du Soleil en 1984 a capté l'attention du public vers le cirque d'aujourd'hui contrairement aux cirques traditionnels comme Ringling Bros ou Barnum & Bailey.

Il n'est pas surprenant que la plus forte croissance du nouveau cirque ait eu lieu au Québec, car un important soutien gouvernemental a nourri un certain nombre de compagnies naissantes comme le Cirque de Soleil, le Cirque Éloïse et les 7 doigts de la Main. La communauté du cirque a poussé pour amener le cirque dans une forme plus artistique et les efforts de nombreuses compagnies et organisations ont abouti à ce que le cirque soit reconnu comme un art.

L'appellation « les arts du cirque » indique la variété de disciplines dans lesquelles œuvrent les artistes. Pascal Jacob, auteur et historien des arts du cirque, distingue quatre grandes familles : acrobatie, jonglerie et magie, clowns et dressage (Bibliothèque Nationale de France, 2009). Les disciplines évoluent sans cesse et peuvent être combinées entre elles. Les circassiens s'adaptent, incorporent des composantes extérieures et font émerger de nouvelles formes et figures inédites.

Le cirque est intéressant non seulement en raison de son histoire et de son évolution, mais aussi parce qu'il connaît actuellement une popularité croissante. Des chiffres exacts sont difficiles à trouver, on peut qu'observer le nombre croissant de spectacles, d'écoles ou d'organismes. Cependant, peu de recherches ont été menées sur l'industrie du cirque d'aujourd'hui en raison de sa taille relativement petite et de sa nouveauté.

### **2.1.2 La planche coréenne**

La planche coréenne, ou bascule, ou bascule coréenne, est une discipline de cirque considérée parmi les plus dangereuses et exigeantes (Hamel, 2016). Il s'agit d'une longue planche à bascule sur laquelle deux acrobates placés à chaque extrémité sautent verticalement chacun à leur tour, tout en effectuant des acrobaties. Les acrobates sautent à une hauteur d'environ 3-4 mètres et se réceptionnent sur une surface pivotante d'une largeur de 40 à 50 cm, et ce continuellement puisqu'ils enchainent les sauts.

Le peu de littérature qui existe sera cité dans cette section, mais il faut cependant noter qu'étant donné le peu de chercheurs présents dans le milieu, les sources n'ont pas été relues et corrigées par des pairs comme cela se fait en sciences. Le chapitre 9 des manuels d'instruction de base pour les arts du cirque de la FEDEC (2009) concerne la bascule. Il n'y a pas de fabrication, ni de technique d'apprentissage standard, le manuel exprime très bien cette idée par les phrases suivantes :

Nous sommes un peu prisonniers de notre histoire et il y a encore beaucoup de préjugés, d'incertitudes pour que ce moyen de propulsion puisse avoir une évolution moderne transmissible à toutes les écoles. Il n'y a pas en effet une vérité, mais des réalités liées au parcours des enseignants, au niveau des étudiants et des objectifs et moyens financiers des écoles.

Il est assez difficile dans le milieu des arts du cirque d'avoir des écrits qui retracent l'évolution de la discipline ou la fabrication d'un équipement de cirque puisque le savoir se transmet de façon orale. Les guides de la FEDEC (2009) sont dans les premières initiatives qui regroupent le savoir des professionnels du milieu.

La planche coréenne est différente de la planche sautoir (aussi appelé bascule hongroise). Même si toutes deux ont une forme similaire, leurs origines et utilisations diffèrent beaucoup.



**Figure 2.** – Exemple de performance en planche sautoir, ([http://expositions.bnf.fr/cnac/grand/cir\\_2468.htm](http://expositions.bnf.fr/cnac/grand/cir_2468.htm)). © Photo Daniel Cande / Bibliothèque nationale de France.

Denis (2001) donne la définition suivante pour la planche sautoir:

Sorte de grande planche matelassée à son extrémité, pivotant sur un socle. [...] Le voltigeur se tient sur le bord de la bascule touchant le sol. Son partenaire, le tapeur appelé parfois frappeur, est juché sur un piédestal. Il saute sur la partie haute de la planche. Celle-ci pivote, et envoie le voltigeur dans les airs. (Denis, 2001)

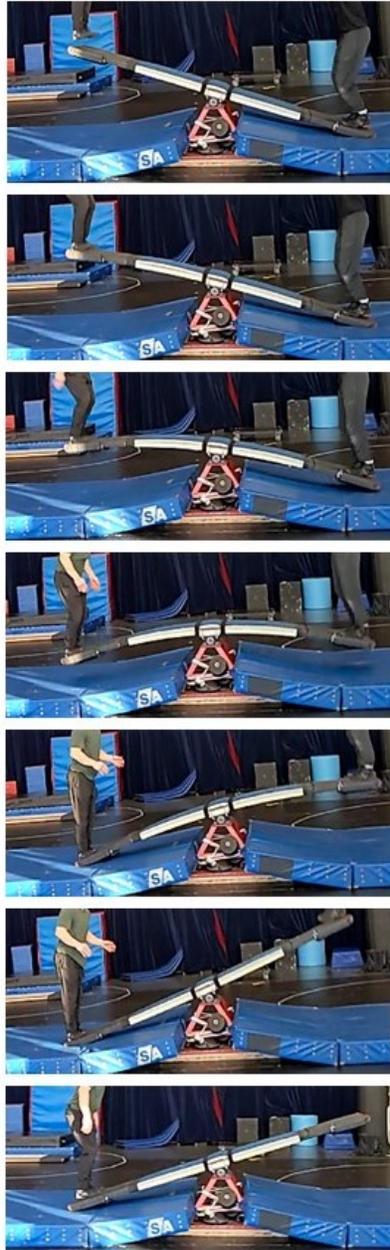
La planche sautoir vient d'un jeu d'enfant appelé « tape-cul », d'où l'utilisation des termes « tapeur » ou « frappeur » (Hamel, 2016). Le voltigeur (acrobate qui effectue de la voltige dans les airs) se tient sur un bord de la planche. Son partenaire, le « tapeur », est juché sur un piédestal. Il saute sur la partie haute de la planche. Celle-ci pivote, et envoie le voltigeur dans les airs. Au XVIIIe siècle, lors de jeux populaires, l'acrobate cherche une source de propulsion, mais cela devait sûrement ressembler à une catapulte humaine avec une planche en bois (Schulte, 2009). Il est toujours difficile de trouver les origines ou les inventeurs des disciplines de cirque, mais l'origine de la planche sautoir est attribuée à la fin du XIXe siècle à Fred Lamont (Schulte, 2009). La planche sautoir est principalement utilisée pour faire des sorties, c'est-à-dire une propulsion vers l'extérieur de l'équipement. Un ou plusieurs acrobates fournissent une poussée mécanique au voltigeur qui atterrit très souvent sur un matelas après avoir exécuté son saut acrobatique (Figure 2). Ce système de propulsion permet au voltigeur de réaliser des sauts difficiles tels que le triple ou le quadruple saut périlleux (saut où le corps doit réaliser un tour complet sur lui-même) (Jando & Gault, 1977). La planche coréenne est similaire à une planche sautoir dans sa forme, mais la performance est bien différente. En planche coréenne, les deux acrobates retombent sur la planche et se donnent donc l'impulsion pour continuer de sauter chacun à son tour et sans arrêt.

L'origine de la planche coréenne est attribuée aux artistes de Corée du Nord (Hamel, 2016). Le *Neoldduigi* est un jeu de bascule traditionnel féminin sous la dynastie Joseon, ou Yi, (1392-1910). Hamel (2016) nomment les troupes de Pyong-Yang ou des Picchiani dans les années 30 qui ont perfectionné cette discipline. En revanche, selon Denis (Denis, 2001), les premiers acrobates de Corée du Nord à avoir exposé cette discipline remonte au cirque Royal de Bruxelles en janvier 1978. Les sources sont rares et peuvent se contredire.

### 2.1.3 Technique acrobatique en planche coréenne

Étant donné le peu de références disponibles, il a été nécessaire d'abord de décrire le mouvement afin de proposer une méthodologie et de pouvoir l'étudier. Pour ce faire, un questionnaire ou une entrevue (approuvé par le CER de l'Université de Montréal) ont été envoyés ou réalisés avec plusieurs acrobates et enseignants de la discipline afin de mieux comprendre les enjeux autour de cette discipline. Une copie du questionnaire se trouve en Annexe 1. Les informations récoltées sont présentées dans cette section et les prochaines sections afin de mieux contextualiser la performance et la fabrication de l'équipement.

Le pivot au centre de la planche permet le mouvement de la planche à chaque extrémité sur une course verticale d'environ 60-70 cm. L'atterrissage d'un acrobate sur la planche fait pivoter la planche, ce qui permet de 'pousser' l'acrobate-partenaire dans les airs. De plus, lors de l'impulsion, les acrobates se servent de ce qu'ils appellent le *whip*. La planche n'est pas entièrement rigide, elle se déforme en flexion sous le poids et la vitesse de chute des acrobates (Figure 3). Les acrobates se servent donc de deux mouvements de la planche pour donner l'accélération nécessaire pour sauter haut : la rotation de la planche et le retour de flexion de la planche (*whip*).

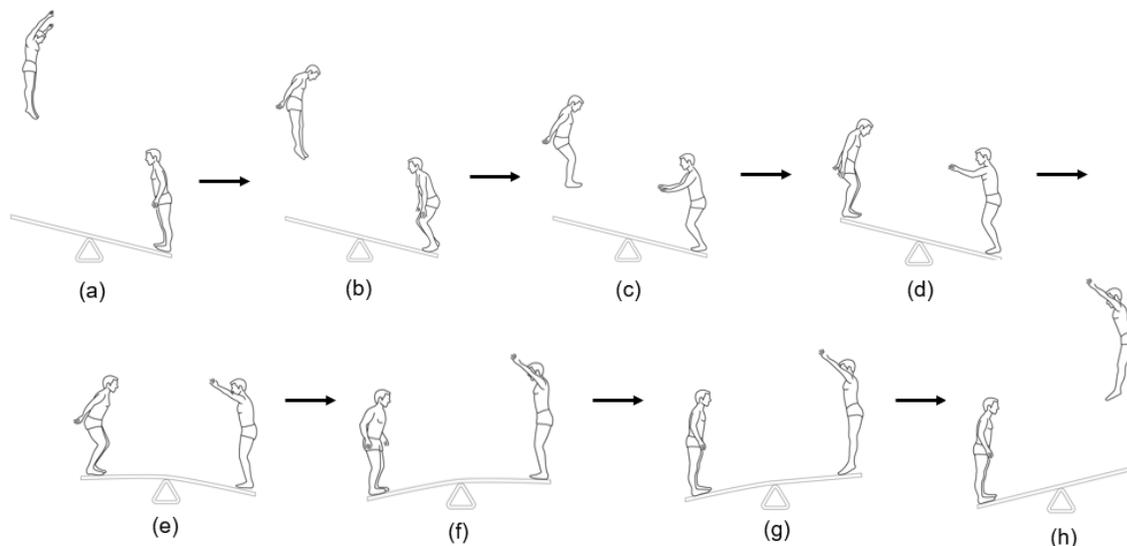


**Figure 3.** – Mouvement et déformation de la planche lors d’une réception (acrobate de gauche) et du décollage (acrobate de droite)

À l’impulsion, l’acrobate enclenche son mouvement de propulsion bien avant que l’acrobate d’en face n’atterrisse sur la planche. Il utilise une flexion des genoux et des hanches et amorce son extension juste avant que débute le mouvement de la planche (Figures 4b et 4c). Il continue son extension en commençant par les genoux et finissant par les hanches, en même temps que la

planche le pousse vers le haut. Les épaules sont légèrement avancées. Les bras commencent en bas et sont propulsés vers le haut en avant en synchronisation avec l'extension des genoux et des hanches. Quand la planche commence à bouger, les bras sont placés horizontalement devant l'acrobate (Figure 4d). Lors du dernier contact avec la planche, les bras sont à 45 degrés vers le haut par rapport à l'horizontale et finissent leur montée dans la phase aérienne. Lors du dernier contact avec la planche, l'acrobate pousse avec une flexion plantaire et une extension des orteils tout en gainant le tronc et avec une légère poussée des pieds vers l'avant. Ce mouvement permet de contrer la poussée de la planche, sinon les pieds sont éjectés vers l'avant du fait de l'angle de la planche.

Lors de la réception, les acrobates utilisent la technique de « pousser dans la planche », qui est une technique proche de celle utilisée en trampoline. Habituellement, il est recommandé à tous les sportifs exécutant des sauts ayant des impacts comme au volleyball, d'amortir leur réception, c'est-à-dire de résister à la flexion au niveau de l'articulation des chevilles, genoux et hanches (Bressel et Cronin, 2005). En planche coréenne, c'est différent. Il est demandé à l'acrobate d'utiliser une flexion des membres inférieurs avant de toucher la planche et d'utiliser une extension de ses membres inférieurs au moment où il atterrit sur la planche pendant que celle-ci effectue sa rotation. Il s'agit d'avoir cette image de « pousser dans la planche ». L'acrobate arrive sur la planche avec une flexion des hanches et des genoux, les talons ou le pied au complet touchent en premier, les épaules légèrement devant par rapport au bassin, les bras le plus bas possible le long du corps (Figure 4d). Le corps est légèrement penché vers l'avant, et les pieds sont amenés sous le centre de masse juste avant de toucher la planche pour une poussée optimale. Le corps se redresse en poussant sur la planche, ce qui amène plus de pression au niveau des pieds (Figures 4e et 4f). Une autre technique consiste à se réceptionner avec les jambes tendues et à garder les jambes tendues tout du long de l'atterrissage. Ces deux techniques assurent de donner assez d'élan pour que l'autre acrobate puisse s'élancer (FEDEC, 2009). La partie la plus critique du mouvement en planche coréenne est selon les professionnels, la réception. Il est en effet impératif d'avoir une bonne synchronisation du mouvement de poussée dans la planche avec le mouvement de rotation de la planche afin que l'acrobate-partenaire puisse avoir la bonne impulsion.



**Figure 4.** – Séquence de mouvements en planche coréenne.

Plusieurs erreurs peuvent survenir lors de la pratique en planche coréenne. La réception peut être manquée si l’acrobate n’atterrit pas sur la zone délimitée. Une réception trop à droite ou trop à gauche est le mouvement qui génère le plus de blessures (entorse ou plus grave comme une déchirure du ligament croisé). Une réception trop en arrière peut aussi être grave s’il n’y a pas de matelas en dessous de la zone de réception. Aujourd’hui, la pratique se fait avec un matelas d’une épaisseur de 20 cm environ, mais il y a quelques années, on pouvait trouver des acrobates qui performaient sans matelas. Une chute en dehors de la planche signifiait une chute directe sur le sol et cela peut être du béton selon les studios. Un mouvement considéré dangereux par les entraîneurs et les acrobates est la planche vide. Si un acrobate lors de son atterrissage perd l’équilibre et sort de la planche, son collègue en face tombe ensuite une planche sur laquelle il n’y a personne pour faire contrepoids. L’acrobate atterrit donc directement sur la planche (sans résistance) et donc le matelas (ou le sol s’il n’y a pas de matelas). C’est une situation très fréquente chez les débutants, c’est pourquoi un des premiers mouvements enseignés est d’amortir la chute en situation de planche vide. De plus, l’enseignant peut lancer un matelas sur la planche pour mettre du poids, ou si le cours est donné à plusieurs étudiants, il y a souvent un acrobate (appelé un pareur) qui se place en arrière pour repositionner l’acrobate-collègue qui chuterait sur la planche ou pour prendre sa place s’il avait chuté trop loin. Un autre défaut

consiste aussi à se mettre en position fléchie lors de la préparation à l'impulsion et de rester dans cette position (FEDEC, 2009). Lorsque la planche commence son mouvement, l'acrobate n'est donc pas prêt et il peut y avoir un délai entre son mouvement d'extension et le mouvement de la planche, ce qui peut nuire à la performance. Une flexion des membres inférieurs trop prononcée peut aussi nuire à l'impulsion pour la même raison. Enfin, si le tronc est trop penché vers l'avant, que ce soit à l'impulsion ou à la réception, cela peut déséquilibrer l'acrobate et décaler horizontalement la trajectoire verticale de saut (FEDEC, 2009).

#### **2.1.4 Mécanique de la planche coréenne**

La planche coréenne présentée à la Figure 5 est aujourd'hui constituée d'une planche en bois rigide, de frêne blanc, dont l'épaisseur varie sur la longueur (plus épaisse au centre et plus mince aux extrémités). De la fibre de verre est habituellement placée sur l'extrémité et au centre de la planche, afin de renforcer les endroits où les contraintes sont les plus grandes. Une base en acier assez lourde permet la rotation de la planche grâce à un pivot. La planche est encastrée généralement entre deux plaques placées au-dessus du pivot. De la mousse est placée sur le dessus de la planche afin de rendre les réceptions plus confortables.



**Figure 5.** – Planche de l'École nationale de cirque sans la mousse qui recouvre toute la planche.

Avant les années 2000, les planches fabriquées n'étaient pas très longues et la longueur fut petit à petit agrandie afin de maximiser le renvoi de flexion de la planche. La FEDEC indique que la longueur peut varier entre 2.5 et 4 m (FEDEC, 2009). Le modèle créé sur le spectacle Corteo par le Cirque du Soleil en 2005 est devenu une sorte de référence pour beaucoup d'acrobates au Québec. Les planches fabriquées ensuite suivent à peu près le même modèle (à quelques modifications près). Avoir une certaine uniformité dans la conception des planches permettrait un remplacement plus rapide d'un acrobate. Si une planche est complètement différente, il y a tout un apprentissage à effectuer pour s'adapter au comportement de cette planche. Un autre élément aussi qui est important à considérer est la hauteur du pivot. Ce dernier modifie l'angle de la planche et dépend de la hauteur du matelas utilisé. La FEDEC rapporte que la hauteur de l'axe se situe entre 30 et 70 cm (FEDEC, 2009). Une hauteur plus accentuée est préférable pour avoir une hauteur de saut plus élevée, cependant si la hauteur du pivot est trop grande, l'angle devient trop prononcé et ça peut être inconfortable pour les acrobates (étirement des mollets) et c'est plus difficile pour garder l'équilibre. Il y a donc un compromis à trouver qui dépend des préférences des acrobates. Depuis 2005, les techniques acrobatiques ont beaucoup évolué et la tendance actuelle est d'augmenter la largeur de la planche pour permettre les erreurs de translations à la réception. En effet, traditionnellement, les planches sont fabriquées avec une largeur de seulement 42 cm. Une réception avec un décalage vers la droite ou la gauche de la planche peut être à l'origine de blessures. Afin de diminuer ce risque de blessure, le Cirque du Soleil a fabriqué des plateformes placées de chaque côté de la planche. Celles-ci sont actuellement utilisées en spectacle bien qu'elles gênent la vue de la planche. Une autre option serait donc d'élargir la planche. La dernière planche achetée par l'École nationale de cirque à Montréal a une épaisseur de 50 cm. Cependant, changer la largeur modifie les propriétés mécaniques de la planche et donc le whip. La technique de conception d'une planche en bois est de fabriquer une planche avec des dimensions qui fonctionnent, de faire essayer la planche et par la suite d'enlever de la matière par couche de 1 mm d'épaisseur jusqu'à l'obtention de la bonne flexibilité de la planche. Ensuite un recouvrement à base de fibre de verre est appliqué au centre et aux extrémités de la planche (dans les zones les plus sollicitées mécaniquement) afin de fixer l'ensemble. Cette méthode de fabrication est cependant longue et coûteuse puisqu'elle peut

nécessiter 2 ou 3 allers et retours chez le fabricant. De plus, l'ajout de fibre de verre peut dès fois rendre la planche trop rigide et une fois la fibre de verre installée, il est impossible d'enlever une autre épaisseur de bois.

Il est important de noter que les professionnels à travers le monde ne sont pas tous d'accord sur les caractéristiques que devraient avoir la planche et surtout l'influence que peut avoir la conception de la planche sur la performance. Les dimensions varient de beaucoup entre la hauteur du pivot (qui va aussi dépendre de la hauteur des matelas), la largeur de la planche, l'épaisseur au centre et à l'extrémité ou la longueur. Des essais sur les différentes dimensions sont effectuées quand une compagnie peut se le permettre, mais la réalité est que les acrobates n'ont pas les moyens de fabriquer plusieurs planches pour trouver celle qui leur correspond le plus et vont donc vers ce qu'ils connaissent ou sont habitués. De plus, s'adapter à une nouvelle planche peut être long.

La raideur ou la souplesse, notamment à travers la notion du whip, est souvent un élément critique rapporté par les professionnels de cette discipline. Une planche très rigide permet peu d'erreurs dans le temps des départs des sauts et génère des impacts plus forts sur le corps. Une planche trop molle perd un peu en efficacité pour redonner l'énergie d'un côté à l'autre et il faut, en plus calculer un délai avant de recevoir la poussée de l'acrobate-partenaire. Trouver la bonne souplesse pour une planche est un défi.

Fabriquer la planche en bois comporte quelques inconvénients comme le fait que le bois est un matériau naturel et fibreux. Les caractéristiques mécaniques du bois peuvent varier selon les défauts du bois ou la provenance du bois. Il est donc plus difficile de contrôler ces paramètres lors de la fabrication, d'où la façon de fabriquer par étape. Le module d'Young peut de plus varier selon les températures, il a été démontré que le module d'Young diminue avec la température (Bodig et Jayne, 1982). Les propriétés mécaniques du bois sont altérées par plusieurs variables, notamment par l'humidité, la masse volumique, la température, la durée du chargement et les défauts. Les acrobates performant aussi bien en Asie dans un milieu chaud et humide, qu'à l'extérieur en hiver au Québec donc très froid, ce qui demande aux acrobates de constamment s'adapter au comportement de la planche pour éviter de se blesser. En outre, contrairement aux

métaux, le bois présente un comportement mécanique différent selon la direction, soit longitudinale, radiale ou tangentielle. Il est considéré ainsi comme étant un matériau anisotrope mais localement orthotrope (Tsoumis, 1991). Il est difficile de fournir une durée de vie des planches. Les planches du Cirque du Soleil durent entre 6 et 9 mois environ tandis que les planches de l'École nationale de cirque peuvent aller jusqu'à 2 ou 3 ans de vie.

La FEDEC (2009) rapporte d'autres matériaux pour fabriquer la planche : plusieurs planches de bois accolées l'une à l'autre, en fibre de verre ou en lamellé collé. Le guide de la FEDEC indique aussi l'échec de fabriquer la planche en métal car la masse morte devient trop grande. Des essais ont aussi été effectués à Montréal en fabriquant une planche à partir de plusieurs barres de saut à la perche, mais le retour d'énergie était trop grand et éjectaient les acrobates trop rapidement, ce qui déstabilisait ces derniers et n'a donc pas été poursuivi. La recherche autour de cet équipement est encore empirique et peu documentée.

## **2.2 Le saut**

La suite de la revue de littérature se concentre sur des disciplines sportives similaires à la performance en planche coréenne. Le premier mouvement à étudier est donc la capacité à sauter, puisque les acrobates effectuent des sauts.

### **2.2.1 La découpe en phases**

Toute activité physique peut se subdiviser en sous-activités, appelée phases. La phase a une durée déterminée et est délimitée par des événements ou des incidents ponctuels. Une étude a récemment mis en avant les six phases du saut vertical avec contremouvement (élan) et comment les identifier (McMahon et al., 2018). Celles-ci sont : la pesée, le délestage, la décélération (freinage), la propulsion, la phase de vol et la réception. La pesée permet de mesurer le poids corporel pendant que le participant reste immobile. Le délestage (unweighting phase en anglais) se caractérise par la flexion de la hanche, des genoux et chevilles et la force de réaction mesurée est inférieure au poids du participant. La décélération (braking phase) est associée à la décélération du centre de masse (CM) du participant (ou une accélération négative). Cette phase se termine lorsque la vitesse du CM est nulle, il s'agit de la pause tout en bas avant l'élan. Dans la

phase suivante, la propulsion, les hanches, genoux et chevilles s'étendent pour donner l'élan jusqu'au dernier contact avec le sol. Ensuite, la phase de vol est tout simplement le temps passé dans les airs qui finit avec la réception sur le sol. En trampoline, les chercheurs divisent le mouvement entre deux ou trois phases : la phase de vol ainsi que la phase de réception et la phase d'élan qui peuvent être considérées comme une seule phase : la phase de contact (Helten et al., 2011). Il a été observé que l'athlète rigidifie les angles de ses membres inférieurs lors de la descente pour transférer son énergie cinétique en énergie potentielle élastique à la toile, et exécute une extension explosive rapide des membres inférieurs lors du mouvement de décollage pour se donner l'élan nécessaire (Qian et al., 2020). En plongeon de 1 à 3 m, le tremplin est souple et le mouvement se décompose en cinq phases : préparation (constituée de quelques pas), le saut (sur le tremplin), le contact avec le tremplin, la phase de vol et l'entrée à l'eau (Miller, 2000). La réussite du plongeur à sauter réside à mettre en mouvement le tremplin lors de son saut, à amener le tremplin à une position la plus courbée possible et à récupérer le renvoi de flexion.

Il a été nécessaire de découper le mouvement exécuté en planche coréenne en phases afin de l'étudier. Nous proposons de diviser le mouvement de l'acrobate en six phases : une phase d'attente au sol sur la planche, une phase de préparation à l'impulsion, une phase d'impulsion avec la rotation de la planche vers le haut, une phase aérienne, une phase de préparation à la réception et une phase de réception avec la rotation de la planche vers le bas. La Figure 4 présente la séquence de mouvement. Les phases de mouvement sont comme suit : (a) acrobate à gauche dans la phase aérienne, acrobate à droite dans la phase au sol, (b) acrobate à gauche dans la phase aérienne et acrobate à droite dans la phase de préparation à l'impulsion, (c) acrobate à gauche dans la phase de préparation à la réception et acrobate à droite dans la phase de préparation à l'impulsion, (d) acrobate à gauche dans la phase de réception et acrobate à droite dans la phase d'impulsion, (e) acrobate à gauche dans la phase de réception et acrobate à droite dans la phase d'impulsion, (f) acrobate à gauche dans la phase de réception et acrobate à droite dans la phase d'impulsion, (g) acrobate à gauche dans la phase au sol et acrobate à droite dans la phase d'impulsion, et (h) acrobate à gauche dans la phase au sol et acrobate à droite dans la phase aérienne.

La phase d'impulsion et de réception sont cruciaux au mouvement. La phase aérienne et l'exécution de mouvement acrobatique ne sont souvent pas la difficulté principale en planche coréenne puisque souvent les acrobates ont une formation au préalable ou en parallèle en trampoline pour couvrir tous les aspects acrobatiques de la phase aérienne. Le défi principal est de comprendre le transfert mécanique de la planche (FEDEC, 2009). De plus, avant de pouvoir effectuer des sauts acrobatiques, les acrobates ont besoin d'une certaine hauteur de saut, ce qui demande 3 à 4 sauts avant d'atteindre une hauteur minimale. La hauteur de saut est importante à analyser, au moins dans un premier temps, afin de mieux comprendre comment l'acrobate peut réaliser des acrobaties. Les acrobates ont une formation en trampoline avant ou pendant leur début en planche coréenne. La partie aérienne est en général connue des acrobates. Le principal défi lors du passage du trampoline à la planche réside à comprendre la mécanique d'atterrissage et de réception avec la planche et avec le partenaire. Le mouvement spécifique de transfert sur la planche est souvent un frein au début dans la prise de hauteur de saut et donc dans l'exécution des figures acrobatiques. Il peut aussi arriver que l'acrobate n'atterrisse pas adéquatement, ce qui peut prendre quelques sauts avant de pouvoir effectuer un saut acrobatique, surtout chez les débutants. Du fait de l'angle de la planche, les acrobates débutants atterrissent souvent trop en avant, ce qui coupe la poussée et donc la hauteur de saut du partenaire. Il peut aussi arriver que l'acrobate atterrisse trop sur le côté ou sur l'arrière, ce qui demande à l'acrobate de se relever s'il a chuté et de se réajuster sur la planche.

### **2.2.2 La biomécanique du saut**

Plusieurs formes de saut ont été étudiées dans la littérature scientifique : la chute (drop jump), le saut accroupi (squat jump) ou le saut avec contremouvement ou élan (countermovement jump). La chute consiste à sauter d'un bloc d'une certaine hauteur. Dans le saut accroupi, l'athlète reste en position accroupie ou en position squat avant de sauter. Le saut avec contremouvement permet à l'athlète de faire un mouvement complet en fléchissant les membres inférieurs pour arriver dans une position de squat et ensuite s'élancer dans les airs. Le saut en chute est souvent choisi par les chercheurs pour étudier la phase d'atterrissage, cependant Edwards et al. (2010) ont rapporté que les atterrissages en chute ont une cinétique, une cinématique et des activations musculaires différentes par rapport à un atterrissage d'un saut en contremouvement. Ils ont

découvert qu'un atterrissage en chute générait des forces verticales de réaction au sol maximales plus élevées, un taux de chargement maximal plus élevé, ainsi qu'une flexion du genou moins élevée et une activation musculaire plus élevée par rapport à un atterrissage d'un saut avec contremouvement. La hauteur de saut est plus élevée avec un saut avec contremouvement (Bobbert et al., 1996) puisque cette technique permet d'accumuler de l'énergie cinétique pendant la phase de contact avec le sol. Les acrobates de planche coréenne utilisent cette dernière technique pour s'élancer dans les airs, le défi réside à synchroniser leur mouvement au mouvement de la planche.

Maximiser la hauteur de saut consiste à avoir la vitesse du centre de masse et la position du centre de masse les plus élevées possibles lors du décollage. Le corps humain se comporte ensuite comme un projectile dans les airs et n'est soumis qu'à la force gravitationnelle. Techniquement, il y a aussi la résistance de l'air mais elle est négligeable pour une courte durée dans les airs. Plusieurs paramètres lors du décollage affectent la hauteur de saut comme la contribution musculaire et la technique de saut (Sheppard et al., 2011), ou encore la raideur de la surface (Giatsis et al., 2004; Moritz et Farley, 2005; McMahon et Greene, 1979). Il a été prouvé que les modifications de la raideur de surface peuvent entraîner une modification de la raideur des jambes afin de garder la même raideur totale du coureur et de la surface, bien que ce concept de raideur des jambes reflète une réponse de l'ensemble du corps plutôt qu'une adaptation au niveau d'une articulation particulière. Giatsis et al. (2004) rapportent les essais effectués par 15 athlètes de volleyball qui ont exécuté des sauts accroupis sur une surface rigide et sur du sable. La hauteur de saut était moins élevée sur le sable que sur la surface rigide à cause de l'élasticité et de l'instabilité du sable. Dans une étude de Moritz et Farley (2005), sauter sur une surface plus élastique a induit une augmentation de l'activation musculaire de 50 % malgré des moments articulaires et un travail mécanique des jambes similaires à ceux de la surface plus rigide. Ainsi, l'ajustement extrême de la mécanique des jambes pour les surfaces très molles aide à maintenir une dynamique normale du centre de masse, mais nécessite des niveaux d'activation musculaire élevés en raison de la perte du cycle normal d'étirement et de raccourcissement des muscles extenseurs. Les acrobates en planche coréenne sont soumis au mouvement de la planche qui pousse l'acrobate dans les airs. De plus, la planche a un angle par rapport à l'horizontale donc la

'poussée' de la planche n'est pas que verticale. L'acrobate en plus de devoir maximiser l'impulsion donnée par la planche, doit aussi contrer la force horizontale pour pouvoir se réceptionner sur la zone de réception de la planche. Un autre élément qui semble très important lors du décollage est la coordination des segments corporels. La coordination optimale consiste en une séquence proximale à distale des mouvements segmentaires afin que l'individu soit capable de rester en contact avec le sol jusqu'à ce que les hanches et genoux soient presque en extension (Ingen Schenau, 1989).

La réception est une tâche complexe car elle demande de la flexibilité, de la coordination et un contrôle musculaire dynamique (Louw et Grimmer, 2006). Dans certains sports comme le basketball ou le volleyball, sauter et surtout se réceptionner sont inévitables. La flexion des genoux et l'activation musculaire sont des paramètres souvent étudiés lors de la réception d'un saut (Fagenbaum & Darling, 2003, Louw et Grimmer, 2006). Une plus grande flexion du genou à l'atterrissage permet de réduire les charges exercées sur les articulations, notamment les genoux. C'est pourquoi il est recommandé d'amortir les impacts lors de la réception de sauts en fléchissant les membres inférieurs dans les sports comme le basketball ou le volleyball (Bressel & Cronin, 2005; Xu et al., 2021). En planche coréenne, la plupart des acrobates utilisent une technique dite de poussée, qui consiste à arriver sur la planche avec les membres inférieurs fléchis et à les étendre pendant que la planche descend jusqu'à toucher le matelas. Une autre technique existe aussi : celle qui consiste à garder les jambes tendues tout du long de la réception (FEDEC, 2009), bien que moins utilisée à Montréal. La difficulté en planche coréenne est que la priorité de l'acrobate est de pousser sur la planche pour aider son collègue à s'élancer avant de pouvoir amortir les impacts. De plus, les acrobates atterrissent la plupart talon en premier du fait que la planche a un angle par rapport à l'horizontale.

La phase d'atterrissage est associée à de nombreuses blessures en gymnastique (Sands, 2000), volleyball (Bisseling et al., 2008) et basketball (Akasaka et al., 2017). Atterrir en planche coréenne, c'est-à-dire un saut de grande hauteur sur une planche de 42 ou 50 cm de large, n'est pas sans risque. Il n'existe pas de données sur les blessures spécifiques à cette discipline puisque les études sur les blessures en cirque en général classifient les disciplines par famille comme les aériens et les acrobates (Shrier et al., 2009; Munro, 2014). Shrier et al. (2009) a trouvé un taux de 11.2

blessures par 1000 performances pour les acrobates comparativement aux artistes non-acrobates incluant les danseurs, les acteurs, les clowns et les jongleurs (6.8/1000 performances) et aux musiciens (4.3). Son analyse couvrait 5 ans de données provenant du Cirque du Soleil. À titre de comparaison, le taux de blessures en gymnastique féminine publié par le National Collegiate Athletic Association était de 15.2 blessures par 1000 expositions (Shrier et al., 2009). Munro (2014) a étudié l'incidence des blessures sur une année dans une école de cirque sur 63 étudiants. Les disciplines ayant la plus forte incidence sont l'acrobatique/tumbling (23%), équilibre sur main (12%), le main à main (11%) et le mât chinois (10%). La planche coréenne a un pourcentage de 5%.

### **2.2.3 Les forces de réaction du sol**

Les forces de réaction au sol se produisent lors des impacts avec le sol ou avec l'environnement pour toute activité physique. Il a été démontré que des forces de réaction au sol excessives lors de l'atterrissage peuvent entraîner des blessures aux membres inférieurs dans les sauts comme en volleyball ou en basketball (Dufek et Bates, 1991; Frobell et al., 2008), tandis que le taux de chargement maximal est associé à des fractures de stress dans les membres inférieurs pendant la course (van der Worp et al., 2016 ; Zadpoor et Nikooyan, 2011). Le taux de chargement représente la vitesse à laquelle les forces sont appliquées. Il est probable que les forces d'impact générées lors d'un atterrissage de saut pourraient également être à l'origine de blessures. Les forces de réaction au sol peuvent varier selon des paramètres externes. L'identification de ces paramètres qui pourraient être associés au développement de blessures et/ou à l'amélioration des performances nécessite une analyse approfondie.

La hauteur de saut a une influence majeure sur les forces de réaction avec le sol lors de l'impact. Dans une étude de 2018, dix-neuf joueurs de basketball ont effectué des sauts en chutes libres d'une hauteur de 45 cm ou de 61 cm. Il a été montré que ces joueurs ont subi un plus grand chargement en termes de choc tibial (accélération maximale du tibia), de pic d'impact et de taux de chargement moyens, et des angles de flexion du genou et de dorsiflexion de la cheville plus grands lors de saut de plus grande hauteur (Wei et al., 2018). Elvin et al. (2007) ont aussi trouvé une forte corrélation ( $r = 0.812$ ) entre le pic de force de réaction et le pic d'accélération axiale au

niveau du tibia pour des hauteurs de chute variant de 28 cm à 42 cm. Yeow et al. (2009) ont déterminé la relation de régression entre la hauteur de saut et différents paramètres biomécaniques comme la force de réaction avec le sol, les angles de flexion, les vitesses angulaires et la puissance articulaire des genoux. Cinq sujets ont exécuté une chute libre d'une hauteur variant de 0.15 à 1.05m sur une plateforme de force. Les forces de réaction avec le sol ainsi que le taux de chargement ont toutes deux suivi une relation de régression exponentielle avec la hauteur de saut ( $R^2=0.90-0.99$  et  $R^2=0.90-0.96$ ). Bien que la hauteur de saut soit un paramètre associé aux forces de réaction, peu d'études existent pour des disciplines à grande hauteur de saut comme c'est le cas en planche coréenne. La hauteur de saut semble donc être important à considérer lors de l'analyse des forces de réaction en planche coréenne.

Une différence peut aussi survenir avec la raideur du sol ou avec les caractéristiques des chaussures. Les caractéristiques des chaussures peuvent augmenter ou diminuer les forces au sol, en fonction de divers facteurs comme la hauteur de saut, le type de saut ou l'intensité de la réception (Harry et al., 2015; Nin et al., 2016). La raideur et la densité des chaussures peuvent affecter le mouvement et l'impact de différentes manières, y compris induire des changements dans la technique d'atterrissage d'un individu. En planche coréenne, les acrobates utilisent des chaussures aux semelles très fines, la chaussure ne serait donc pas un facteur qui influence beaucoup les forces de réaction, la raideur et le mouvement de la planche probablement plus. Des études antérieures ont montré que les individus ajustent la raideur de leur jambe lors de la course sur différentes surfaces pour pouvoir maintenir la mécanique du mouvement (Ferris et al., 1998). Les cinq coureurs de l'étude de Ferris et al. (1998) ont conservé la même raideur verticale globale effective sur les quatre surfaces de différentes raideurs. Ils ont atteint une raideur verticale constante en modifiant la raideur de leurs jambes pour compenser les changements de raideur de surface. La raideur de la jambe est calculée en modélisant la jambe par un ressort et en prenant le rapport de la force de réaction verticale maximale au sol sur le déplacement maximal du centre de masse (ressort comprimé). Il a été démontré que différentes raideurs de surface peuvent affecter les stratégies de réception lors d'un saut. En cas d'atterrissage sur une surface élastique comme un matelas, des chercheurs ont mesuré des forces de réaction plus faibles, un temps à la phase d'atterrissage plus long et une flexion des genoux et des hanches plus

grands sur un matelas que sans matelas (McNitt Gray, Takashi et Millward, 1994). C'est souvent ce qui est demandé aux acrobates, c'est de s'adapter à différentes planches donc raideur de planche (exemple d'une planche d'entraînement qui est différente de la planche de spectacle). La raideur des planches peut donc avoir une influence sur la réception et possiblement sur les forces de réactions, c'est donc un paramètre à privilégier lors de l'étude des forces de réactions en planche coréenne.

Le niveau des athlètes peut aussi avoir une influence sur les forces de réaction. Tran et al. (2015) ont trouvé une différence sur les forces de réactions entre des athlètes élités et junior lors de chutes sur une plateforme de force d'une hauteur de 50 cm. Le groupe élite a atténué plus efficacement les forces de réaction maximales lors de la réception par rapport au groupe junior. À l'inverse, des réceptions de chutes effectuées par des gymnastes à des hauteurs de 60 et 90 cm présentaient des forces de réaction au sol plus élevées que les réceptions effectuées par des athlètes récréatives (Seegmiller et McCaw, 2003). La différence entre les deux études est que dans celle de Seegmiller et McCaw, les athlètes avaient pour instructions de se réceptionner avec leur technique habituelle alors que dans celle de Tran, les sujets avaient pour instructions d'atterrir en douceur sur les deux pieds et d'arriver rapidement à une position accroupie. Dans cette dernière étude, les chercheurs concluent que les athlètes de haut niveau peuvent bénéficier d'un entraînement aux techniques de réception comme d'éviter d'avoir les genoux en valgus ou d'augmenter la flexion des chevilles, genoux et hanches afin de diminuer les forces de réaction. En planche coréenne, la technique d'amortir la réception n'est pas une technique enseignée car elle coupe le mouvement de la planche et ne donne pas l'impulsion nécessaire à l'acrobate-partenaire pour s'élaner dans les airs. Le niveau du participant et la technique employée semblent être des facteurs importants lors de l'étude des forces et taux de chargement en planche coréenne.

Les forces de réaction lors de sauts ont été largement étudiées, notamment à cause du risque de blessures qui lui est associé. Lors de l'impact, des forces importantes sont appliquées au corps. L'application d'une amplitude de force élevée ou de forces répétées à un seuil sous-critique peut mener à une détérioration des os et des tissus (Nigg, 1985). Comprendre comment atténuer ces forces relève donc d'une grande importance dans la diminution du risque de blessure. Les

chercheurs ont cherché à amortir les forces d'impact en modifiant les caractéristiques des chaussures. Cependant si les tests d'ingénierie sont capables de déterminer les meilleures épaisseurs ou caractéristiques de matériaux pour absorber un impact, les mesures avec humain peuvent révéler des résultats plus mitigés compte tenu du fait de l'interaction humaine avec la surface (Yan et al., 2013). La réception d'un saut est une action complexe qui nécessite la coordination du haut du corps et des jambes pour absorber les forces d'impact et le maintien de la stabilité aux chevilles, genoux et hanches. Une grande hauteur de saut, une flexion des genoux réduite, une translation tibiale antérieure et une réception talon puis orteil sont associés à de grandes forces de réaction (Louw et Grimmer, 2006). Ce sont donc des pistes à suivre si l'on vise à diminuer les forces de réaction. Actuellement, il n'y a pas de données disponibles sur les forces de réaction en planche coréenne et comment ces forces sont altérées par rapport aux caractéristiques mécaniques des planches ou à d'autres facteurs.

#### **2.2.4 L'activité musculaire**

Sauter peut être défini comme une série complexe d'actions multi-articulaires où les muscles autour de la cheville, du genou et de la hanche (et des bras s'ils sont inclus) fonctionnent collectivement pour produire une séquence de mouvement. Les muscles agissent naturellement sur une articulation grâce à une combinaison d'activations excentriques (allongement) et concentriques (raccourcissements).

Des études ont démontré que les muscles étaient activés avant le premier contact avec le sol (~45 ms) pendant l'atterrissage (Moritani et al., 1991; Cowling et al., 2003; Ambegaonkar et al., 2011; Arampatzis et al., 2001). Il est théorisé que cette pré-activation offre une plus grande résistance en raidissant considérablement les articulations (Markolf et al., 1976). En outre, l'une des fonctions importantes d'un muscle est aussi d'absorber des forces, dissipant ainsi l'énergie mécanique (Roberts et Azizi, 2010). Un muscle est capable de dissiper de l'énergie mécanique en produisant une force en s'allongeant en une contraction excentrique. Ceci est important pour contrôler et réduire l'énergie cinétique et potentielle appliquée au corps lors de décélération dans l'atterrissage d'un saut (Roberts & Azizi, 2010).

Le temps d'activation des muscles a aussi un fort impact sur la performance. Dans l'étude de Pereira et al. (2008), quinze sujets ont réalisé trois essais consécutifs de sauts verticaux, au cours desquels l'électromyographie (EMG) a été enregistrée des muscles du vaste médial, du droit fémoral, du biceps fémoral et du gastrocnémien latéral. Les chercheurs ont sélectionné deux sauts pour chaque sujet en prenant le pire et le meilleur saut et ont évalué l'influence du contrôle moteur dans le saut. Ils n'ont signalé aucune différence significative de l'activité EMG dans 400 ms avant la phase de décollage entre les meilleurs et les pires sauts, en revanche ils ont trouvé une différence significative du temps d'activation des muscles du biceps femoris. L'analyse EMG a montré une différence significative dans le temps d'apparition de l'EMG du biceps femoris, il a été activé plus tôt dans le pire saut par rapport au meilleur saut. Ils ont conclu que le temps d'apparition de l'EMG influençait les performances de saut vertical et non l'activité musculaire. Kopper et al. (2013) ont étudié le déplacement, le temps, la vitesse et l'accélération du centre de masse (COM) et de l'activation musculaire des extenseurs du genou pour estimer la dominance des facteurs influençant la vitesse verticale dans des sauts aux amplitudes de mouvements faibles (angle du genou  $< 40^\circ$ ) et larges (angle du genou  $> 80^\circ$ ). Ils trouvent que les paramètres diffèrent selon l'amplitude du genou. Ils démontrent que dans des sauts de faible amplitude, la vitesse verticale était principalement influencée par le stockage d'énergie élastique des muscles au début de l'extension de l'articulation, tandis que dans des sauts aux larges amplitudes de mouvements des genoux, la vitesse verticale dépendait principalement de la durée de l'état actif des muscles et du niveau d'activation des muscles, en particulier pendant la phase concentrique. En planche coréenne, l'amplitude de mouvement des genoux est large donc il semblerait que la durée d'activation des muscles ait une influence sur la vitesse verticale et donc sur la hauteur de saut.

## **2.3 Comparaison avec des activités sportives similaires**

### **2.3.1 Trampoline**

La hauteur est importante en trampoline parce que cela donne plus de temps pour exécuter les figures et un temps plus long peut donner une illusion de facilité qui est souvent associée à d'excellentes performances par les juges. La hauteur de saut dépend de la déformation maximale

de la toile (Cheng et Hubbard, 2004) et de la vitesse du centre de masse à l'atterrissage (Miller et Munro, 1984).

Pendant la phase de contact, il y a un transfert continu d'énergie entre le trampoliniste et la toile du trampoline. L'athlète effectue un travail sur le trampoline pendant la déformation en utilisant une extension des jambes et un mouvement des bras synchronisés. L'athlète récupère ensuite l'énergie du trampoline quand la toile se tend en allongeant ses membres afin d'éviter que de l'énergie ne soit perdue. La technique de réception et de décollage en trampoline est similaire à celle utilisée en planche coréenne, cependant le ou la trampoliniste récupère l'énergie de la toile directement alors qu'en planche coréenne, le transfert se fait d'un acrobate vers un autre. Il est difficile pour l'acrobate de "sentir" la qualité de sa poussée à l'atterrissage.

Le trampoline est constitué d'une toile tendue par des ressorts d'acier et plusieurs chercheurs ont tenté de modéliser son comportement. Blajer et Czaplicki (2001) ont mesuré la relation entre la force et le déplacement pour des mouvements verticaux, horizontaux et de rotation en mesurant la déformation de la toile sous l'action de poids statiques connus. Ils ont trouvé que la force verticale n'était pas linéaire par rapport au déplacement vertical. Jaques (2008) a trouvé que la relation entre la force et le déplacement vertical pouvait être modélisée par une relation linéaire et non linéaire tant que la relation entre la force et le déplacement horizontal était complètement linéaire. La non-linéarité provient du changement d'angle des ressorts lors de la déformation de la toile, malgré le fait que tous les ressorts qui tiennent la toile soient linéaires.

Glitsch et Henrichs (1992) ont utilisé des semelles de pression pour mesurer une force maximale de 7.5 fois le poids corporel sous un pied, alors qu'une combinaison de modélisation par éléments finis et de modélisation musculosquelettique a estimé la force de réaction maximale entre 5.8 et 7.7 poids corporel (Qian et al., 2020). Blajer et Czaplicki (2001) ont trouvé une force verticale de presque 6 kN avec la dynamique inverse, ce qui représente une force de 9 fois le poids corporel. Cependant, il existe des limites associées à la dynamique inverse puisque cette méthode suppose que les segments du corps sont rigides avec une masse uniformément répartie et connectée par des articulations parfaites.

### 2.3.2 Le plongeon

Pour les hauteurs de 1 et 3 m, le plongeur commence par une petite course sur le tremplin et saute sur une jambe vers l'extrémité du tremplin. Il atterrit sur le tremplin en utilisant les deux pieds et pousse le tremplin vers le bas. Le tremplin va alors fléchir et revenir vers le haut par le renvoi de flexion. Une plus grande poussée permet une plus grande flexion du tremplin et donc une plus grande restitution d'énergie (Jones et Miller, 1996). L'enjeu réside donc à faire fléchir le tremplin le plus possible tout en absorbant le plus l'énergie de restitution. De même que le trampoline, le transfert d'énergie se fait de l'athlète vers le tremplin (poussée sur le tremplin) puis du tremplin vers l'athlète (renvoi de flexion). L'action de l'athlète est directement redirigée vers lui et il peut 'sentir' les conséquences de son geste et ainsi se réajuster. En planche coréenne, le transfert se fait d'un acrobate à un autre via la planche coréenne. Le mouvement de l'acrobate qui s'élanche et qui se réceptionne vont tous les deux influencer le mouvement de la planche coréenne et ainsi la performance des deux acrobates.

Comme le plongeon est un sport compétitif, les tremplins sont standardisés afin que tous les athlètes aient les mêmes conditions. La discipline de plongeon d'un mètre et de trois mètres utilisent des tremplins appelés Maxiflex 'B' en aluminium de 4,88 mètres de long en porte-à-faux avec un point d'appui réglable (fulcrum) pour permettre plus ou moins de flexion. Il a été démontré que le tremplin agit comme un ressort linéaire avec masse (Sprigings et al., 1990). L'amortissement s'est avérée être négligeable (Boda, 1992). La raideur est réglable au moyen du fulcrum. La raideur mesurée a une valeur qui varie entre 3.9 to 8.0 kN/m selon la position du fulcrum (Sprigings et al., 1990). Pour trouver ces valeurs, une masse est appliquée de façon incrémentale sur l'extrémité du tremplin. Plus la masse est importante, plus la flèche est importante. Il a été démontré que le tremplin obéit une loi de Hooke, c'est-à-dire qu'il existe une relation linéaire entre le poids et la flèche reliée par la raideur. Un protocole dynamique qui consiste à faire osciller le tremplin permet d'obtenir la masse effective. Pour se faire, des masses sont suspendues par une sangle pour mettre le tremplin en flexion puis les masses sont relâchées pour faire osciller le tremplin. L'étude des oscillation grâce à un accéléromètre permet de mesurer la fréquence naturelle et donc la masse effective (Sprigings et al., 1990). Des recherches antérieures ont montré une forte relation entre la vitesse verticale au décollage et la raideur de

la planche chez les plongeurs seniors d'élite. La course de vingt plongeurs a été analysée avec de la vidéo et un accéléromètre afin de déterminer les changements dans le mouvement du tremplin et du plongeur sous l'effet du positionnement du fulcrum. Les chercheurs ont trouvé que placer le fulcrum le plus loin de l'extrémité du tremplin induisait une plus grande vitesse verticale de l'extrémité du tremplin, plus de temps pour générer un moment angulaire et une vitesse verticale plus élevée au moment de rentrer dans la phase aérienne. Cependant, cette position du fulcrum demande à l'athlète d'avoir une plus longue durée du petit saut précédent la poussée sur le tremplin, c'est-à-dire qu'il doit sauter plus haut pour être en mesure d'attraper le tremplin lors du renvoi de flexion (Jones et Miller, 1996). La raideur de la planche coréenne n'est pas réglable et dépend entièrement de sa fabrication (matériaux et dimensions). Les acrobates doivent s'adapter à la planche sur laquelle ils sautent. Pouvoir modifier la raideur lors de la fabrication la planche est un atout puisqu'il est possible de personnaliser la planche aux acrobates (poids, morphologies, techniques, préférences, etc). Pour cela, il faut néanmoins avoir une meilleure compréhension de comment les dimensions et les matériaux de la planche affectent la raideur de celle-ci.

Les facteurs biomécaniques qui influencent la hauteur de saut en plongeon ont été largement étudiés. Sayyah et al. (2016), Sanders et Wilson (1988) et Sinclair et al. (2012) ont découvert qu'avoir une position accroupie (flexion des hanches et genoux) et une vitesse du COM verticale élevée au premier contact avec le tremplin (après le saut) est associé à une augmentation de la hauteur de saut. La flexion des hanches et des genoux au contact avec le tremplin permet à l'acrobate de faire plus de travail sur la planche, et donc de transférer plus d'énergie (Sanders & Wilson, 1988). Maintenir le COM au-dessus de la base du support pendant que les membres inférieurs s'étendent pendant la planche fléchie aide au contrôle pour maintenir l'équilibre. Étendre les membres inférieurs pendant le renvoi de flexion du tremplin permet d'augmenter la capacité du plongeur à rediriger la force de réaction du tremplin au COM, contribuant ainsi au moment angulaire. Une posture droite pendant le renvoi de flexion du tremplin permet de transformer plus d'énergie cinétique du tremplin en vitesse verticale (Miller et Sprigings, 2001). Sayyah et al. (2016) ont découvert que l'amplitude de mouvement de la hanche pendant le décollage expliquait 77 % de la variance de la hauteur de saut. Il a aussi été démontré qu'il est

important pour le plongeur de coordonner son saut avec l'oscillation du tremplin pour lui permettre de rattraper le tremplin dans sa position optimale de vitesse verticale maximale (Jones et Miller, 1996; Miller et al., 2002). Le travail mécanique externe est un facteur qui influence la hauteur de saut, cependant plus faiblement que les facteurs biomécaniques. Il a été calculé comme étant le changement d'énergie cinétique et potentielle entre le premier contact et le décollage avec le tremplin (Sinclair et al., 2012; Sanders & Wilson, 1988).

Des modèles aux complexités croissantes ont été utilisés pour simuler le décollage en plongeon et déterminer la hauteur de saut maximale (King et al., 2019; Yeadon et al., 2006; Cheng et Hubbard, 2004; Kooi et Kuipers, 1994). Kooi et Kuipers (1994) ont trouvé les paramètres pour modéliser le tremplin à l'aide d'un modèle à paramètres localisés constitués de 15 ou 31 segments connectés par des ressorts de torsion, avec des déplacements bloqués à l'extrémité et des déplacements verticaux bloqués à la position du fulcrum. Les simulations de Yeadon et al. (2006) ainsi que King et al. (2019) incorporent le plongeur, le tremplin et l'interaction entre les deux et tiennent compte des contraintes de mouvement, des contraintes anatomiques et de la variabilité d'exécution de mouvement. Ces chercheurs ont modélisé le tremplin comme une tige uniforme permettant des mouvements verticaux, horizontaux et de rotation représentée par un système masse-ressort linéaire sans amortissement et dont la rigidité augmente avec la distance du pied à la pointe du tremplin.

## **2.4 Le hockey**

Lors d'une entrevue avec un concepteur acrobatique du Cirque du Soleil, ce dernier rapporta qu'il y a environ trente ans, les planches étaient très rigides et plus courtes. Il raconta que l'entraîneur de l'équipe de hockey de Montréal lors d'une visite au Cirque du Soleil leur proposa d'utiliser plus la flexibilité de la planche comme c'est le cas dans les bâtons de hockey. Depuis cette visite, l'histoire voudrait que les planches coréennes aient été fabriquées avec une plus grande flexibilité et longueur. Je n'ai pas pu confirmer l'histoire, mais à la suite de cette entrevue, il a été décidé de s'intéresser à la mécanique des bâtons de hockey.

Les bâtons de hockey se comportent aussi à peu près de la même manière que la planche coréenne. La flexion de la tige du bâton permet d'utiliser l'énergie élastique pour augmenter la

vitesse de la rondelle lors du tir-frappé. La restitution d'énergie, appelée renvoi de flexion («*recoil effect*» en anglais), a largement été documenté (Villaseñor et al., 2006; Pearsall et al., 1999; Wu et al., 2003; Worobets et al., 2006; Villaseñor-Herrera, 2004). Le mouvement de tir peut se décomposer en phases comme suit : pré-chargement (contact du bâton sur la glace), chargement (flexion du bâton) et contact avec la rondelle (renvoi de flexion et poussée de la rondelle). Originellement, les bâtons de hockey étaient fabriqués en bois, mais depuis les années 90, la majorité des bâtons sont fabriqués en matériaux composites, car ils sont plus légers et plus résistants en fatigue (Pearsall et Robbins, 2019). Les bâtons sont choisis selon les préférences, la force, la masse corporelle et la technique de tir des joueurs (Pearsall et Robbins, 2019).

Un autre élément important dans le choix du bâton est le 'flex', c'est une valeur qui quantifie la raideur du bâton. Il n'existe pas de norme pour mesurer le 'flex' et chaque compagnie a sa propre façon de le tester (Pearsall et Robbins, 2019). La façon la plus simple consiste à mesurer la déflexion du bâton sous une charge donnée et de mesurer la raideur par la force divisée par la déflexion. Les essais peuvent autant être réalisés en porte à faux ou en flexion en trois points (Pearsall et Robbins, 2019). Plusieurs études ont analysé l'influence de la raideur du bâton sur la performance. En général, les bâtons plus flexibles sont associés à un plus grand stockage d'énergie (plus grande déflexion) et un temps plus long pour la déflexion (Pearsall et al., 1999). Cependant, la façon dont l'athlète utilise le bâton a plus d'influence sur la vitesse de la rondelle que la raideur du bâton (Hannon et al. 2011; Worobets et al., 2006; Pearsall et al., 1999; Wu et al., 2003). Wu et al. (2003) a trouvé que la vitesse de la rondelle était influencée par le niveau et la force de l'athlète et que les joueurs élités ont généré une plus grande force verticale et une plus grande flexion du bâton en ajustant la position de leurs mains sur le bâton. Hannon et al. (2011) a utilisé des jauges de déformation combinées à de la cinématique pour étudier le profil de déformation dynamique du bâton et déterminer les facteurs qui influencent la vitesse maximale de la rondelle. À partir de ces études, les auteurs ont suggéré que la technique des joueurs d'élités était prédominante par rapport à la raideur des bâtons (Hannon et al. 2011; Worobets et al., 2006; Pearsall et al., 1999; Wu et al., 2003).

La capacité de propulser la rondelle à haute vitesse est la mesure de critère de performance la plus courante dans la littérature scientifique. La combinaison de la flexion du bâton et de la force

musculaire permet la projection de la rondelle à grande vitesse. En utilisant des systèmes de capture de mouvement standard (Hannon et al., 2011) ou des caméras à haute vitesse (Wu et al., 2003; Villaseñor et al., 2006), il est possible de discerner la flexion du bâton en mesurant le mouvement par segment le long du bâton. Il a été démontré que l'effet du renvoi de flexion peut contribuer jusqu'à 30 % à la vitesse de la rondelle (Villaseñor et al., 2006). Villaseñor et al. (2006) ont examiné la déformation des bâtons de hockey pendant des tirs-frappés avec des caméras haute vitesse pour des joueurs élités et récréatifs. Des différences ont été mises en avant entre les deux groupes, notamment la vitesse de la rondelle et la durée de contact. En particulier, les joueurs élités ont optimisé le temps de flexion et du retour de flexion pour que ce dernier coïncide avec le mouvement de la rondelle.

## **2.5 Analyse des performances sportives et outils de mesures**

La complexité et la nature dynamique de nombreux sports impliquent que des mesures sont nécessaires pour améliorer notre compréhension de la performance. La biomécanique est la science qui permet d'évaluer la performance sportive avec des données quantitatives (et parfois qualitatives) : principalement des données cinématiques et cinétiques. Mesurer et caractériser le mouvement humain durant l'activité sportive permet d'améliorer les performances des athlètes, de mieux cibler les programmes d'entraînement, de guider les entraîneurs et de prévenir les blessures. Les chercheurs utilisent, entre autres, des capteurs inertiels, des plateformes de forces, des plaques ou des semelles de pression, de l'électromyographie, des accéléromètres, de la vidéo ou des systèmes de capture de mouvement (Taborri et al., 2020).

### **2.5.1 Capturer le mouvement**

La capture de mouvement (abrégé en mocap pour *motion capture*) est une technique permettant de capturer le mouvement d'objets ou d'humains en 3D dans le monde réel et de le traiter, l'analyser et l'interpréter. Actuellement, la capture de mouvement est la technique la plus couramment utilisée et la plus précise pour étudier le mouvement et la posture humaine. Cette technologie est utilisée dans de nombreuses industries telles que les jeux vidéo, le cinéma, la santé, la médecine du sport, la rééducation, etc. Divers systèmes de capture de mouvement ont été développés au cours des dernières décennies et la méthode la plus courante repose sur des

systèmes optiques à marqueurs actifs ou passifs. Des marqueurs réfléchissants ou des dispositifs électroluminescents sont fixés sur le corps du sujet au niveau de repères anatomiques précis et les images capturées par des caméras permettent de déterminer l'emplacement des marqueurs. Les participants peuvent se déplacer librement, car la combinaison (s'il y en a une) et les marqueurs sont légers, il faut cependant faire attention s'il y a une interaction avec un équipement, le sol ou une autre personne, car cela pourrait défaire les marqueurs ou rendre la mesure impossible pour cause d'obstruction. L'utilisation de tels systèmes nécessite un environnement de laboratoire contrôlé, surtout un environnement fermé à la lumière du soleil, car les caméras captent la lumière émise des marqueurs. La principale limite de ce genre de système est le mouvement relatif du marqueur placé sur la peau par rapport à l'os sous-jacent. La précision de la position des articulations calculée à partir des segments peut ainsi être amoindrie (Mündermann et al., 2006).

Plusieurs chercheurs essaient aussi de développer un système de capture de mouvement à base des capteurs d'unités de mesure inertielle (UMI) pour s'affranchir des conditions de laboratoire. Ces capteurs comprennent des accéléromètres 3D, des gyroscopes et souvent des magnétomètres. Bien que des systèmes soient déjà disponibles sur le marché, ce genre de système fait encore l'objet de recherches visant à la fois à augmenter la précision et la robustesse (Taetz et al., 2016).

La prochaine étape dans la capture de mouvement est le développement d'un système non invasif et sans marqueur. En cirque, il est impossible d'utiliser un système de capture de mouvement avec marqueur ou des UMI pour beaucoup de disciplines parce que l'acrobate est en contact avec le sol, un partenaire ou un équipement de cirque. Ne pas avoir de marqueur permettrait d'élargir l'applicabilité de la capture de mouvement. À ce jour, les méthodes sans marqueur disponibles sur le marché ne sont pas assez précises, mais les récentes avancées en vision par ordinateur et apprentissage machine offrent de nouvelles perspectives (Mündermann et al., 2006).

En planche coréenne, il est possible d'utiliser la capture de mouvement avec marqueurs, contrairement à d'autres disciplines circassiennes, l'enjeu réside à trouver un studio qui puisse accueillir de la performance de planche coréenne.

## 2.5.2 Mesurer les forces de réaction

Les plateformes de force représentent la référence absolue dans la mesure des forces de réaction. Souvent associées à la capture de mouvement, les plateformes de force sont utilisées pour mesurer les forces et les moments appliqués à sa surface supérieure lorsqu'un participant marche ou saute dessus. Les composantes de forces et de moments dans les trois axes sont mesurées lorsqu'un participant est en contact avec la plateforme. L'installation des plateformes de force doit être effectuée de manière à minimiser les vibrations et en tenant compte de la fréquence et de la force du mouvement à mesurer. Pour cette raison, le montage des plateformes de force directement à l'intérieur d'une dalle de béton lors de la construction du laboratoire produit les meilleurs résultats mais rend la plateforme difficile à déplacer ou à installer dans les environnements sportifs (Johnson et al., 2018).

Une autre façon de mesurer les forces de réaction serait par une mesure indirecte. L'estimation indirecte des forces de réaction en utilisant d'unités de mesure inertielle (UMI) ou de la capture de mouvement est un domaine de recherche en pleine croissance grâce au développement aux techniques d'apprentissage machine. Ces méthodes utilisent des régressions, des réseaux de neurones artificiels ou des réseaux de neurones convolutifs pour calculer les relations entre le vecteur d'accélération et les forces de réaction. Cependant, en raison des différences physiologiques entre les personnes, ces méthodes nécessitent une calibration ou des données d'entraînement pour chaque personne testée afin d'être précise (Ancillao et al., 2018; Johnson et al., 2018). Étant donné que les forces de réaction n'ont jamais été mesurées en planche coréenne, il est impossible d'avoir des données pour entraîner un algorithme d'apprentissage machine.

Une autre méthode indirecte serait de mesurer la relation entre la déformation de la surface d'appui (ou de l'équipement) et la force, puis de mesurer seulement la déformation lors de l'activité physique. Des jauges de déformation ou des caméras ont été utilisées en hockey sur le bâton (Hannon et al., 2011) ou les patins (Stidwill et al., 2009), ainsi qu'en gymnastique dans la discipline des anneaux (Mills, 1998) ou de la barre fixe (Hiley et Yeadon, 2003). Pour ces approches, il faut calibrer l'équipement au préalable en y appliquant une force incrémentale pour relier la mesure des jauges ou de la caméra aux forces. D'une part, la force maximale pour calibrer la planche coréenne est inconnue, d'autre part, cette méthode est très sensible au

positionnement des acrobates sur la planche. La calibration se fait au niveau de la position présumée de la réception des acrobates, mais en réalité, cette position varie, les acrobates ne se réceptionnent pas forcément au même endroit, comme c'est le cas en plongeon (Sayyah et al., 2016). Si cette méthode était utilisée en planche coréenne, il serait alors nécessaire d'analyser la position précise des acrobates sur la planche pour vérifier que c'est sur la marque de calibration et ne garder que les sauts qui correspondent à ce qui a été mesuré lors de la calibration.

Les semelles à capteurs de pression contiennent des capteurs qui mesurent la pression verticale quantifiée comme la force verticale appliquée sur la surface plantaire du pied. Cet outil permet d'obtenir des données temporelles de force et de pression ainsi que le chargement régional plantaire. Chaque semelle est composée de 960 emplacements individuels de capteurs de pression. L'autre avantage est que la semelle est suffisamment fine et flexible pour ne pas déranger le sujet et qu'elle s'insère dans n'importe quel type de chaussure. La validité, la fiabilité ou l'applicabilité diffèrent selon les capteurs de mesure sur le marché. Dans notre étude, nous avons utilisé le système F-scan de Tekscan. En général, les différences de validité et de fiabilité par rapport aux plateformes de force peuvent être dues à la construction des semelles : F-scan est basé sur des capteurs résistifs (contrairement à des capteurs piézoélectriques pour les plateformes de forces). Le système F-scan a été mesuré comme ayant une fiabilité modérée à bonne entre les sessions ( $ICC > 0.66$ ) et une corrélation élevée ( $r > 0.93$ ) avec la plateforme de force dans différentes populations (Mueller et Strube, 1996; Leitch et al., 2011; Vidmar et Novak, 2009). D'autres études montrent que des erreurs de mesure de 5.8% en essais statiques (Hsiao et al., 2002) et de 17.7% à la marche (Koch et al., 2016). Luo et al. (1998) ont trouvé une excellente réponse linéaire jusqu'à 1.7 MPa ( $R^2=0.979$ ) sur une cellule individuelle avec un chargement statique. En dynamique, ils ont calculé une erreur maximale de 3.2 % pour la vitesse de charge la plus élevée (0.241 MPa/s). Les chercheurs conseillent une calibration dans des conditions cliniques ou expérimentales réelles avant l'utilisation, y compris le type de surface, la vitesse de chargement et l'environnement de température afin d'avoir une mesure précise. En outre, il a été démontré que le système F-Scan est un instrument valable pour mesurer les forces de réaction au sol lors de mouvements dynamiques comme des atterrissages planifiés et non planifiés chez des joueurs de football (Alanazi, 2017). Dans cette étude, il a été demandé aux

footballeurs de sauter en avant à 80% de la distance maximale réalisée avant (atterrissage planifié) et de sauter en avant pour diriger un ballon (atterrissage non planifié) sur une plateforme de force et équipé des semelles F-scan. Plusieurs chercheurs recommandent de ne pas utiliser la mesure des F-Scan pour obtenir des valeurs réelles et précises mais pour effectuer des comparaisons relatives des distributions de pression plantaire dans des conditions similaires (Sumiya et al., 1998; Koch et al., 2016). Fürst et al. (2016) ont étudié si le système de Tekscan F-scan est adapté pour la quantification de la force d'impact d'un coup de pied de cheval. Ils concluent que le système n'est pas idéal pour mesurer la force d'un coup de pied de cheval parce que la fréquence d'échantillonnage utilisé (80Hz) était trop faible. Dans notre étude, nous avons sélectionné une fréquence d'échantillonnage beaucoup plus élevée (750Hz) pour capturer le pic de force. El Kati a aussi observé une diminution rapide de la sensibilité lors d'essais à la course et un besoin fréquent de calibration pour éviter ce problème (El Kati et al., 2010). Enfin les semelles ne sont pas robustes et le cisaillement ou la flexion diminuent grandement leur capacité. Il est donc important de changer les semelles dès qu'elles sont abimées et de répéter la calibration régulièrement. Jusqu'à ce que des capteurs de force qui fournissent des mesures plus précises soient disponibles pour des applications sportives, les semelles à capture de pression constituent une alternative acceptable pour évaluer les forces de réaction verticales du sol dans de nombreux domaines (Schmid et al., 2005). Comme il est très compliqué d'installer une plateforme de force sur un équipement de cirque en mouvement, le choix vers les semelles à capteur de pression a été une nécessité.

### **2.5.3 Mesurer l'activité musculaire**

L'électromyographie (EMG) est un outil de mesure commun utilisé pour déterminer l'activité des muscles en termes de contribution et de patron de coordination. L'EMG fait référence aux signaux mesurés de contractions musculaires contrôlées et produites par le système nerveux. Ce signal est un signal électrique qui représente l'activité d'une unité motrice musculaire. L'EMG enregistre les signaux par des électrodes non invasives placées sur le muscle. Grâce à l'EMG, il est possible de détecter, d'enregistrer, et d'analyser l'activité électrique des muscles, que ce soit en statique ou en mouvement.

L'amplitude des EMG peut être liée à la quantité de force mesurée (Roberts et Gabaldón, 2008), bien que la précision puisse être discutable en raison de divers facteurs qui peuvent influencer un signal EMG, comme la localisation des EMG sur le muscle ou l'adhérence du capteur. C'est pourquoi, afin d'avoir un bon signal, il y a quelques étapes à respecter lors de l'acquisition de données. La préparation de la peau constitue la première étape pour éviter les signaux bruyants et imprécis, et cela implique de nettoyer, raser puis nettoyer une deuxième fois la zone où sera placé le capteur. L'étape suivante consiste à placer le capteur sur la peau et il est important de bien situer le capteur le long du muscle dont on veut enregistrer l'activité.

Le post-traitement est aussi une étape essentielle. Le traitement du signal peut être fait de différentes manières selon les chercheurs, ce qui peut parfois générer des différences de résultats. En général, le traitement du signal consiste à filtrer les signaux bruts pour diminuer le bruit, à rectifier les signaux pour rendre les valeurs négatives en positives et à lisser les signaux pour ne garder que l'enveloppe. Pour permettre des comparaisons, il est possible de normaliser les signaux en amplitude et/ou en durée (Halaki et Ginn, 2012).

Le signal EMG est souvent normalisé par rapport à la contraction volontaire maximale ou au pic EMG pendant une activité donnant l'amplitude maximale d'activation pendant une contraction musculaire. Bien que la normalisation de l'EMG basé sur la contraction volontaire maximale soit préférable pour des actions musculaires à faible vitesse en raison de la simplicité méthodologique et de sa capacité supposée à générer des amplitudes EMG maximales (Halaki et Ginn, 2012), ce n'est pas forcément le cas pour des mouvements à grandes vitesses (Ball et Scurr, 2013). Plusieurs problèmes ont été mis en avant avec cette technique lors de mouvements à grande vitesse. La contraction volontaire maximale peut ne pas fournir le même niveau d'activation musculaire que celui observé lors de l'activité elle-même. Ainsi, créant des pourcentages d'activation musculaire supérieurs à 100 % d'activation (Hug et Dorel, 2009). L'activité EMG des muscles des jambes et les forces de réaction au sol ont été enregistrées chez 17 coureurs de demi-fond d'élite, qui avaient effectué au préalable des contractions volontaires maximales isométriques (Kyröläinen et al., 2005). À des vitesses de course plus élevées, les activités EMG du gastrocnémien, du vaste latéral, du biceps fémoral et du gluteus maximus dépassaient 100 % de la contraction volontaire maximale. Ces résultats suggèrent que les contractions volontaires maximales ne peuvent pas

être utilisées comme activation maximale des muscles. Il a été démontré que pour les activités à haute vitesse comme le saut, la méthode de normalisation doit impliquer une action similaire à l'activité mesurée (Ball et Scurr, 2013).

## **2.6 Conclusions**

L'ensemble des recherches concernant la planche coréenne, le saut ou des sports similaires à la planche coréenne ont été passés en revue et plusieurs conclusions émergent. Les résultats en recherche sur la biomécanique du sport ont identifié des éléments clés lors de l'exécution de sauts en mettant l'accent sur l'interaction de l'athlète et de son environnement (équipement et/ou surface). Un athlète doit avoir la force et la technique appropriées pour manipuler un équipement ou tirer le maximum de la surface d'appui afin de développer une énergie adéquate pour effectuer le saut requis pour de la performance acrobatique. Dans cette revue, nous avons aussi souligné les méthodes utilisées dans des sports documentés comme le plongeon, le trampoline ou le hockey. Les méthodes et outils de mesure sont des références sur lesquelles se baser pour monter la méthodologie à utiliser pour étudier le mouvement en planche coréenne.

L'analyse du mouvement humain en interaction avec un équipement est une entreprise complexe. Dans les dernières sections, nous avons mis en évidence l'absence d'analyse biomécanique ou mécanique dans la discipline de planche coréenne. Pourtant, l'analyse du mouvement est une des premières démarches avant de passer à la fabrication d'une nouvelle planche ou à l'optimisation de l'entraînement.

Compte tenu des points soulevés dans cette revue de littérature, nous avons mis en avant les différentes méthodes existantes pour décrire le mouvement ainsi que leurs limites. Ces techniques de mesure sont employées pour identifier et quantifier des paramètres mécaniques ou biomécaniques, afin d'expliquer la performance sportive. Les données récoltées peuvent aussi servir à concevoir des équipements plus adaptés, performants ou sécuritaires. Les méthodes de capture de mouvement, de semelles à capteur de pression ainsi que les EMG semblent donc être à privilégier dans l'étude de l'interaction entre la planche et la performance des acrobates en planche coréenne.

## Chapitre 3 – Objectifs et plan de la thèse

### 3.1 Objectifs de la thèse

Beaucoup de questions sont actuellement sans réponse : comment fabriquer une planche pour optimiser la performance acrobatique ? Quels aspects biomécaniques sont importants dans la réalisation du mouvement en planche coréenne ? Quel est le lien entre le comportement mécanique de la planche et la performance ? Étant donné que ces relations n'ont jamais été explorées dans la littérature, le contexte exploratoire de cette recherche visera surtout à apporter une meilleure compréhension du mouvement de la planche et des acrobates. La vision long terme de ce projet serait l'amélioration du mouvement de l'acrobate et de la conception de la planche afin d'offrir de meilleurs spectacles. Cette thèse s'inscrit dans cette démarche en étant la première étape vers cette vision long terme.

L'objectif général de cette thèse exploratoire est donc de déterminer les facteurs qui influencent les forces d'impact, la hauteur de saut, l'activité musculaire des acrobates et le comportement mécanique de la planche en planche coréenne.

Quantifier la biomécanique d'une activité physique dans son ensemble requiert différentes approches expérimentales. Cette thèse se situe à l'interface entre le génie mécanique et la biomécanique. L'analyse mécanique de la planche et la biomécanique de la performance acrobatique se déclinèrent en quatre études aux objectifs distincts et complémentaires.

L'objectif de la première étude de déterminer les facteurs qui influencent les forces d'impact. Cet objectif se décompose en étapes suivantes :

- (1) Définir et caractériser mécaniquement plusieurs planches.
- (2) Mesurer les forces d'impact et les taux de chargement pour plusieurs planches et plusieurs techniques de réception.
- (3) Établir l'influence de la hauteur de saut, de la planche et de la technique de réception dans les forces d'impact et les taux de chargement.

L'objectif de la deuxième étude est de déterminer les facteurs biomécaniques qui la hauteur de saut. Cet objectif se décompose en étapes suivantes :

- (1) Quantifier l'influence de plusieurs facteurs biomécaniques dans la hauteur de saut.

- (2) Établir la relation entre l'acrobate se réceptionnant et l'acrobate s'élançant dans les airs dans la contribution de la hauteur de saut.

L'objectif de la troisième étude est de déterminer les facteurs qui influencent l'activité musculaire. Cet objectif se décompose en étapes suivantes :

- (1) Mesurer et caractériser l'activité musculaire des jambes dans la performance en planche coréenne.
- (2) Quantifier la différence de contribution musculaire et de durée des phases du mouvement entre acrobates débutants et acrobates élités.

L'objectif de la quatrième étude est de déterminer les facteurs mécaniques qui influencent la hauteur de saut. Cet objectif se décompose en étapes suivantes :

- (1) Caractériser mécaniquement plusieurs planches.
- (2) Mettre en évidence le mouvement et la déformation de la planche en performance.
- (3) Mesurer l'influence du renvoi de flexion de la planche dans la performance en planche coréenne.

Le vocabulaire relatif au mouvement de la planche ou des acrobates utilisé dans cette thèse est repris autant que possible des études sur le trampoline, le plongeon et le hockey.

### **3.2 Aperçu des méthodes**

Durant cette thèse, deux collectes de données ont été réalisées. La première s'est déroulée dans les locaux du Cirque du Soleil en juillet 2018 et la deuxième s'est passée dans le studio du Centre de développement et de recherche en intelligence numérique (CDRIN) à Matane en novembre 2019. La première collecte a permis d'obtenir les données qui ont servi à la première et la troisième étude (forces d'impact et activité musculaire), tandis que ce sont les données de la deuxième collecte de données qui ont été utilisées dans la deuxième et quatrième étude (facteurs biomécaniques et mécaniques dans la hauteur de saut).

Trouver un studio de capture de mouvement qui offre une hauteur de plafond et de capture de 7m de haut a été une contrainte durant cette thèse. Après plusieurs visites de laboratoire à Montréal, force est de constater que ce genre de local est rare. Il n'y a qu'une seule place, un studio de jeu vidéo, qui était trop dispendieux. La première idée a été de faire ces tests dans un studio de cirque à Montréal, en installant un système de capture de mouvement au plafond (au grid), au mur et sur des trépieds dans un studio de cirque. Un premier essai a été tenté avec deux

acrobates en 2017 sur une journée à l'École nationale de cirque. Cependant, le jour de la collecte, le rideau permettant de fermer la fenêtre qui fait tout le mur s'est brisé et a donc empêché la collecte (Figure 6).



**Figure 6.** – Photographie du studio Chapiteau à l'École nationale de cirque et mise en avant de la fenêtre et du rideau couvrant tout un mur © Roland Lorente

### 3.2.1 Participants

La planche coréenne, bien que très populaire dans les grandes compagnies de cirque, est une discipline spécialisée et technique. Le nombre d'acrobates à travers le monde n'est pas très élevé. À ma connaissance, je peux compter sur une quinzaine d'acrobates résidant au Québec. En outre, ces acrobates ne sont pas toujours présents car ils sont envoyés en tournée à travers le monde. De plus, même si le Cirque du Soleil a formé beaucoup de planchistes ces vingt dernières années, la plupart sont sur des spectacles permanents à Las Vegas ou dans des spectacles de tournée.

L'invitation à participer aux collectes de données a été fournie par le biais d'un courriel puis d'une rencontre d'information. Les acrobates ont reçu une description de l'étude et le formulaire d'information et de consentement lors de la première rencontre. Toutes les informations ont été rendues disponibles en anglais et en français. L'approbation éthique de l'étude a été fournie par le comité d'éthique de la recherche humaine de l'Université de Montréal. Les acrobates étaient

également invités à remplir un questionnaire d'information confidentielle présenté en Annexe 1 afin de décrire leur pratique et leur utilisation de planche.

Huit acrobates de planche coréenne ont participé volontairement à cette étude. Les participants de l'étude 1, 2 et 4, ainsi que les deux experts de l'étude 3 sont des acrobates professionnels. Les informations spécifiques des acrobates de chaque étude sont présentées aux tableaux 1, 2 et 3.

Tableau 1. – Information sur les participants de l'étude 1.

Participants	1	2	3	4
Taille	1.72	1.67	1.77	1.75
Masse (kg)	65	79	77	73
Expérience en planche	5 ans	4ans	12 ans	5 ans

Tableau 2. – Informations sur les participants de l'étude 3.

Participants	Expert 1	Expert 2	Novice 1	Novice 2
Taille (m)	1.67	1.72	1.80	1.83
Masse (kg)	77	65	83	79
Expérience en planche	12 ans	5 ans	3 ans avec une pause de 7 ans	1.5 ans

Tableau 3. – Informations sur les participants de l'étude 2 et 4.

Participants	1	2
Taille (m)	1.83	1.90

<b>Masse (kg)</b>	74	73
<b>Expérience en planche</b>	10 ans	16 ans

### 3.2.2 Planches utilisées

Les planches utilisées dans cette thèse proviennent de plusieurs compagnies (Cirque du Soleil, Machine de cirque, cirque Éloize) et d'une école, l'École nationale de cirque de Montréal. Le détail des planches pour chaque étude est présenté au Tableau 4. L'étude 1 a permis de mettre en évidence la différence entre trois planches quant aux forces d'impact et taux de chargement. Pour l'étude 3, en raison de la présence d'acrobates débutants, la planche choisie est une planche sur laquelle tous les acrobates apprécient sauter. Enfin pour l'étude 2 et 4, la planche sur laquelle les acrobates ont sauté est leur planche habituelle, afin d'avoir un exemple de mouvement optimisé.

Tableau 4. – Planche utilisée pour chaque étude.

<b>Planches</b>	<b>Longueur (m)</b>	<b>Épaisseur centre → extrémité (cm)</b>	<b>Étude</b>	<b>Raison du choix</b>	<b>Nombre de sauts pour l'étude</b>
Cirque du Soleil (CDS)	3.05	2.0 → 4.0	1	Différence entre planches souhaitée	288
Machine de Cirque (MDC)	3.35	3.0 → 5.0	Cinétique		
École Nationale de cirque (ÉNC)	3.39	3.0 → 4.5			

Cirque Éloize	3.20	2.5 → 4.0	2 et 4 Cinématique (hauteur de saut)	La planche des acrobates de l'étude	120
Cirque du Soleil (CDS)	3.05	2.0 → 4.0	3 Activité musculaire (experts vs débutants)	Planche préférée de tous les acrobates	40

Afin de déterminer les caractéristiques physiques des planches, un certain nombre de paramètres ont été mesurés, incluant les dimensions et la raideur.

La raideur d'une planche peut en théorie influencer la vitesse de l'acrobate lors de son décollage. L'énergie élastique stockée lors du décollage est convertie en énergie cinétique lors du renvoi de flexion de la planche, conduisant à une plus grande vitesse de la planche et ainsi de l'acrobate. La capacité de la planche à stocker et à libérer cette énergie dépend fortement du mouvement des acrobates et de la raideur de la planche.

La mesure de la résistance à la flexion des planches se traduit essentiellement par une valeur de force nécessaire pour créer une courbure de la planche. Similaire aux mesures effectuées sur les bâtons de hockey (Pearsall et Robbins, 2019), les bâtons de golf (Betzler et al., 2012; Huntley et al., 2006) ou les tremplins de plongeon (Sprigings et al., 1990; Boda, 1992), la méthode a consisté à placer une masse sur la planche à une extrémité au niveau des pieds de l'acrobate tandis que l'autre extrémité de la planche était fixée. La déflection a ensuite été mesurée pour différentes valeurs de masses. La pente du tracé force par rapport au déplacement représente la constante du ressort effectif ou de la raideur en unités de N/m. Cette méthode consiste à modéliser le comportement de la planche en ressort linéaire.

Un lien peut être effectué avec la résistance des matériaux (Bazergui et al., 1987). Une poutre en porte-à-faux est une poutre dont une de ses extrémités est fixe tandis que l'autre extrémité est libre. Le support fixe empêche le déplacement et le mouvement de rotation. Si on considère une charge ponctuelle sur la partie libre de la poutre alors la flèche  $v$  en mètre à cette extrémité est exprimée par l'équation suivante :

$$v = \frac{PL^3}{3EI}$$

Avec  $P$  : la force au niveau de l'extrémité libre (en newtons),  $L$  : la longueur de la poutre (en mètre),  $E$  : le module d'Young (en  $N/m^2$ ) et  $I$  : le moment quadratique de section (en  $m^4$ ).

Alors la valeur de la raideur  $k$  en  $N/m$  exprimée par la force sur la déflexion vaut :  $k = \frac{P}{v} = \frac{3EI}{L^3}$

Le moment quadratique pour une section rectangulaire est calculé de la manière suivante :

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

avec  $b$  : la largeur de la section de la poutre en mètre et  $h$  : la hauteur de la section de la poutre en mètre.

Ainsi la raideur mesurée est proportionnelle au module d'Young et est proportionnelle à  $(h/L)^3$ .

Si on fixe une moitié de la planche coréenne et que l'on applique une charge à son extrémité, on se retrouvait dans une configuration de poutre en porte-à-faux sur la demi-planche libre. Le moment quadratique n'est cependant pas le même le long de la longueur de la planche coréenne car l'épaisseur varie selon la longueur, ainsi ce calcul reste une approximation. De plus, modéliser les planches par un ressort linéaire est une simplification, mais cela permet d'amener une première valeur pour différencier les planches entre elles.

### 3.2.3 Protocole expérimental

Les outils utilisés étaient :

Semelles de pression : le système F-Scan de Tekscan mesure la distribution de la pression sous la voute plantaire et indique également la force de réaction normale. La fréquence

d'échantillonnage était fixée à 750 Hz et il y avait 2 à 3 paires par acrobates pour garantir un changement de semelle en cas de semelle brisée ou abîmée. Les semelles de pression ont été utilisées lors de la première collecte de donnée pour l'étude 1 sur les forces d'impact. Comme indiqué dans la revue de littérature, les semelles de pression ont une précision de 15% sur les premiers pics lors de saut (El Kati et al., 2010) ou ont eu un coefficient de corrélation de 0.80 ou 0.67 et un ICC > 0.76 sur des sauts en longueur avec des footballeurs (Alanazi, 2017). Une autre étude sur les kicks de chevaux a précisé que ces capteurs pouvaient mesurer des forces aussi élevées que 10 000 N (Fürst et al., 2016).

Système de capture de mouvement : le système Optitrack avec 10 caméras FLEX13 à une fréquence d'échantillonnage de 30 Hz a été utilisé pour la première collecte de données et pour les études 1 et 3 (forces d'impact et activité musculaire). Le système VICON comprenant 68 caméras et avec une fréquence d'échantillonnage établie à 120 Hz a servi pour la deuxième collecte de données et pour les études 2 et 4 (facteurs biomécaniques et mécaniques qui influencent la hauteur de saut). Le modèle Plug-in-gait associé au système VICON comprenant 39 marqueurs a été employé afin de calculer les angles articulaires (Vicon Motion Systems, 2016). Des marqueurs ont également été placés sur un côté de la planche sur toute la longueur et ce, tous les 30 cm, afin de mesurer le mouvement de flexion de la planche.

Système de mesures de l'activité électromyographique: l'activité électromyographique des muscles du biceps femoris (BF), vastus lateralis (VL), gastrocnemius lateralis (GL) et tibialis anterior (TA) gauche et droite a été évaluée à l'aide du système Delsys, Trigno Myomonitor, avec une fréquence d'échantillonnage de 1925 Hz.

La collecte de données s'est déroulé comme suit :

Une fois les données anthropométriques collectées, il a été demandé aux acrobates de procéder à un échauffement d'environ 20 minutes. Par la suite, le matériel de collecte était installé sur les acrobates et la planche. Pour la collecte 1 (étude 1 et 3), les marqueurs étaient placés à la surface de la peau sur les segments du corps du sternum, des hanches, des cuisses, des jambes et des pieds des participants aux repères anatomiques conformément au placement de marqueurs préalablement publiés (Vicon Motion Systems, 2016). Les capteurs EMG ont été placés sur les

quatre participants (deux débutants et deux experts) de l'étude 3 selon le protocole suivant : 1. trouver la zone en délimitant entre deux repères anatomiques et en demandant aux acrobates de contracter le muscle selon le guide de Criswell (2010); 2. nettoyer la zone, raser avec un rasoir à usage unique et nettoyer avec des lingettes avec de l'alcool (puis jeter le rasoir), 3. placer le capteur EMG sur la partie la plus proéminente du muscle et parallèle aux fibres musculaires, 4. fixer le capteur avec du ruban adhésif double face. Des tests afin de vérifier la connexion des capteurs et la mesure de la contraction des muscles ont été réalisés avant la collecte de données. Les semelles de pression ont été insérées dans les souliers des quatre participants de l'étude 1 sur les forces d'impact. Les semelles ont au préalable été découpées pour être ajustées à la taille des souliers des acrobates. Le 'step calibration' est la procédure recommandée par Tekscan pour des mouvements dynamiques. Elle consiste à opérer un chargement et un déchargement de chaque pied plusieurs fois. La calibration a été effectuée pour chaque capteur de pression et pour chaque acrobate. La courbe des forces présentée par le logiciel est déterminée à partir de cette calibration. Pour la deuxième collecte de données, les marqueurs pour la capture de mouvement étaient placés suivant le guide du modèle Plug-in-gait (Vicon Motion Systems, 2016) ainsi que tout le long la planche.

Une fois le matériel installé, il a été demandé aux acrobates de marcher puis de sauter à une faible hauteur afin de s'habituer aux équipements. La collecte des sauts a pu ensuite commencer. Les acrobates ont été invités à réaliser des sauts droits avec leur technique de saut habituel pour les études 2, 3 et 4. Pour l'étude 1, quatre techniques de réception décrites au chapitre 4 ont également été effectuées. En accord avec l'entraîneur présent lors de la première collecte, les sauts se faisaient par série de 10 à 12 sauts. Du temps de repos entre chaque série était proposé aux acrobates.

L'analyse de données s'est déroulée comme suit :

#### Forces et taux de chargement maximal :

Le premier pic de force a été extrait du logiciel de Tekscan pour tous les sauts. Le taux de chargement maximal a été calculé à partir de la pente entre trois points de données entre le premier contact avec la planche et le premier pic de force pour avoir la charge maximale sur le

corps. Cette méthode s'est avérée plus appropriée aux fins de cette recherche. Un taux de chargement instantané élevé a été étudié et est associé à des blessures (Davis et al., 2016; Zadpoor et Nikooyan, 2011; Crowell et Davis, 2011). Le pic des forces et le taux de chargement maximal ont été associés à chaque saut correspondant.

#### Cinématique du mouvement :

Les données cinématiques de la première collecte ont été lissées avec une spline cubique pour l'étude 1 sur les forces d'impact et avec un filtre Butterworth du 4<sup>e</sup> ordre avec une fréquence de coupure de 10 Hz pour l'étude 3 sur l'activité musculaire. Seul le marqueur du sternum a été utilisé pour l'étude 1 afin de calculer la hauteur de saut de l'acrobate. Pour l'étude 3, l'angle du genou dans le plan sagittal a également été déterminé car le mouvement de l'acrobate s'effectue dans le plan sagittal.

Les données cinématiques de la deuxième collecte ont été lissées avec un filtre Butterworth du 4<sup>e</sup> ordre avec une fréquence de coupure de 10 Hz à la suite d'une analyse résiduelle. L'emplacement du centre de masse du corps et de chaque segment corporel ainsi que les angles articulaires ont été déterminés par un script Matlab sur la base d'un modèle à 15 segments défini par l'ensemble de marqueurs (main droite et gauche, avant-bras droit et gauche, avant-bras droit et gauche, bras droit et gauche pied, jarret droit et gauche, cuisse droite et gauche, tête et cou, thorax, bassin). Le modèle de Plug-in-gait intègre les données anthropométriques de Dempster (1955) telles que rapportées par Winter (1990). La définition des systèmes de coordonnées des segments corporels dans le modèle Plug-in-gait est compatible avec les recommandations de la Société internationale de biomécanique (Wu et al., 2002; Wu et al., 2005) avec un calcul des angles articulaires par le formalisme d'Euler qui préconise une séquence de rotation: flexion/extension, abduction/adduction et rotation interne/externe.

#### Activité musculaire :

Le signal EMG brut a été traité avec un filtre Butterworth de 4<sup>e</sup> ordre avec une fréquence passe-bande de 10 Hz à 400 Hz, redressé double, puis filtré passe-bas avec un filtre Butterworth de 4<sup>e</sup> ordre avec une fréquence de coupure de 6 Hz (Ervilha et al., 2020; Vaz et al., 2016; Rutkowska-Kucharska et al., 2018). Le signal a par la suite été normalisé par la valeur maximale obtenue lors

des essais car sauter en planche coréenne est un mouvement à grande vitesse (Ball et Scurr, 2013). L'activité musculaire de BF, VL et GL a été divisé par phase de mouvement selon des repères associés au mouvement de l'acrobate, la procédure est décrite au chapitre 6. Étant donné que l'EMG de TA ne contribue pas activement au saut vertical, ces données n'ont été utilisées que pour synchroniser les données.

### Synchronisation des données

Une procédure a été appliquée pour synchroniser les données des différents capteurs pour l'étude 1 et 3. Pour la recherche sur les forces d'impact, les données cinétiques et cinématiques ont été associées avec chaque saut, c'est-à-dire le participant, la technique de réception et la planche correspondante, car aucune étude temporelle n'a été effectuée. Pour la recherche sur l'activité musculaire, il été impératif de synchroniser les données ÉMG aux données cinématiques car une étude temporelle par découpe de phase de mouvement a été réalisée. Les signaux d'accélération issus de la double dérivation des données de position verticale du genou gauche ont été synchronisés avec les données d'accélération verticale de l'accéléromètre du capteur EMG situé au niveau du tibial antérieur (TA) gauche. La corrélation croisée a été utilisée pour fournir la meilleure similitude entre les signaux et ainsi synchroniser les signaux (Cossin et al., 2018). Les signaux sont décalés l'un par rapport à l'autre jusqu'à maximiser la valeur de corrélation. En synchronisant les données cinématiques aux données EMG, nous avons pu calculer l'activité musculaire phase par phase pour chaque participant.

### Choix des variables pour les différentes analyses

Pour l'étude 1 sur les forces d'impact, quatre variables — hauteur de saut, participant, technique de réception et planche — ont été sélectionné pour leur influence sur les forces d'impact et taux de chargement mise en évidence dans la littérature scientifique (Wei et al., 2018; Elvin et al. 2007; Yeow et al., 2009; Harry et al., 2015; Nin et al., 2016; McNitt Gray, Takashi et Millward, 1994; Tran et al., 2015; Seegmiller et McCaw, 2003).

Les paramètres biomécaniques sélectionnés dans l'étude de l'influence de la hauteur dans l'étude 2 ont été sélectionnés à partir des études sur le plongeon. Sayyah et al. (2016) a trouvé que l'amplitude de mouvement des hanches a contribué à hauteur de 77% de la variance de la hauteur

de saut. Les autres paramètres de son étude sont : la vitesse verticale du centre de masse lors du premier contact avec le tremplin (lors du saut qui permet de pousser sur la planche), l'angle des hanches lors du premier contact avec le tremplin (lors du saut qui permet de pousser sur la planche), la distance des orteils par rapport au bord du tremplin. Les deux paramètres qui sont moins liés à la hauteur de saut dans son étude sont l'amplitude des genoux et l'angle des genoux lors du premier contact avec le tremplin. Pour Sinclair et al. (2012), les paramètres qui influencent la hauteur de saut par ordre de contribution sont la vitesse verticale du centre de masse au premier contact avec le tremplin, l'angle d'inclinaison des pieds, le travail extérieur calculé par la différence d'énergie cinétique et d'énergie potentielle entre l'atterrissage et le décollage, l'angle des chevilles au premier contact avec le tremplin et le déplacement vertical du centre de masse au premier contact avec le tremplin. Selon Sanders et Wilson (1988), les paramètres qui avaient la plus grande association avec la hauteur de saut sont l'angle des hanches et des genoux au premier contact avec le tremplin ainsi que le travail extérieur. À partir de ces études, une trentaine de variables notamment les angles des hanches, genoux et chevilles ou les vitesses verticales du centre de masse ou de la planche à différents moments précis du mouvement ont été sélectionnées pour l'analyse statistique. Les variables les plus contributives ont été gardées et sont présentées dans le chapitre 4.

Pour l'étude 3 sur l'activité musculaire, deux variables ont été sélectionnées, l'intensité musculaire par phase de mouvement et la durée des phases, car l'amplitude des EMG peut être liée à la quantité de force (Roberts et Gabaldón, 2008) et le temps d'activation des muscles est associé à la performance (Pereira et al., 2008). Afin de différencier des débutants et des experts, ce sont des variables utilisées dans littérature scientifique (Matsunaga et Kaneoka, 2018; Vaz et al., 2016; Ervilha et al., 2020; Sasaki et Urabe, 2012; Pereira et al., 2008).

Finalement, dans la dernière étude sur les paramètres de la planche qui contribuent à la hauteur de saut, ce sont les études sur les bâtons de hockey qui ont permis de sélectionner les variables d'intérêts. Ces études ont montré que le temps de contact entre le bâton de hockey et la rondelle, la vitesse du bâton avant le contact avec la rondelle, la flexion du bâton, la capacité de transférer l'énergie élastique du bâton à l'énergie cinétique de la rondelle via le renvoi de flexion du bâton, ainsi que la taille, la force et le niveau de compétence de l'athlète ou la raideur du bâton jouent

un rôle sur la vitesse de la rondelle (Hannon et al. 2011; Pearsall et al., 1999; Wu et al., 2003; Worobets et al., 2006; Villaseñor et al., 2006). L'étude proposée dans cette recherche au chapitre 7 s'est concentrée sur la flexion et le renvoi de flexion de la planche, que ce soit du côté de l'atterrissage que du décollage.

### **3.2.4 Traitement statistique des données**

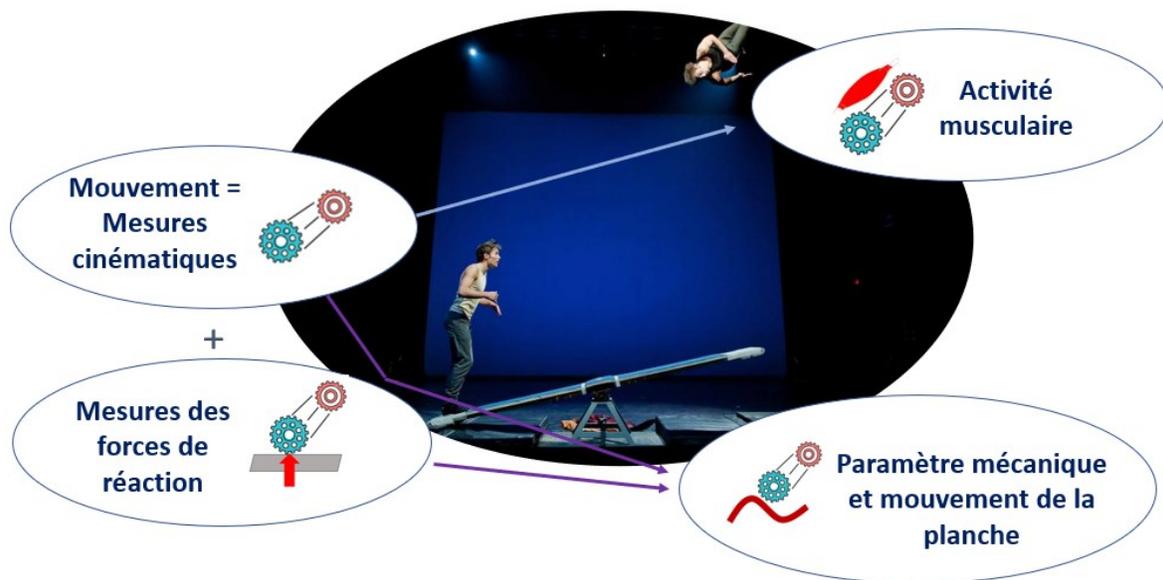
Boosted Regression Tree (BRT) ou arbre de régression boosté est une méthode d'apprentissage-machine qui a été utilisée pour l'analyse des données pour l'étude 1, 2 et 4. La méthode BRT comporte de nombreux avantages comparé aux méthodes de statistiques traditionnelles : elle permet des relations complexes et non linéaires, elle a une grande tolérance aux données manquantes, au colinéarité et aux observations aberrantes, elle ne requiert pas de distribution des données, elle peut combiner des données catégoriques et numériques, elle est adapté au cas où le nombre de variable est élevé et elle peut prendre en compte les interactions.

La méthode BRT combine deux algorithmes, arbre de régression et boosting, afin d'améliorer sa précision. Dans un arbre de régression, on effectue une segmentation binaire récursive des données, puis on estime un modèle très simple dans chaque élément de la partition appelé feuille de l'arbre. Pour déterminer une valeur plausible de la réponse dont on connaît les valeurs de chaque variable d'entrée, on procède étape par étape de la manière suivante. En partant de la racine, à chaque nœud, on vérifie si la condition de coupure est vérifiée ou pas : si la condition est vérifiée, on se dirige vers la branche associée. Cela revient à une réponse positive à la question implicite "Est-ce que la condition est vérifiée ?", sinon on se dirige vers la branche associée à la réponse négative. À la dernière étape, on aboutit alors à une seule feuille de l'arbre. L'importance des variables est affichée sur la feuille obtenue à la fin du cheminement étape par étape. Cette modalité correspond à celle la plus observée associés à cette feuille. La taille de l'arbre est aussi un élément important : l'erreur d'apprentissage continue de décroître avec la taille de l'arbre. Le boosting appliqué aux arbres de régression consiste à construire une série d'arbres simples, composée d'un ensemble de règle de décisions restreint, c'est-à-dire avec un apprentissage faible. Chaque arbre est construit en utilisant de l'information provenant du précédent : à chaque

étape, on modifie l'échantillon initial pour prendre en compte les erreurs réalisées à l'étape précédente et leur attribuer un poids plus important.

Il a été démontré que la méthode BRT a de meilleurs résultats que les méthodes modèle linéaire généralisé et modèle additif généralisé traditionnelles, avec une erreur de prédiction plus faible et une plus grande robustesse (Abeare, 2009; Pourghasemi et al., 2020a; Pourghasemi et al., 2020b). La méthode BRT a également eu les meilleures performances par rapport à d'autres techniques d'apprentissage machine comme le réseau de neurones artificiels, les arbres de classification et de régression, ou les forêts aléatoires (Pourghasemi et Rahmati, 2018).

### 3.3 Structure de la thèse



**Figure 7.** – Schéma explicatif de la structure de thèse : les énoncés dans les pastilles blanches ont été étudiés durant cette thèse tandis que les énoncés des pastilles bleues sont des possibilités futures.

La Figure 7 présente la structure de la thèse.

Pour comprendre le mouvement de l'acrobate, la cinématique, une branche de la mécanique, permet d'étudier la position, vitesse et accélération de différents segments du corps. La

cinématique ne prend pas en considération la masse et la force liées au déplacement, à la vitesse et à l'accélération du corps.

La cause de l'accélération est la force, il est donc important de mesurer les forces de réaction, surtout lors de mouvement dynamique comme en planche coréenne. L'interaction entre les acrobates et la planche génèrent des forces entre les deux 'systèmes'.

Les muscles sont des générateurs de travail mécanique, de mouvement. Les muscles peuvent générer une force relativement importante selon leur structure et disposition, ce qui permet aux leviers (les os) de bouger.

Enfin les acrobates interagissent sur une planche, une surface mobile et flexible, pour se propulser et se réceptionner. Afin de mieux comprendre le mouvement de l'acrobate (cinématique), il est nécessaire de comprendre le comportement mécanique de la planche.

### **3.4 Structure du manuscrit**

Cette thèse comporte huit chapitres. Le chapitre 2 est dédié à la revue de littérature sur la planche coréenne et une revue des outils de mesure disponibles en biomécanique tandis que les objectifs sont présentés au chapitre 3. Dans une première étude présentée au chapitre 4, les forces d'impact et le taux de chargement ont été quantifiés, ainsi que les facteurs les influençant. Dans le chapitre 5 constituée de la deuxième étude, nous avons analysé la hauteur de saut, principalement l'influence de certains paramètres biomécaniques et mécaniques sur la hauteur de saut. La troisième étude (chapitre 6) aborde la différence d'activité musculaire dans les membres inférieurs entre des acrobates débutants et experts. La quatrième étude sur le mouvement et la déformation de la planche en performance est présente au chapitre 7. Une discussion termine cette thèse au chapitre 8 pour débattre des résultats et donner des perspectives d'avancées.



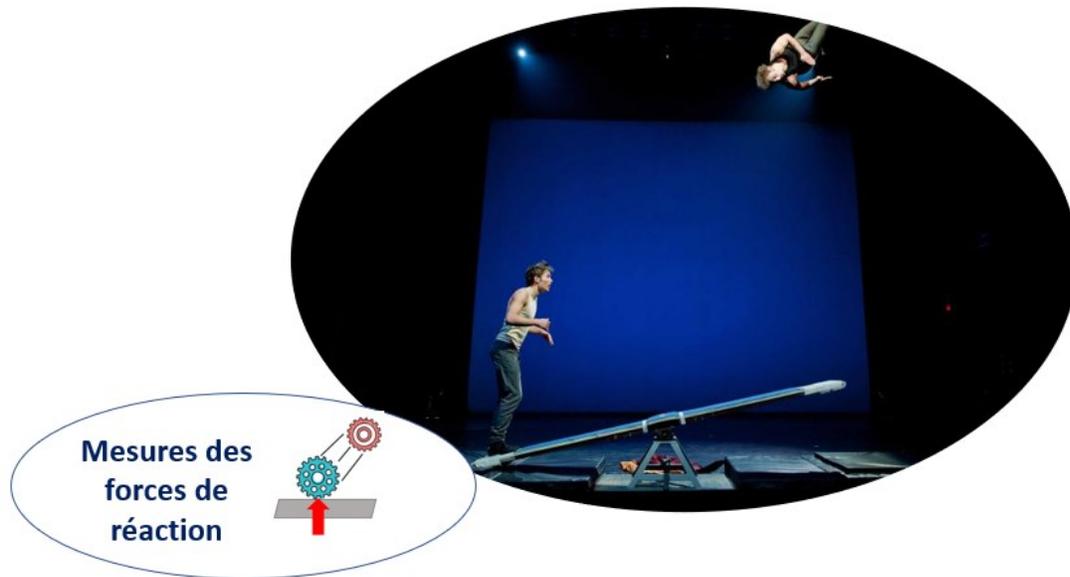
# **Chapitre 4 – L'influence de la hauteur de saut, de la technique de réception, du participant et de la planche sur les forces d'impact et taux de chargement**

## **4.1 Avant-propos**

La relation entre le système acrobate-planche passe par l'étude des forces entre ces deux éléments du système. Les forces de réaction entre l'acrobate et la planche peuvent être interprétées comme de l'apport d'énergie au système lors de la réception, pour permettre la mise en mouvement de la planche et ainsi continuer la performance. Pour être efficace, il est important que le futur concepteur de planche considère les effets des forces de réaction dans un processus de conception de planche, afin de bien dimensionner la planche.

La première étape de la thèse consiste donc en la mesure des forces de réaction entre la planche et l'acrobate (Figure 8). L'objectif de cette première étude de déterminer les facteurs qui influencent les forces d'impact. Cet objectif se décompose en étapes suivantes :

- (1) Définir et caractériser mécaniquement plusieurs planches.
- (2) Mesurer les forces d'impact et les taux de chargement pour plusieurs planches et plusieurs techniques de réception.
- (3) Établir l'influence de la hauteur de saut, de la planche et de la technique de réception dans les forces d'impact et les taux de chargement.



**Figure 8.** – Étape 1 de la structure de thèse : mesure des forces de réaction.

Ce troisième chapitre de thèse présente un premier article intitulé : " Effect of landing techniques and participants on ground reaction forces and loading rates during landing on three different Korean teeterboards.". Cet article, coécrit par Annie Ross et François Prince, est publié en novembre 2021 dans le journal *Journal of Sports Engineering and Technology* (DOI: 10.1177/175433712111058031).

Étant donné la grande hauteur de saut et le type de surface de réception (une planche en bois mobile), il est probable que les forces d'impact soient élevées. Les exigences physiques lors de la réception sont relativement inconnues, ce qui fait que l'entraîneur et l'acrobate ne disposent pas d'une base de données à partir desquelles bâtir des programmes d'entraînement efficaces. De plus, il est connu au sein des professionnels de la discipline qu'une situation de planche vide est dangereuse. Quand un des acrobates sort de la planche une fois réceptionné au sol, souvent dû à un déséquilibre ou une chute en arrière, l'autre acrobate dans les airs va atterrir sur ce qu'ils appellent une planche vide, puisqu'il n'y a personne en face pour résister et donner un contrepoids. C'est une situation que les acrobates essaient d'éviter. S'ils sont en groupe, un des acrobates autour va prendre le relais en se positionnant sur la planche vide. Ou si l'entraîneur est présent, il peut aussi envoyer un matelas sur la planche pour faire un léger contrepoids. Une vidéo

a été publiée dernièrement sur Youtube sur comment sauver une planche vide pour expliquer la bonne technique à utiliser dans cette situation (Roberto Carlos Reyes, 2021). Cependant sans données, il est difficile de quantifier la différence une réception normale et une planche vide.

Les développements de nouveaux outils de mesure, les semelles de pression avec une bien meilleure résolution, encourage leur utilisation en planche coréenne. Il est en effet impossible, voire très difficile, de placer une plateforme de force sur la planche coréenne.

Cette étude a permis de quantifier l'influence de la hauteur de saut, de la technique de réception, du participant et de la planche dans le premier pic des forces d'impact et du taux de chargement. Dans cette étude, nous avons utilisé une méthode innovante d'apprentissage machine, les arbres de régression boostés (Boosted Regression Tree). Nous avons mesuré des forces d'impact élevées: maximum de 13,5 poids corporels. De plus, les professionnels ne sont pas tous d'accord si la rigidité de la bascule peut causer des blessures ou non. Notre étude apporte des éléments de réponses en démontrant que la planche ne contribue que pour 11% des forces d'impact et pour 13,8% des taux de chargement.

## **4.2 Article 1**

### **Effect of Jump Heights, Landing Techniques and Participants on Vertical Ground Reaction Force and Loading Rate During Landing on Three Different Korean Teeterboards**

Authors:

Marion Cossin,<sup>1</sup> Annie Ross,<sup>2</sup> François Prince<sup>3,4</sup>

Affiliations:

<sup>1</sup> Département de Pharmacologie et Physiologie, Faculté de médecine, Université de Montréal, 2100 Edouard-Montpetit Bld, Montréal, Québec, Canada H3C 3J7

<sup>2</sup> Département de génie mécanique, Polytechnique Montréal, 2900 Edouard-Montpetit Bld, Montréal, Québec, Canada H3T 1J7

<sup>3</sup> Département de chirurgie, Faculté de médecine, Université de Montréal, 2100 Edouard-Montpetit Bld, Montréal, Québec, Canada H3C 3J7

<sup>4</sup> Institut national du sport du Québec, 4141 avenue Pierre-De Coubertin, Montréal, Québec, Canada, H1V 3N7

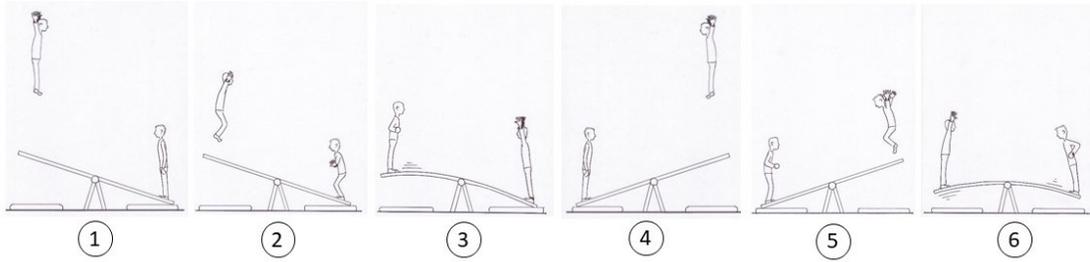
#### **4.2.1 Abstract**

Korean teeterboard is one of the most physically and technically demanding circus disciplines. Two performers take turns jumping vertically and land with high impact. The aims of this study were to 1) compare the stiffness across three different teeterboards, and 2) compare Peak Landing Force (PLF) and Maximal Loading Rate (MLR) of four acrobats performing jumps from three teeterboards using four landing techniques (normal, smooth, straight legs and empty board). Pressure sensors were used to determine recorded forces under the feet, while Boosted Regression Trees (BRT) was used to analyse factors contributing to PLF and MLR. Standard static loading protocol was used to estimate teeterboard stiffness. PLF and MLR increased with jump height. PLF and MLR were reached when landing on the teeterboard with the highest stiffness. The “normal” and “straight legs” landing techniques were associated with higher PLF and MLR. The BRT model was able to associate both PLF and MLR with jump height, participant, teeterboard, and landing technique factors. PLF reached 13.5 times the body weight when landing on the stiffer teeterboard using the straight legs technique. Trainers should be aware of the injury risk to teeterboard acrobats during landing.

**Keywords:** Impact force, loading rate, landing technique, boosted regression tree, circus, teeterboard.

#### **4.2.2 Introduction**

Korean teeterboard is part of the circus disciplines involving a piece of equipment and is an extremely physically and technically demanding circus act (Figure 9). Two performers take turns jumping vertically, performing complex acrobatic figures and landing back on the apparatus.



**Figure 9.** – Sequence of movement in Korean teeterboard: (1) Aerial phase for the acrobat on the left, ground phase for the acrobat on the right, (2) Preparation for landing for the acrobat on the left, preparation for take-off for the acrobat on the right, (3) Landing for the acrobat on the left, take-off for the acrobat on the right, (4) Ground phase for the acrobat on the left, aerial phase for the acrobat on the right, (5) Preparation for take-off the acrobat on the left, preparation for landing for the acrobat on the right, and (6) Take-off for the acrobat on the left, landing for the acrobat on the right.

The sequence of movements requires the first acrobat to land on one extremity of the apparatus, causing the teeterboard to rotate at the pivot point. The other acrobat is then propelled vertically as the teeterboard rotates. After take-off, the performer has to reach a position high enough to safely execute complex acrobatic figures and land back with precision on the teeterboard. A body translation at take-off can lead to a non-vertical trajectory, inaccurate landing and potential injuries (Munro, 2014).

The most common teeterboard landing techniques are 1) maintaining straight legs or 2) using a flexed knee position at board contact, then pushing on the board and extending the knees to align the body for a vertical take-off (FEDEC, 2009). In the circus field, the last technique, called the “normal” technique, is the most common and is similar to the trampoline. Trampolinists usually flex their legs during landing and extend their legs during take-off to be fully extended at the lowest point and capture the elastic energy of the trampoline (Akasaka et al., 2017; Qian et al., 2020). Researchers showed that a strategy to minimize landing impact is to produce a smooth landing through bending of the ankles, knees, and hips. When landing in basketball or volleyball, flexions of the lower extremities can reduce impact forces (Bressel & Cronin, 2005; Xu et al.,

2021). The landing techniques in teeterboard are much more complex than in other sports because of the equipment used and the synchronisation between partners.

The teeterboard is generally made of an ash wood assembly providing flexibility and is able to store elastic energy and then transfer it to the other acrobat just before take-off. The mechanism is similar to springboards in diving (Springs et al., 1990; Miller, 2000), except the divers regain the elastic energy to themselves. During a take-off, divers depress the board so that the springboard returns the elastic energy through a recoil effect to the divers to make them fly. In diving boards, stiffness is adjustable by means of a movable fulcrum. Previous research showed a very strong ( $r=0.90$ ) relationship between the vertical velocity at take-off and the board stiffness in senior elite divers (Jones et Miller, 1996). The influence of damping was found to be negligible (Miller, 2000). For Korean teeterboard construction, there is not standardization in the design (FEDEC, 2009). Acrobats, circus schools or companies can personalize the design to their wishes. While it is possible to find performances without the use of a mat, these days it is typical to have a mat under both ends of the teeterboard to reduce the impact with the ground. The European Federation of Professional Circus Schools (FEDEC) recommends a low stiffness board for novice acrobats because the load transfer is known to be smoother (FEDEC, 2009). From an engineering point of view, many factors can influence the teeterboard mechanical behavior. These parameters include, but are not limited to, stiffness, material, length and width, wear, humidity, height of the pivot point and board angle. The teeterboard parameters, such as stiffness, cannot be modified like in diving boards. However, the length of the teeterboard can vary from 2.4 m to 4 m and the height of the pivot can vary from 30 cm to 70 cm (FEDEC, 2009). No information is reported in the literature on teeterboard thickness and associated stiffness.

Ground reaction forces can be captured by force platforms (Seegmiller & McCaw, 2003) or estimated through pressure sensors (Glitsch & Henrichs, 1992) placed under the feet. In the past, researchers have investigated drop landing and compared ground reaction forces between competitive gymnasts and recreational athletes (Seegmiller & McCaw, 2003), landing heights (Yeow et al., 2009; Elvin et al., 2007), different landing surfaces (McNitt-Gray et al., 1994) and back somersault landings (Mkaouer, 2013). However, there are no data available on ground/teeterboard reaction forces and how these forces relate to mechanical characteristics.

The landing phase is associated with many injuries in gymnastics (Sands, 2000), volleyball (Bisseling et al., 2008) and basketball (Akasaka et al., 2017) and the same association can be made with the Korean teeterboard (Munro, 2014; Wanke et al., 2012). Landing on an empty teeterboard is probably the most precarious situation (FEDEC, 2009). It happens when one of the acrobats is not able to step back on the board and the other acrobat is landing on an “empty board”, also called “dead board”. It has been shown that excessive ground reaction forces during landing may result in lower extremity injuries in jumping sports (Dufek & Bates, 1991; Frobell et al., 2008), while Maximal Loading Rate (MLR) has been related to stress fractures in the lower extremities during running (van der Worp et al., 2016; Zadpoor & Nikooyan, 2011). While significant greater landing forces were experienced by gymnasts in trampoline (Glitsch & Henrichs, 1992) and back somersault landings (Mkaouer, 2013), no studies have been published regarding impact forces in Korean teeterboards acrobats. According to FEDEC guidelines (FEDEC, 2009), the performers should have an adequate level of acrobatic skills (e.g. trampoline) before starting to jump on a Korean teeterboard.

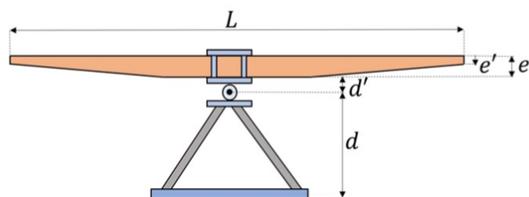
To date, the influence of jump heights, participants, landing techniques and teeterboard characteristics have never been studied on Peak Landing Forces (PLF) and MLR during teeterboard landing. The authors hypothesized that higher jumps, stiffer teeterboards, and less compliant technique will produce larger forces and loading rates. Therefore, the goals of the present study were twofold: 1) to compare the stiffness across three different teeterboards, and 2) to compare PLF and MLR in four acrobats performing jumps from three different teeterboards using four different landing techniques.

### **4.2.3 Methods**

Participants: Four male professional acrobats in Korean teeterboard were recruited for this study. Local ethical committee previously approved the experiment and the subjects signed informed consent agreements. A questionnaire was completed by each participant to quantify their experience with Korean teeterboard and report their usual landing technique. The acrobats were  $22.8 \pm 2.6$  years old with a body mass of  $73.5 \pm 5.4$  kg, a height of  $173.8 \pm 4.0$  cm, and  $6.3 \pm 4.1$

years of experience with Korean teeterboard. The first duo was composed of participant #1 (65 kg) and #3 (77 kg), while participant #2 (79 kg) and #4 (73 kg) formed the second pair.

**Korean teeterboard:** Three different Korean teeterboards were selected from Cirque du Soleil (CDS), Machine de Cirque (MDC) and École Nationale de Cirque (ENC). All teeterboards were made of the same ash wood assembly and foam sheet (Flexi-Roll mat, thickness: 2.5 cm) that covered the top of the board. Korean teeterboard geometrical and mechanical characteristics are presented in Fig. 2. The stiffness of each board was measured with a standard static loading protocol<sup>5</sup>. Weightlifting disks, previously weighed, provided incremental loads between 10 and 230 kg. The disks were placed approximately at the middle of the acrobat's feet on one end of the board, while the other end was fixed. The distance of the disk center to the board tip was 15 cm. The vertical position of the board tip under each added load was measured after waiting for the board to become stationary. It was determined by reading a meter stick secured to a vertical pole at the side of the board tip. The level of accuracy was  $\pm 1$  mm. Two trials were carried out for each added load. Both tests provided the same result. The stiffness was evaluated from Hooke's law.



Teeterboard	MDC	ENC	CDS
L (m)	3.350	3.390	3.050
d (cm)	42.0	49.5	51.0
d' (cm)	6.0	3.0	1.5
e (cm)	5.0	4.5	4.0
e' (cm)	3.0	3.0	2.0
Width (cm)	41.0	41.0	42.0

Teeterboard	Maximum deflection (cm)	Stiffness K (kN/m)
MDC	11.5	19.6
ENC	11.7	18.5
CDS	15.5	12.2

MDC: Machine de Cirque; ENC: École nationale de cirque; CDS: Cirque du Soleil

**Figure 10.** – Korean teeterboard geometrical and mechanical characteristics for Cirque du Soleil (CDS), École nationale de cirque (ENC), and Machine de cirque (MDC).

**Data collection:** F-scan pressure measurement insoles (Tekscan Inc., Boston, Massachusetts, USA) were used under each foot in order to record pressure distribution with a sampling rate of 750

Hz. The forces were estimated by the software provided by Tekscan and expressed in Newtons and then normalized to bodyweight (BW).

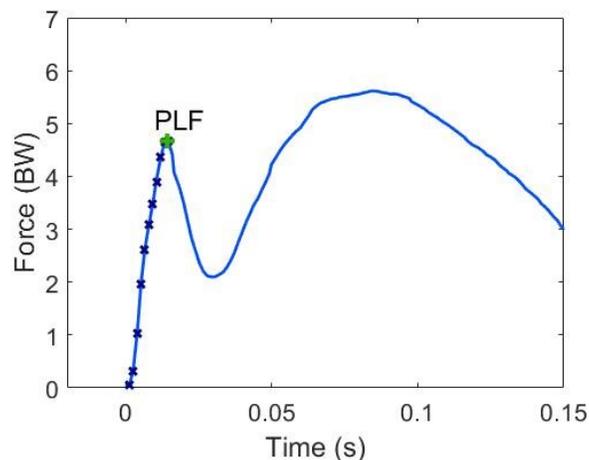
A motion capture system (Naturalpoint: OptiTrack FLEX13 cameras, Oregon, USA), comprised of ten infrared cameras, was utilized to collect the jump height of a marker located on the sternum at 30 Hz. The marker on the sternum was recorded throughout the whole performance (take-off, flight, and landing). Cameras were located 6.5 meters high, covering an area of 4.5 m x 3 m.

Before recording data, the participants completed a normal warm-up. After the installation of the marker on the sternum and the pressure insoles in both shoes, calibration was carried out according to the manufacturer guidelines using the step calibration. The participants wore their regular shoes (i.e. boxing shoes with thin soles), which allowed them to feel the contact with the board and the high mountings stabilized the ankle joint. Then, the acrobats were asked to perform regular jumps on each of the three teeterboards using four different landing techniques (normal, smooth, straight legs and empty board). Three landing techniques were repeated with between 35 and 45 jumps for the normal technique, 10 to 15 jumps for the straight legs technique and 10 to 15 jumps for the smooth technique for each acrobat. The acrobats shouted which landing technique they were performing, either the smooth or straight legs technique, and the rest were the normal technique. A coach specialized in Korean teeterboard told which jumps to keep, and advised and gave the acrobats feedback between the series of jumps on the quality of the jumps. The coach was a former gymnast and acrobat with more than 23 years of experience teaching the teeterboard. For safety reasons, only five trials were recorded with an “empty board” and these data were used as an extreme condition comparison. The “normal” landing technique requires the acrobat to flex the knees and hips before landing and push down on the board. The “smooth” landing consists of only keeping the knee and hips flexed before impact, whereas the “straight legs” technique consists of maintaining straight legs and hips prior to and during landing. In a smooth landing, the acrobat continues to flex his legs during the rotation of the teeterboard, until the board touches the mat, so that he ends with the knees in a flexed position. In normal landing, the acrobat extends his legs just after the first contact with the board, at the same time as the teeterboard rotates. The same 20 cm high mat was used for all tests (Spieth Andersen, Ontario,

Canada). The participants could take as much time to rest between series of jumps. All jumps were video recorded for quality control of movements.

Peak landing force, loading rate and jump height calculation: The Peak Landing Force (PLF), normalized to BW, were extracted from the force time profile (Figure 11) during each landing. PLF is commonly called impact/passive peak (van der Worp et al., 2016). Video analysis confirmed that all acrobats landed with flat feet or slightly on the heel and PLF was reached within 8-13 ms. The teeterboard angle favors this landing foot position. Maximum Loading Rate (MLR), expressed in BW/s, is a variable describing the rate of the force transmitted from the board to the body and has been widely used to characterize impact absorption (van der Worp et al., 2016). MLR is defined as the maximum slope between three force samples from foot/teeterboard contact to PLF. Every MLR was calculated with the three-point approach between the first contact and PLF, and the maximum value was used.

Kinematic data were smoothed with cubic spline. The vertical jump height was calculated from the vertical position of the sternum by subtracting the value of the acrobat standing upright on the teeterboard (on the mat) from the maximum height value. The speed was zero at the position from the ground on the mat and at the maximum height.



**Figure 11.** – Example of force-time profile from a trial of participant #3 during landing with normal technique. PLF is the first peak force (expressed in BW). Maximum loading rate expressed in

BW/s, was calculated as the maximum slope between three force samples between contact (time=0) and PLF.

PLF and MLR were categorized by participants, teeterboards and landing techniques. The quality of the jumps used for analysis was confirmed by the video recording. A total of 288 jumps were analyzed for PLF and MLR.

Statistical/machine learning analysis: The authors hypothesized that key factors, such as participants, teeterboard models and landing techniques, can influence both PLF and MLR values during landing. Because the distribution of the data was not normal (Shapiro-Wilk test  $p < 0.01$ ), the Boosted Regression Trees (BRT) (Elith et al., 2008), a statistical approach based on machine learning, was used. BRT have shown to be an effective method to identify relationships among various factors in several fields of research (Leathwick et al., 2006).

The BRT model quantified the influence (% of deviance) of different factors on output variables. Deviance measures how much the predicted values differ from the observations and represents the loss in predictive performance due to a suboptimal model. Percentage deviance explained, or pseudo  $R^2$ , was calculated as:

$$\left(1 - \frac{\text{residual deviance}}{\text{total deviance}}\right) \times 100\%$$

Pseudo  $R^2$  value should approach 100% when predictive performance is maximized (Elith et al., 2008). Higher numbers indicate a stronger influence on the response variables. The BRT model was used to examine the specific contribution of the four participants, three landing techniques (normal, smooth, and straight legs) and three teeterboard models (CDS, MDC and ENC). Due to the small number of samples, data for the “empty board” landing technique is presented as an extreme landing condition and therefore is not included in the analysis. The BRT models were developed using the ‘dismo’ and ‘gbm’ packages in the version R 3.6.1 of the software (R Development Core Team A, 2011).

Reliability study: The consistent reliability of acrobats’ responses were compared by calculating intraclass correlation coefficients (ICC) (McGraw & Wong, 1996) and coefficients of variation (CV) (Atkinson & Nevill, 1998). The reliability of the measurements of PLF (ICC = 0.819,

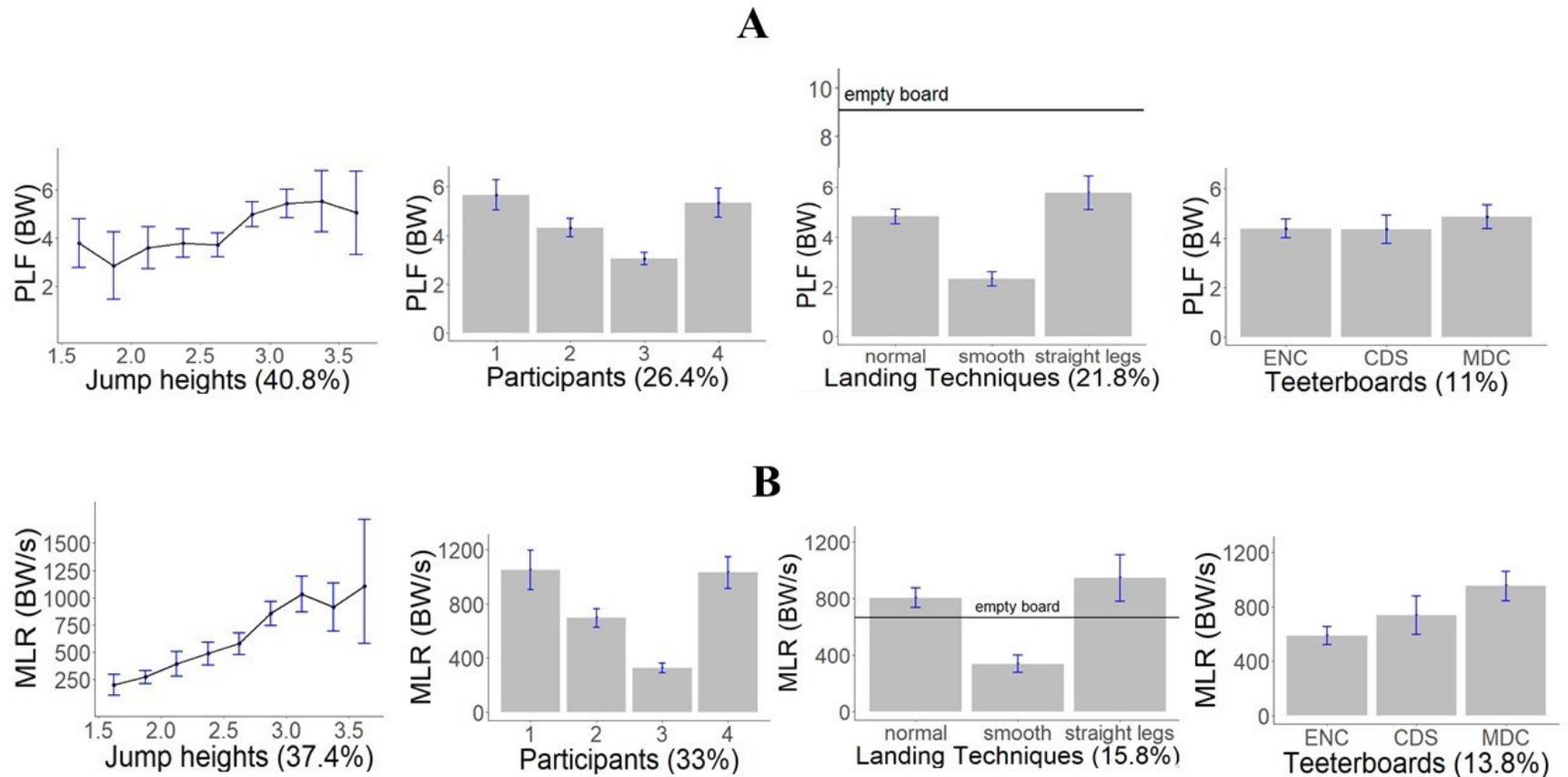
two-way random average measures), and MLR (ICC = 0.971) was high. Participants displayed low CV (the CVs ranged from 8.2 % to 11.2 % for PLF, the CVs ranged from 10.0 % to 13.8 % for MLR).

#### **4.2.4 Results**

Teeterboard mechanical characteristics: The relationship between the weights added and the teeterboard deflection was found to be linear. As shown in Figure 11, the thickest teeterboard (MDC: 5 cm) displayed the largest stiffness (19.6 kN/m) with the smallest deflection (11.5 cm), while the thinnest teeterboard (CDS: 4 cm) showed the smallest stiffness (12.2 kN/m) with the largest deflection (15.5 cm). The ENC teeterboard showed a stiffness of 18.5 kN/m, almost as high as the stiffness of the MDC teeterboard.

Peak Landing Forces: As shown in Figure 12A, the BRT model showed that PLF was influenced by jump heights (40.8%), participants (26.4%), landing techniques (21.8%), and the teeterboards (11%). With these four variables, the BRT model explained 69% of the deviance. Smooth landing technique produced the smallest PLF, which was approximately 2.5 times smaller than the “straight legs” technique. Landing on an “empty board” (average of 9 BW) means experiencing PLF almost twice as that with a normal landing technique. Participants #1 and #4 produced almost twice the PLF level compared to participant #3. These two participants were also the lighter acrobats of their respective duo. The MDC teeterboard produced the highest PLF values and is associated with the greatest teeterboard stiffness.





**Figure 12.** – A, Average and standard deviation of Peak Landing Force (PLF) and B, Maximal Loading Rate (MLR) with respect to jump heights, participants, landing techniques, and teeterboard types. Percentages of deviance explained from the BRT model are in parentheses. Mean value of empty board is presented in the Landing Techniques Figures as an extreme landing condition. École nationale de cirque (ENC), Cirque du Soleil (CDS) and Machine de cirque (MDC).



Maximum Loading Rate: Figure 12B shows that the jump height parameter was the most important factor (37.4%), followed by the participant (33%), landing technique (15.8%) and teeterboard (13.8%) associated with MLR values. The BRT model explained 71% of the deviance of MLR values. The smooth landing technique generated the lowest MLR, while “straight legs” and “normal” landings generated MLR that were more than two times higher. Overall, the MDC teeterboard generated the highest MLR, which was 50% greater than values measured with the ENC board. Similar to the PLF results, participant #3 showed the lowest MLR values, while the lightest participants (#1 and #4) showed the highest MLR values.

PLF and MLR values: The highest PLF value (13.5 BW) was recorded for participant #1 using the “straight legs” technique on the MDC teeterboard, while the highest MLR value (3050 BW/s) was also measured for participant #1 using a “normal” landing technique on the CDS teeterboard. The “empty board” landing generated a maximum value of PLF (13 BW) in participant #4 and moderate peak MLR value (1720 BW/s) in participant #2.

#### **4.2.5 Discussion**

Teeterboard stiffness: Since the width is very similar across all teeterboards, the stiffness is mainly influenced by the board’s thickness. Not surprisingly, the CDS teeterboard with the smallest thickness and the shorter length had the smaller stiffness (12.2 kN/m). The ENC and MDC teeterboards had almost the same thickness, but the ENC teeterboard center showed a smaller thickness. This characteristic may explain the slightly reduced stiffness (18.5 kN/m) of the ENC compared to the MDC teeterboard (19.6 kN/m). The stiffer teeterboard (MDC) is also associated with higher PLF and MLR values across all subjects. In comparison, the stiffness of aluminum diving boards ranges from 3.9 kN/m to 8.0 kN/m (Sprigings et al., 1990; Miller, 2000; Jones & Miller, 1996; Yeadon et al., 2006) with respect to the fulcrum position. The MaxiFlex B diving board had a stiffness approximately two to three times smaller than the three Korean teeterboards used in the present study. This can be explained by the fact that this diving board is about twice as long and half as thick (Sprigings et al., 1990) as the teeterboards used in this study. The material (i.e. aluminium) used in constructing the diving board likely affected the mechanical characteristics. Measuring static stiffness only is a simplification of the board properties. The

authors believe that a better model would be a non-linear torsional spring because the teeterboard not only bends, but also rotates around the pivot point. It has been reported that the springboard behaves as a linear spring with a small mass on top (Miller, 2000). The vaulting board was modelled as a non-linear damped torsional spring (Jackson et al., 2011) or a multi-model composed of 12 segments linked by torque springs for the upper part and two springs between the lower and upper part (Lehmann et al., 2020).

Maximum Peak Loading Forces: The shape of the force time profile for the first peak during landing is similar to the one described in both jumping (Seegmiller & McCaw, 2003) and landing from spike jump in volleyball (Sands, 2000).

Gymnasts developed a maximum peak force of 16.6 BW during back somersault landing on a force-plate (Mkaouer, 2013), which is 23% higher than the maximum PLF observed in the study (13.5BW for participant #1). Very few studies have evaluated ground reaction forces during landing from higher heights and movable surface. During trampoline jumps, Glitsch and Henrichs used pressure insoles to measure a maximum force of 7.5 BW under one foot for jumps between 1.6 and 2.5 m, whereas a combination of finite element modeling and musculoskeletal modeling estimated the peak force to range between 5.8 and 7.7 BW at one foot contact with the trampoline (Qian et al., 2020). If the forces are assumed to be equally distributed under each foot, the total should be approximately 15 BW in trampoline. This value is in agreement with the present results, despite differences in the surface material, jump height and landing technique. Moreover, the time to PLF in the present study occurred within 8-13 ms after the initial contact, suggesting the passive nature of this peak. Muscle response is not quick enough to be active and reduces the impact. Time to first peak exhibited by gymnasts was 10 ms during drop landings of 90 cm (Seegmiller & McCaw, 2003). In contrast, time to peak was estimated at approximately 100 ms in trampoline (Qian et al., 2020) and this difference may be explained by the flexibility characteristics of the trampoline surface.

Maximum Loading Rate: Seegmiller and McCaw (2003) measured the first peak force and the time to attain this force in jumping from 30, 60 and 90 cm. By assuming the calculation of the loading rate being the value of the first peak force divided by the time to this force, the average loading

rate for ten gymnasts jumping from 90 cm was 335 BW/s. These findings are consistent with the present study. The acrobats jumped from a height of approximately 3 m and their average loading rate was 2.4 times higher than the one reported by Seegmiller and McCaw for jump heights of 90 cm. In the present study, maximum MLR was 3050 BW/s, which is similar to findings presented by Hamdi (2012), who reported 2700 BW/s with gymnasts during back somersault landing on a force-plate. Yet, the mechanisms were different. The acrobats landed flat foot on a flexible board allowing rotation, while the gymnasts landed toe first on a rigid and fixed force plate mounted horizontally on the floor. In addition, the loading rate was calculated by dividing the first peak force by the time to reach this peak. In the current study, the maximum loading rate was calculated from the slope between three data points.

BRT model responses: The jump height showed the greatest influence on PLF and MLR values compared to participant, landing technique and teeterboard. These four combined parameters explained most of the deviance for PLF and MLR (69% and 71%, respectively). Other variables combining the dynamics of both acrobats forming a duo were not included in the present study and may have contributed to better explain the deviance of PLF and MLR values. Factors such as postural control, leg stiffness, angle of the body part or muscle activation may influence PLF and MLR.

Jump heights: The fact that jump height contributed to the majority of PLF and MLR (40.8 and 37.4%, respectively) shows that in Korean teeterboard, PLF and MLR increase with increasing jump heights. Previous studies have shown that jump height has a significant effect on peak ground reaction force in drop landings (Yeow et al., 2009; Elvin et al., 2007). Increasing the jump height can increase the exposure to high forces and loading rates, which are key contributing factors to injury (Dufek & Bates, 1991; Van der Worp et al., 2016; Zadpoor & Nikooyan, 2011). The most effective way of reducing loads on the body would be to decrease jump height. However, this is not desired as high jump height is necessary to achieve acrobatic performances.

Landing techniques: Normal and straight legs landing techniques showed the highest average values of both PLF and MLR, while “smooth landing” generated the smallest average values. The smooth landing is not a regular movement used by teeterboard acrobats because it affects jump

height. Although smooth landing is great to absorb impact, it reduces the momentum of the teeterboard and thus lowers the jump height for the other acrobat. The high PLF and MLR values associated with the “normal” landing technique is in agreement with previous research (Seegmiller & McCaw, 2003) that showed higher landing forces in competitive gymnasts compared to recreational athletes during drop landings. In that study, they concluded that skilled athletes seem to be more prone to injury than recreational athletes from landing impact responses.

Empty board: Although this technique was not included in the BRT analysis, landing on an “empty board” is a situation that can occur, especially with novice acrobats. It is indeed difficult to land on the small surface of the Korean teeterboard and maintain balance after landing. A bad landing may result in the acrobat stepping off the teeterboard, resulting in the other acrobat landing on an empty board. The high forces associated with the “empty board” landing is therefore a dangerous situation. Given the high impact forces, it is recommended that acrobats in Korean teeterboard should have good physical strength and adequate training to practice this discipline (FEDEC, 2009). It is extremely important for trainers and acrobats to be aware of the high impacts (up to 13BW) that the acrobat’s body experiences with an empty board.

Participants: In the present study, the PLF and MLR differ between the participants and seem to be associated with the acrobats’ weight. The two heavier participants (#2: 79 kg and #3: 77 kg) generated the smallest PLF and MLR, while the two lighter acrobats (#1: 65 kg and #4: 73 kg) generated the highest PLF and MLR. Since participants #2 and #4 and participants #1 and #3 formed two respective pairs, the PLF and MLR values can be explained by the fact that when the lightest acrobats were landing on the teeterboard, they experienced a greater resistance or a lower counterweight caused by the inertia of their respective heavier colleagues. This increased inertia means that the board did not rotate as rapidly and therefore did not move away from the feet as fast during the initial impact. The mass difference of 12 kg in one of the pairs can explain that participant #1 experienced the highest PLF (13.5 BW). Therefore, the mass difference between acrobats should be considered when training, as the production of high impact forces can lead to injuries during landing on certain teeterboards, especially on stiffer boards.

Teeterboards: The large majority of the highest PLF and MLR values were recorded using the MDC teeterboard. The MDC board was the thickest of the boards used in this study and showed the highest stiffness (19.6 kN/m), which was approximately 60% higher than the stiffness of the CDS board. The data from the present study suggests a relationship between teeterboard stiffness and the production of high PLF and MLR during teeterboard landing.

The smallest PLF were measured with both CDS and ENC boards, whereas the smallest MLR were clearly measured with the ENC teeterboard. Furthermore, it was assumed that the stiffness was the only parameter that could affect PLF and MLR values, but other parameters (i.e. length, height of pivot and teeterboard mass) may also contribute to PLF and MLR. Finding the optimal teeterboard design is a challenge for circus professionals. A board too thin will be too flexible and will create timing problem between acrobats, while a board too thick and rigid will interfere with the “whip effect” that is essential for the jump height. When a new teeterboard is manufactured, professionals remove layers of the board surface to reach the optimal board thickness (and stiffness) for their jumps.

Limitation of the study: Some limitations of the present study need to be noted. The small sample size and elite level of the participants prevent the authors from generalizing the results to all acrobats or beginners. Further studies should incorporate greater subject numbers. One limitation remains that the jump height was calculated from a marker located at the sternum and not from the center of mass of the acrobats. Future studies should also consider the timing between acrobats, specifically the timing of the flexion of the knee synchronized with the rotation of the board, in order to better understand the specificity of Korean teeterboard performance.

#### **4.2.6 Conclusion**

The aim of the study was to measure and compare stiffness across teeterboard and assess the influence of different factors, including three landing techniques, three teeterboard types and four participants, on PLF and MLR. This study is the first to incorporate additional factors like participants, landing techniques and teeterboard types and their relative influence on PLF and MLR. Moreover, this study provided the first ever data set of impact force and loading rates in a circus discipline.

The results showed that PLF and MLR increased with jump height. Maximum PLF and MLR were reached when landing on the MDC teeterboard with the highest stiffness. The “normal” and “straight legs” landing techniques were associated with higher PLF and MLR values, while landing on an “empty board” is also a precarious condition for transmitting high impacts. The BRT model was able to associate both PLF and MLR production with participants, teeterboard and landing technique factors. The results also showed that PLF and MLR were very high in Korean teeterboard, raising concerns for lower limb injuries. Considering the high impact force and high loading rate measured in this study, trainers should be aware of the importance of specific landing technique training to prevent lower extremity injuries in teeterboard acrobats. Mass difference in acrobat pairs should also be considered as a factor potentially leading to injuries to the lighter acrobat.

### **Acknowledgments**

The authors would like to acknowledge the Fonds de recherche Société et Culture (FRQSC) from the Quebec government for providing funding. They also would like to acknowledge the Cirque du Soleil, Machine de Cirque, École nationale de cirque de Montréal and the Center for Research, Innovation and Transfer in Circus Arts (CRITAC) for their support. The authors also want to thank Laurent Ballaz for the use of the force transducers.

### **Declaration of interest statement**

The authors report no conflict of interest.

## **4.3 Données complémentaires**

Le tableau 5 présente les valeurs moyennes des forces de réaction et de hauteur de saut pour les quatre participants pour des sauts normaux. La technique de réception normale est leur technique habituelle. Le participant 1 et 3 sautaient ensemble tandis que l'autre duo était composé des participants 2 et 4. Dans chaque duo d'acrobates, le participant le plus lourd (participant 3 et participant 2) ont sauté moins haut et ont généré des forces moins élevées que leur partenaire. Ces données renforcent le fait que la différence de masse est vraiment importante dans les forces de réactions.

Tableau 5. – Forces de réaction moyennes et hauteur moyennes pour des sauts normaux.

<b>Participant</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Masse</b>	65	79	77	73
<b>Hauteur de saut moyenne (m)</b>	2.92	2.77	2.66	2.98
<b>Forces de réaction moyennes (poids corporel)</b>	6.3	4.5	3.1	5.3

Dans le tableau 6, les hauteurs moyennes de saut des quatre participants sont présentées en fonction des planches pour des sauts normaux. Pour les quatre participants, la planche avec laquelle ils ont sauté plus haut est la planche CDS qui avait la raideur la moins élevée. Il est impossible de conclure sur l'influence de la raideur des planches sur la hauteur de saut. La planche CDS est la planche la plus souple mais également la planche préférée de tous les acrobates. Un effet psychologique peut entrer en jeu lors de l'exécution des sauts et qui pourrait expliquer cette différence de hauteur de saut. En hockey, plusieurs études montrent que la façon dont l'athlète bouge le bâton a autant, voire plus, d'influence sur la vitesse de la rondelle que la raideur du bâton (Hannon et al. 2011; Worobets et al., 2006; Pearsall et al., 1999; Wu et al., 2003). Plus de recherche quant au lien entre le niveau des acrobates ou la raideur de la planche et la hauteur de saut est requise.

Tableau 6. – Hauteur de saut moyenne (m) par participant et par planche pour des sauts normaux.

<b>Participant</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Planche ENC</b>	2.80	2.58	2.65	3.00
<b>Planche CDS</b>	3.14	3.51	2.74	3.16
<b>Planche MDC</b>	2.83	2.72	2.60	2.91



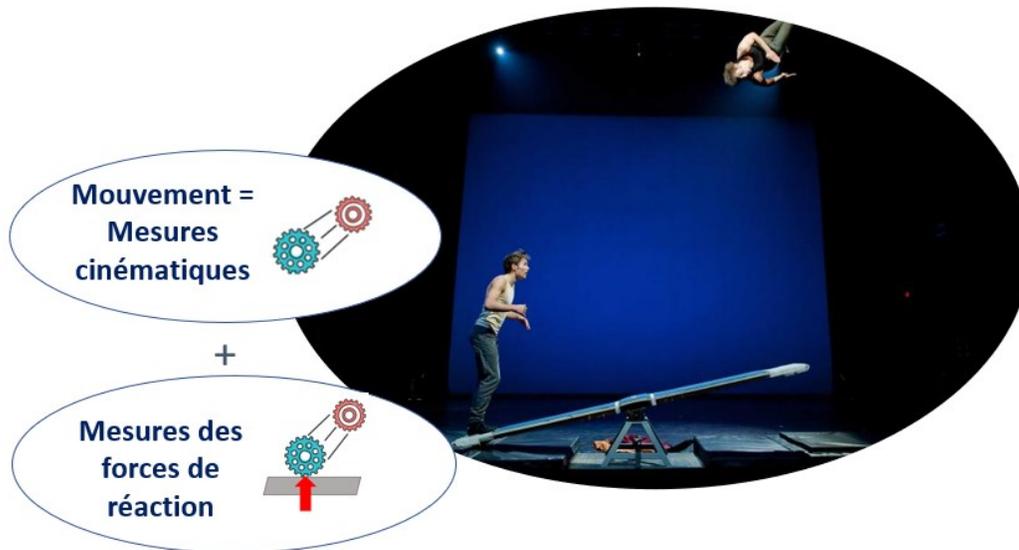
# Chapitre 5 – Facteurs cinématiques influençant la hauteur de saut en planche coréenne

## 5.1 Avant-propos

L'objectif de l'acrobate semble simple en apparence : sauter le plus haut possible afin d'exécuter des mouvements acrobatiques. Cependant, le mouvement de l'acrobate est fortement contraint par la planche et par le mouvement de l'acrobate-partenaire. Les schémas de mouvement observés lorsqu'un individu exécute une activité physique spécifique seront rarement identiques à ceux d'une autre personne et même les répétitions d'un mouvement du même individu peuvent varier. En planche coréenne, le mouvement de l'acrobate peut notamment varier en réponse à la réaction de la planche et au mouvement de l'acrobate-partenaire. Ainsi, comprendre le mouvement de l'acrobate permet de mieux comprendre ses interactions dans son système planche-acrobate-acrobate/partenaire. De plus, des données cinétiques (chapitre 3) et cinématiques (chapitre 4) sont la base pour développer des modèles humains, afin de par exemple optimiser le mouvement.

C'est pourquoi la deuxième étape de la thèse consiste en la mesure de la cinématique des acrobates (Figure 13). L'objectif de la deuxième étude est de déterminer les facteurs biomécaniques qui la hauteur de saut. Cet objectif se décompose en étapes suivantes :

- (1) Quantifier l'influence de plusieurs facteurs biomécaniques dans la hauteur de saut.
- (2) Établir la relation entre l'acrobate se réceptionnant et l'acrobate s'élançant dans les airs dans la contribution de la hauteur de saut.



**Figure 13.** – Étape 2 de la structure de thèse : mesure de la cinématique des acrobates.

Ce chapitre de thèse présente notre deuxième article publié intitulé : “A Kinematic Analysis of Jumping Technique in Elite Korean Teeterboard Athletes: A Case-study”, co-écrit par Annie Ross et François Prince. Cet article est actuellement publié dans le journal *Sports Biomechanics* pour un spécial en “Biomechanics of Acrobatic Sports” en décembre 2021 (DOI : <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.2018030>).

Cet article présente une étude cinématique de deux acrobates réalisant des sauts en planche coréenne, ainsi qu’une analyse des facteurs qui influencent la hauteur de saut. La dynamique de saut en planche coréenne est unique. La réception d’un acrobate fait pivoter la planche, ce qui permet à l’acrobate-partenaire de décoller. Pour ce faire, les acrobates plient les hanches et les jambes avant que la planche se mettent en mouvement et commencent à déplier leurs membres inférieurs juste avant que la planche se mettent en mouvement. Ils continuent ainsi tout le long que la planche les catapulte. Pour la réception, les acrobates utilisent une technique de poussée pour aider leur partenaire à avoir la bonne impulsion. La technique de poussée consiste à plier leurs jambes juste avant le contact avec la planche et les déplier tout le long du mouvement de la planche jusqu’à arriver au matelas. Ces techniques n’ont jamais été documentées précisément. De plus, la hauteur de saut est un critère relativement important en planche coréenne, car un temps dans les airs assez long permet la réalisation de mouvements acrobatiques. C’est pourquoi

l'étude présentée dans ce chapitre consiste en l'analyse de paramètres cinématiques et leur influence dans la hauteur de saut.

## 5.2 Article 2

### **A Kinematic Analysis of Jumping Technique in Elite Korean Teeterboard Athletes: A Case-study**

Marion Cossin<sup>\*a</sup>, Annie Ross<sup>b</sup> and François Prince<sup>c,d</sup>

<sup>a</sup>Département de Pharmacologie et Physiologie, Faculté de médecine, Université de Montréal, 2100 Edouard-Montpetit Bld, Montréal, Québec, Canada H3C 3J7;

<sup>b</sup>Département de génie mécanique, Polytechnique Montréal, 2900 Edouard-Montpetit Bld, Montréal, Québec, Canada H3T 1J7;

<sup>c</sup>Département de chirurgie, Faculté de médecine, Université de Montréal, 2100 Edouard-Montpetit Bld, Montréal, Québec, Canada H3C 3J7;

<sup>d</sup>Institut national du sport du Québec, 4141 avenue Pierre-De Coubertin, Montréal, Québec

#### **5.2.1 Abstract**

Korean teeterboard is a circus discipline that consists of a board pivoted at its center upon which two acrobats are catapulted in turn performing acrobatic jumps. This paper presents one of the first studies that focuses on investigating the factors that contribute to jump height in Korean teeterboard. A total of 120 jumps were recorded from two acrobats using motion capture. Selected variables were input to a Boosted Regression Trees (BRT) analysis, corresponding to three specific events: acrobat landing, rotation of the teeterboard and acrobat take-off. Significant predictor variables were identified as: 1) body's center of mass vertical velocity at the first contact with the teeterboard (relative importance: 69.4%) for landing, 2) maximum downward vertical teeterboard velocity for teeterboard rotation (72.7%) and 3) maximum upward vertical teeterboard velocity for take-off (50.4%). Kinematic parameters such as hip range of motion during take-off also contributed significantly to jump height (37.2%). The results provide understanding of the complex kinematics between two acrobats and a flexible pivoting

board. Teeterboard designers, acrobats and trainers should be aware that maximizing these parameters are the best strategies to improve jump height.

**Keywords:** circus; kinematics; elite acrobat; Korean teeterboard.

### 5.2.2 Introduction

The Korean teeterboard is a circus specialty that requires acrobats to propel themselves into the air using a long board resembling a seesaw, perform acrobatic movements, and then land on the apparatus. The landing makes the teeterboard rotate around the pivot point in the middle of the board, so that the other acrobat can take-off. The continuous movement of landing and take-off is interdependent because the take-off of one acrobat depends on the landing of the other. Height achieved in Korean teeterboard is known to be an important contributing factor to performance. More height means more time to perform acrobatic aerial tricks.

The Korean teeterboard is a complex system in which both the rotation and the deformation (release or recoil effect) of the board contribute to jump height. During take-off, acrobats flex their legs and hips before the board starts to rotate and extend their legs during the rotation of the board (Cossin et al., 2021a). The timing of recoil or release, also called the “whip” by acrobats, seems to be crucial. During landing, acrobats usually flex their legs before the first contact with the board and extend their legs during the rotation of the board to fully transfer elastic and kinetic energy to the board, adding to the amount of board rotation and bending (FEDEC, 2009).

In the past, researchers have looked at factors influencing dive height in diving, including hip and knee range of motion, hip, knee, and ankle angle at touchdown (from the hurdle phase), center of mass (COM) vertical velocity at touchdown and external work calculated as the change in kinetic energy and potential energy between touchdown and take-off (Sayyah et al., 2016; Sinclair et al., 2012; King et al., 2009; Miller et al., 2002; Sanders & Wilson, 1988). An upright posture during springboard recoil resulted in greater kinetic energy from the springboard being converted to vertical velocity (Miller & Sprigings, 2001). Techniques to produce maximum jump height were also determined using torque driven computer models of springboard diving take-offs (King et al., 2019 ; Yeadon et al., 2006 ; Cheng & Hubbard, 2004). However, the relationship between kinematics and jump height in Korean teeterboard have not been identified. The aim of the

present study was to investigate which factors contribute to jump height in Korean teeterboard. A biomechanical analysis of the dynamics between acrobats and the interaction with the teeterboard was carried out. We hypothesized that kinematic factors of the acrobat at landing and the acrobat at take-off have a significant influence on jump height in Korean teeterboard.

### **5.2.3 Methods**

Participants: Two professional acrobats, 2 men (acrobat 1: 26 years old; height: 1.83 m; body mass: 74 kg, 10 years of experience, and acrobat 2: 30 years old; height: 1.90 m; body mass: 73 kg, 16 years of experience), were recruited for the study. Informed consent was obtained from the participants in accordance with the Ethics Committee of the University of Montreal. Both participants were physically active, reported no injury and were with their regular partner in Korean teeterboard.

Procedures and measurement equipment: Anthropometric measurements were acquired for each subject. A warm-up routine, consisting of moderate jogging, joint mobility exercises and jumping preceded the actual tests. Participants were instructed to jump on their regular teeterboard (material: ash wood, length: 3.2 m, width: 43.5 cm, thickness varies from 2.5 cm at the ends to 4 cm at the middle and height of the pivot point: 49.4 cm) and their regular mattress (height: 15.2 cm) around the board. They were asked to use a natural jumping technique and performed 10 series of about 10 straight jumps. The natural landing technique is called a pushing technique as the acrobats flex their knees before the first contact with the teeterboard and extend them during the rotation of the teeterboard. A few minutes of rest was given between each series. A paramedic was present during the experiments, as requested by the ethical committee.

Kinematic data capture was performed in a laboratory equipped with a 68-camera Vicon motion analysis system (Vicon Motion Systems, Oxford, UK) sampling at 120 Hz. A total of 39 reflective markers of 14 mm diameter were attached on the anatomical locations using the full-body Plug-in-Gait marker set. The markers defined the head, the thorax, the left and right upper arm, the left and right forearm, the pelvis, the left and right thighs, legs, and feet. Marker locations were registered in a standing position to perform a static calibration before the jump trials. Four

markers, one on each side of the edge of the board at the foot location and at the end of the board, were also placed to capture the vertical motion of the board. All trials were video recorded, and all data were electronically synchronized in time.

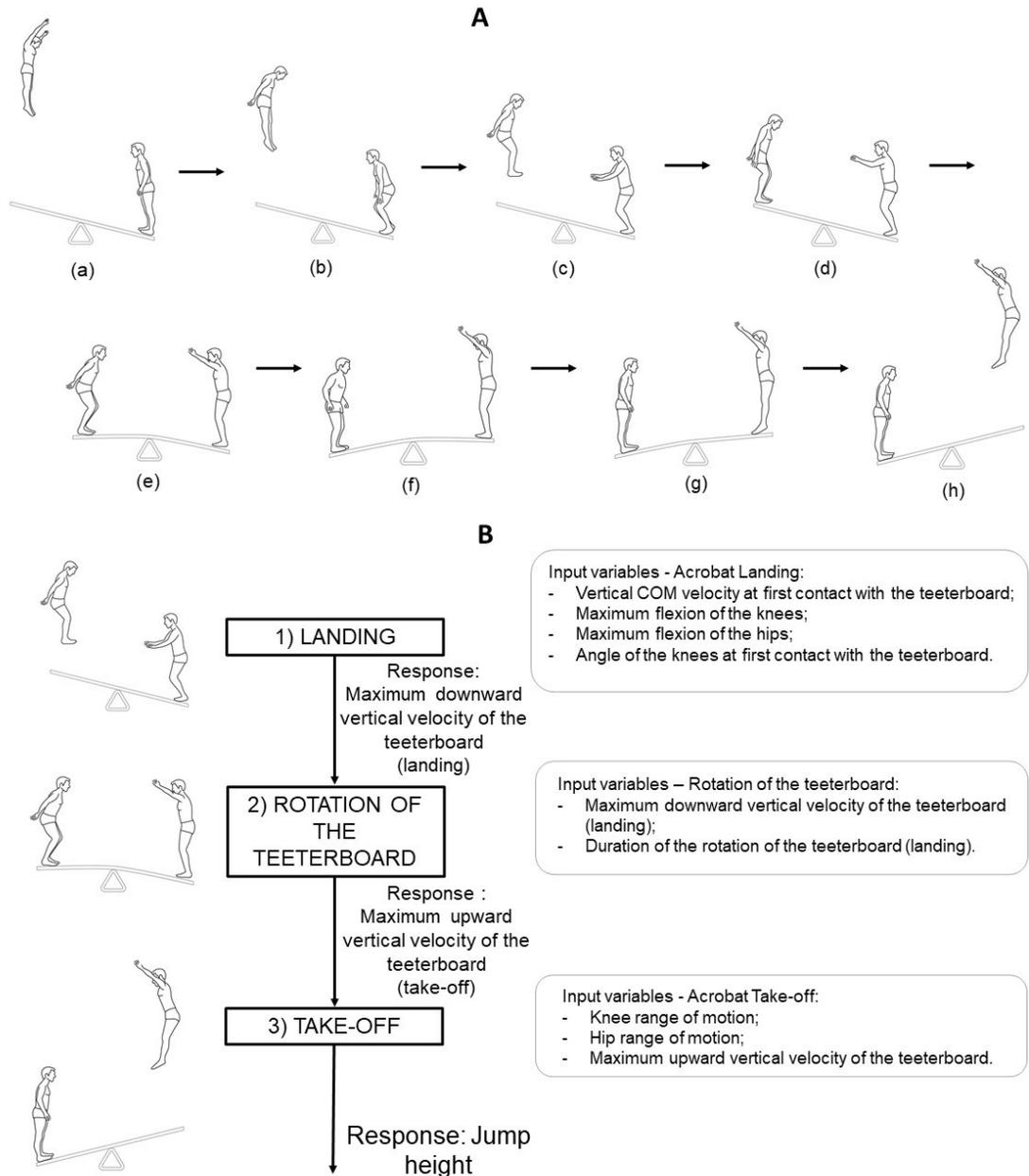
Data and statistical analysis: Marker data were filtered using a Butterworth 4th order zero-lag dual-pass, low pass filter with a cut-off frequency of 10 Hz. The first and last jumps in each series being not high enough ( $COM < 3.5m$ ), they were removed from the analysis as well as the missed ones when the acrobat fell backward or lost balance during landing. A total of 120 jumps for the pair of acrobats were included in the analysis. Joint kinematics and COM position were estimated with the Plug-in-gait model using custom Matlab scripts (Mathworks, Natick, MA, USA). Left and right hip and knee angles were averaged for the analysis.

In order to investigate the contribution of variables to jump height, three analyses were performed corresponding to the three phases of the performance: 1) landing phase, 2) teeterboard rotation phase and 3) take-off phase (Figures 14 and 15). The landing phase encompasses the flexion of the hips and knees of the acrobat prior to contact with the teeterboard (Figure 14c), the touchdown (Figure 14d) and the extension of the hips and knees while the teeterboard goes down (Figure 14e and 14f). The teeterboard rotation phase includes the rotation of the teeterboard, whether it be for landing or take-off (Figure 14e and 14f). The take-off phase contains the flexion of the hips and knees for the acrobat taking off (Figure 14b), the extension of the hips and knees prior to (Figure 14c) and during (Figure 14d and 14e) the movement of the teeterboard until the last contact with the board (Figure 14f and 14g). A list of the input variables and the response variable used for the three analyses is presented in Figure 14. The response variables of analysis 1) landing and 2) rotation of the teeterboard are input variables of analysis 2) rotation of the teeterboard and 3) take-off, respectively, to reflect the movement phases of the performance.

For the landing phase analysis, four input variables (vertical COM velocity at touchdown, maximum flexion of the hips and knees, and angle of the knee at touchdown) were selected to explain the response variable (maximum downward vertical velocity of the teeterboard). The maximum downward vertical velocity of the teeterboard and the duration of the rotation of the

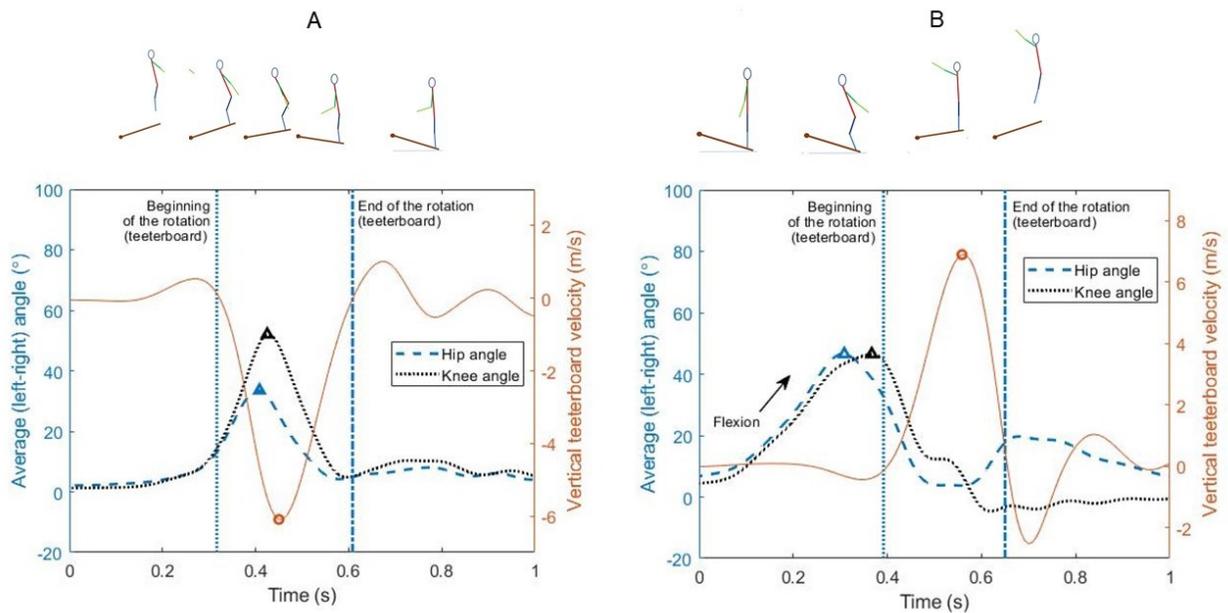
teeterboard at landing were considered as inputs to the rotation of the teeterboard phase analysis and the maximum upward vertical velocity of the teeterboard was the response variable. In the take-off phase analysis, the input parameters included the knee and hip range of motion and the maximum upward vertical velocity of the teeterboard and were used to predict jump height.

The beginning and the end of rotation are respectively defined by the maximum and minimum vertical positions of the marker at the end of the teeterboard (Figure 15). The vertical teeterboard velocity is the time derivative of the vertical position of the marker at the foot location of the teeterboard. The hip and knee range of motion is calculated as the difference between the maximum flexion during takeoff preparation (before the rotation of the board) and the maximum extension (during the rotation of the board). The jump height was calculated from the vertical position of the center of mass by subtracting the value in which the acrobat is standing upright on the teeterboard (on the mat) from the maximum height value.



**Figure 14.** – A. Description of the movement: (a) maximum jump height for the acrobat on the left and ground phase for the acrobat on the right, (b) descent for the acrobat on the left and flexion of the hips and knees for the acrobat on the right, (c) flexion of the hips and knees for the acrobat on the left and extension of the hips and knees for the acrobat on the right, (d) first contact with the teeterboard for the acrobat on the left and extension of the hips and knees for the acrobat on the right, (e) maximum flexion for the acrobat on the left, extension of the hips and knees for the acrobat on the right and rotation of the teeterboard,

(f) extension of the hips and knees for the acrobat on the left, straight position for the acrobat on the right and rotation of the teeterboard, (g) contact with the mat for the acrobat on the left and last contact for the acrobat on the right, and (h) ground phase on the mat for the acrobat on the left and aerial phase for the acrobat on the right ; and B. Sequence of the three analyses corresponding to the sequence of performance: 1) landing, 2) rotation of the teeterboard and 3) take-off. Input and response variables are provided for the three analyses.



**Figure 15.** – Knee and hip angle and vertical velocity of the teeterboard at the foot location for landing (A) and take-off (B) phases. The two vertical lines represent the beginning and the end of the rotation of the teeterboard, defined by the minimum and maximum positions of the marker at the end of the teeterboard. ◊, maximum hip or knee flexion and, o, maximal upward or downward vertical velocity of the teeterboard.

Three boosted regression trees (BRT) were performed using R statistical software (R Core Team) and the gbm package. BRT are machine learning methods that allow assessing the predictor importance or contribution of each input variable (listed in Figure 14) in predicting the response (Elith et al., 2008). The model provides a pseudo  $R^2$ , as a measure of the overall performance of the model. It also provides the relative influence in percentage of each variable which indicates

how much contribution each predictor variable brings to the deviance to the response variable. The measure of relative influence is scaled so that the sum of all relative influences adds to 100%, with higher values indicating stronger influence on the response variable (Elith et al., 2008).

### 5.2.4 Results

During take-off, the acrobat starts to flex their hips and knees approximately 300 ms before the movement of the board (Figure 15B). Maximal hip and knee flexion occurs approximately just before the movement of the board. The acrobat then adopts a straight position at the maximal upward vertical teeterboard velocity at about 2/3 of the time of rotation. During landing, the acrobat flexes their knees and hips before the first board contact until 1/3 of the time of rotation is completed (Figure 15A). Then the acrobat starts extending their knees and hips in order to “push on the board”. The maximal downward velocity of the teeterboard happens a just after maximal flexion of the hips and knees. The acrobat synchronizes the extension of the hip and knee so that they end in a straight position on the mat.

The BRT analysis demonstrated that input variables explained 80%, 67% and 94% of the deviance during landing, teeterboard rotation and the take-off phases respectively (Table 7). All selected input variables had a significant contribution to the response. The COM vertical velocity at the time of feet contact with the teeterboard was the variable that influenced the most the maximum downward velocity of the teeterboard during landing, whereas the maximum upward vertical velocity of the teeterboard during take-off was the most important contributor for the jump height.

Tableau 7. – The mean, standard deviation, and percentage of the contribution of input variables for acrobat 1 and acrobat 2

Model	Variable	Mean ± SD (acrobat 1 / acrobat 2)	% of contribution (BRT model)
Landing Phase		-7.34 ± 0.39 m/s	69.4%

<p>(R<sup>2</sup> = 80%)</p> <p>Response variable: Maximum downward vertical velocity of the teeterboard</p>	COM vertical velocity at the first teeterboard contact (acrobat landing)	-7.60 ± 0.37 m/s	
	Maximum knee flexion (acrobat landing)	48.2 ± 4.8°	7.5%
		43.4 ± 3.1°	
	Maximum hip flexion (acrobat landing)	35.6 ± 6.3°	11.3%
		47.8 ± 4.8°	
	Knee angle at first contact with the teeterboard (acrobat landing)	11.5 ± 2.3°	11.8%
26.5 ± 3.6°			
<p>Board Rotation Phase</p> <p>(R<sup>2</sup> = 67%)</p> <p>Response variable: Maximum upward vertical velocity of the teeterboard</p>	Minimum vertical teeterboard velocity (landing)	-6.54 ± 0.20 m/s	72.7%
	Duration of teeterboard rotation (landing)	296 ± 12 ms	27.3%
<p>Take-off Phase</p> <p>(R<sup>2</sup> = 94%)</p> <p>Response variable: Jump height</p>	Knee range of motion (take-off)	39.5 ± 3.3°	12.4%
		41.9 ± 5.2°	
	Hip range of motion (take-off)	65.9 ± 2.9°	37.2%
		51.8 ± 3.9°	
	Maximum vertical teeterboard velocity (take-off)	5.92 ± 0.24 m/s	50.4%
Jump height	4.36 ± 0.26 m	--	

		4.20 ± 0.31 m	
--	--	---------------	--

### 5.2.5 Discussion and implications

The results showed that the combined parameters respectively explain 80%, 67% and 94% of the total variability of each response variable for #1 (landing), #2 (rotation of the teeterboard) and #3 (take-off). Regarding the relative importance of each predictor variable inside the explained variability, COM vertical velocity at the time of foot contact with the teeterboard of the acrobat landing was the most important variable to explain the maximum downward vertical velocity of the teeterboard during #1 landing (69.4%). The maximum downward vertical teeterboard velocity during landing had the most influence on the maximum upward vertical teeterboard velocity during #2 take-off (72.7%). The maximum upward vertical teeterboard velocity during #3 take-off was the strongest predictor for the jump height (42.6%). This finding highlights the importance of the dynamic interaction between both acrobats and the teeterboard.

During the landing phase (#1), the acrobat strategy would be to increase the vertical downward velocity of the board, similar to the hurdle step in diving. Sayyah et al. (2016), Sanders & Wilson (1988) and Sinclair et al. (2012) found that adopting both a crouch position (hip and knee flexed) at touchdown and a high vertical COM velocity at touchdown are related to an increase in the dive height. Flexion of hips and knees at touchdown allows the acrobat to do more work on the board, and therefore to transfer more energy (Sanders & Wilson, 1988). In our study, knee flexion (11.8%) and COM velocity at touchdown (69.4%) were found to be significant contributors to the vertical teeterboard downward velocity during the landing. The difference between disciplines is that while the diver recovers energy from the springboard to him/herself, the landing acrobat transfers energy to the other acrobat via the teeterboard.

During take-off (#3) phase, Sayyah et al. (2016) found that hip range of motion ( $66.0 \pm 4.7^\circ$ ) during take-off explained 77% of the variance in dive height. In our study, hip range of motion (acrobat 1:  $65.9 \pm 2.9^\circ$  and acrobat 2:  $51.8 \pm 3.9^\circ$ ) is one of the strongest predictors of jump height during take-off (37.2%). However, large hip flexion is not intended in teeterboard acrobats as it enhances

COM horizontal velocity. To prevent horizontal COM displacement, the acrobats started the aerial phase in a slight hip flexion “pike” position (as shown in Figure 15).

During the rotation of the teeterboard (#2), teeterboard velocity seems to be the strongest factor from the analyses during both take-off and landing phases. Acrobats should maximize the board bend during landing, and board bend and recoil during take-off to optimize vertical teeterboard velocity. Previous research indicated the importance of the recoil phase as energy is absorbed by divers to be projected into the air. The mechanical work done on the springboard is influenced by the amount of board depression (Sayyah et al., 2016 ; Miller et al., 2002 ; Sanders & Wilson, 1988). Equipment designers should try to maximize board bending because it is strongly associated with board velocity at take-off. However, too much bending can contribute to timing problems between acrobats. If a board is too flexible, the landing acrobat will touch the mattress before the board starts to rotate, which is not wanted. The board should be stiff enough to rotate, but flexible enough to allow the recoil effect. Another parameter that could affect the rotation of the teeterboard and thus the vertical velocity is the height of the pivot point of the teeterboard. More height implies higher angle of the board, which changes the timing of the recoil effect. However, too much angle could be negative. Acrobats land with a higher angle at the ankles and are at higher risk of unbalance. Finding the right mechanical behavior is a challenge for both acrobats and teeterboard designers.

Limited information is currently available on training acrobats on Korean teeterboard (FEDEC, 2009). During take-off phase, before the teeterboard starts to rotate, the acrobat flexes both knees and hips. Then, they start extending their knees and hips just before the board starts to move. It’s a continuous movement so that there is no jolt that could interfere with the movement. During take-off, it also seems important that the acrobat adopts a straight position at the maximal upward vertical teeterboard velocity to reduce the energy loss between the teeterboard and the acrobat, as found in springboard diving (Miller & Sprigings, 2001). If the acrobat flexes their knees or hips during the instant of maximum teeterboard upward velocity, they will reduce the teeterboard energy contribution and reach lower heights. Sanders & Wilson (1988) and Cheng & Hubbard (2004) found that timing aspects seemed important as knee joints were still extending up until the instant of takeoff. Our results also suggest that timing and coordination between the

teeterboard and the acrobats are important in jump performance. The coach should be aware of corresponding required acrobat position at different phases of the movement to increase jump height.

Results of this study also reveal that differences could be found between the two acrobats, especially the hip range of motion during take-off, the knee angle at the time of first contact and the maximum hip flexion during landing. Such differences between acrobats may be the result of an individual-specific technique, i.e. performers find unique solutions in jumping on Korean teeterboard according to their morphology. Although having almost the same mass (1 kg difference), the two acrobats had different heights (7 cm difference). They would have to choose the best compromise guaranteeing the best individual technique. Given the many years of experience (10 and 16 years), it is conceivable that both have already adopted their own truly optimal technique.

This study has given promising results, yet some limitations should be noted. Given that it is one of the first studies focusing on jump height in Korean teeterboard, further research is required with more participants to fully understand the relationship between timing coordination and the mechanical behavior of the teeterboard in order to increase jump height.

### **5.2.6 Conclusion**

This preliminary case study offers good indications on the biomechanical pattern in Korean teeterboard and explains the underlying contribution of kinematic factors to jump height. COM vertical velocity at touchdown of the acrobat landing made the greatest contribution to maximum downward vertical teeterboard velocity, which is associated with jump height. Maximal upward vertical teeterboard velocity during take-off had the strongest influence on jump height. From these results, a better understanding of the dynamics between acrobats and the teeterboard was shown, as the landing of one acrobat influenced the jump height of the opposite acrobat. Further, these findings provide guidance for future Korean teeterboard design, involving different board stiffness and deflections, as well as different heights of the pivot point.

## **Acknowledgments**

The authors would like to acknowledge the Fonds de recherche Société et Culture (FRQSC) from the Quebec government for providing funding. They also would like to acknowledge the Cirque Éloize, the Center for Research, Innovation and Transfer in Circus Arts (CRITAC) and the Centre de développement et de recherche en imagerie numérique (CDRIN) for their support. They would like to thank all participants that voluntary participated in this study.

## **Declaration of interest statement**

No potential conflict of interest was reported by the author(s).



# **Chapitre 6 – Phase de saut et activation musculaire chez des acrobates débutants et professionnels en planche coréenne**

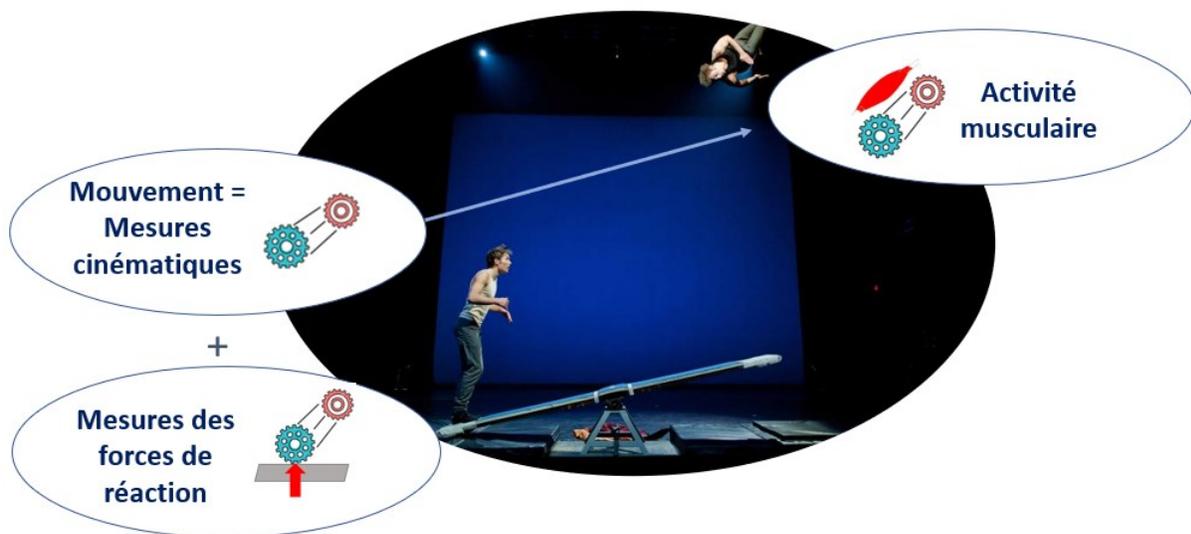
## **6.1 Avant-propos**

Une première étape dans l'analyse de mouvement consiste à établir les phases dans lequel le mouvement peut être divisé pour ensuite l'analyser et faire le lien avec les mesures cinématiques (chapitre 4). Chaque phase est définie par une fonction biomécanique claire, et est facilement identifiable. L'analyse de phase permet de comprendre le mouvement humain dans son intégralité. En planche coréenne, l'acrobate vise à sauter. Lors du décollage, la phase de préparation ou de descente vise à mettre le corps dans une position avantageuse pour la phase suivante d'élévation. Les muscles extenseurs des hanches et des genoux se contractent de manière excentrique pour permettre aux genoux et aux hanches de fléchir simultanément dans la phase de préparation. L'action suivante implique l'extension simultanée des hanches et des genoux afin de pousser le corps verticalement vers le haut. Cependant, l'acrobate ne prend pas appui sur un sol rigide, mais sur une planche en mouvement. Les chevilles sont contraintes à l'angle de la planche par exemple. Sauter semble être une activité simple, mais actionner les bons muscles au bon moment n'a pas l'air si évident en planche coréenne. Toutes ces phases et donc l'action des muscles correspondantes doivent être structurées, séquentielles et absolument synchronisées temporellement avec la planche et l'autre acrobate.

Par ailleurs, il est connu que chaque force qui agit sur le corps humain envoie des signaux aux différents tissus. Nous avons démontré que les forces mesurées au chapitre 3 peuvent varier en amplitude et dépendent de plusieurs facteurs. Les signaux aux différents tissus en réponse aux forces peuvent avoir des effets positifs ou des effets négatifs sur le corps humain. Le contrôle humain et ses fonctions peuvent donc réagir différemment. Comprendre de tels signaux et savoir envoyer les bons signaux serait une voie pour améliorer les performances. Le premier défi consiste donc à mesurer ces signaux face aux stimulus extérieurs, afin de par la suite mesurer l'adaptation biologique.

Ainsi la troisième étape de la thèse consiste en l'analyse de l'activité musculaire (Figure 16). L'objectif de la troisième étude est de déterminer les facteurs qui influencent l'activité musculaire. Cet objectif se décompose en étapes suivantes :

- (1) Mesurer et caractériser l'activité musculaire des jambes dans la performance en planche coréenne.
- (2) Quantifier la différence de contribution musculaire et de durée des phases du mouvement entre acrobates débutants et acrobates élités.



**Figure 16.** – Étape 3 de la structure de thèse : mesure de l'activité musculaire.

Ce chapitre présente une troisième étude non-publiée intitulée : " Difference in muscle activation between expert and novice circus acrobats in jumping with Korean teeterboard: a case-study " co-écrite par Annie Ross et François Prince.

Analyser la biomécanique du saut en planche coréenne et spécifiquement la différence entre un saut de bonne qualité et un saut de moins bonne qualité permet de mieux comprendre ses mécanismes. Classiquement dans la littérature scientifique, l'activité musculaire permet de quantifier les différentes actions musculaires lors d'un mouvement et est évaluée à partir de l'enregistrement de l'électromyographie (EMG) de surface. Plusieurs paramètres sont analysés

dans les études portant sur l'activation musculaire comme l'amplitude de l'activation musculaire ou la durée de cette dernière. En planche coréenne, les étapes de décollage et de l'atterrissage semblent cruciales dans la performance. La différence dans l'activation musculaire, s'il y en a une, entre un mouvement de bonne qualité vs de moindre qualité se situeraient probablement durant ces périodes. L'étude de l'activité musculaire et du mouvement entre deux groupes, des acrobates experts et novices, constitue une occasion privilégiée de comprendre la différence entre une bonne exécution du mouvement et une moins bonne. Des recommandations sur les stratégies de coordination entre le mouvement de l'acrobate et le mouvement de la planche peuvent aider les acrobates et les entraîneurs à optimiser leurs entraînements.

## **6.2 Article 3**

### **Difference in muscle activation between expert and novice circus acrobats in jumping with Korean teeterboard: A Case-study**

Marion Cossin<sup>a</sup>, Annie Ross<sup>b</sup> and François Prince<sup>c,d</sup>

<sup>a</sup>Département de Pharmacologie et Physiologie, Faculté de médecine, Université de Montréal, 2100 Edouard-Montpetit Bld, Montréal, Québec, Canada H3C 3J7; <sup>b</sup>Département de génie mécanique, Polytechnique Montréal, 2900 Edouard-Montpetit Bld, Montréal, Québec, Canada H3T 1J7; <sup>c</sup>Département de chirurgie, Faculté de médecine, Université de Montréal, 2100 Edouard-Montpetit Bld, Montréal, Québec, Canada H3C 3J7; <sup>d</sup>Institut national du sport du Québec, 4141 avenue Pierre-De Coubertin, Montréal, Québec

#### **6.2.1 Abstract**

The present study aimed to compare muscle activation and the duration of different phases during normal jumps on a Korean teeterboard between expert and novice acrobats. The Korean teeterboard is a circus discipline in which two acrobats, located at each end of a long rotating board, jump in turn and do acrobatic movements while in the air. Surface electromyography (EMG) of lower limbs muscles was measured in 4 acrobats (2 experts, 2 novices). EMG was recorded from vastus lateralis, gastrocnemius lateralis and biceps femoris during the four phases

of the jump: preparation for take-off, take-off, preparation for landing and landing. We found that three phases, preparation for take-off (PTO), take-off (TO), and landing (LA) were shorter for novice acrobats than elite acrobats. In the EMG analysis, novices showed overall similar values in comparison with the expert group. The results may help coaches and acrobats establish muscle activation and timing in order to enhance performance in Korean teeterboard.

**Key words:** Muscles; Circus acrobats; Electromyography; Expertise; Korean teeterboard.

### **6.2.2 Introduction**

The Korean teeterboard is a circus apparatus that resembles a seesaw (Figure 17). The two acrobats are catapulted into the air executing somersaults, back flips and jumps from each end. They jump vertically and continuously, landing back at the same place on the apparatus and jumping in turn. The board is a plank of ash wood and is supported in the middle by a fulcrum. Acrobats face many difficulties: to have the proper technique during take-off to gain enough height; to land back on a small surface and with the proper technique to give enough momentum to their colleague; to take-off and to land on an unstable surface and to jump again and again with very little time to rest between jumps. The Korean teeterboard appears to be a complex cyclic physical activity, for which the challenge is to tightly coordinate the inter-limb movement to the movement of the plank. The right timing is crucial (FEDEC, 2009).



**Figure 17.** – Picture of Korean teeterboard and two acrobats © Roland Lorente (photo courtesy of École nationale de cirque de Montréal)

During take-off, the acrobat starts the extension of their legs a fraction of a second before the other acrobat presses down on the plank. Before their colleague arrives on the plank, the acrobat does a countermovement, which can be described as flexing of the knees and hips. Then they start extending knees and hips just before the plank rotates and finish the extension during the rotation of the plank. Managing the landing is one of the most important factors. The acrobat starts with knees bent slightly before touchdown. They use a pushing technique: they extend the knees and hips as the plank goes down to the mat. The acrobat must correctly perform the bend-push movement in order to give enough momentum to their colleague.

A typical error that can occur is a delay in the technique during take-off (FEDEC, 2009). The acrobat can either be too soon or too late. Being too soon means that the acrobat does not rely enough on the momentum of the plank and they can lose height or verticality. Being too late means that the acrobat misses the optimal momentum for take-off with the rotation of the plank and they can also lose height. Another error that can happen is the acrobats that flexing their knee too early, and they remain in a flexed position waiting for the right moment for take-off. In all these situations, the push action/reaction mechanics is lost. From these observations, the right timing and precision in the movement are important elements to focus on for beginners.

Therefore, data about muscle activation and timing of beginners and experts is important information for acrobats and coaches.

Muscle activation patterns are known to influence athletic performance. The mechanics of landing (Walsh et al., 2012; Arabantzi et al., 2000; Sasaki & Urabe, 2012; Afifi & Hinrichs, 2012; Padulo et al., 2013) and take-off (Pereira et al., 2008; Akl, 2013) are well documented in the literature. During landing, it is well established that muscles are activated both prior to the contact with the ground (pre-activation) and after the initial contact. The quadriceps and hamstring muscles have the potential to provide dynamic knee stability. Walsh et al. (2012) investigated the relationship between muscle activation of gluteus maximus, quadriceps, hamstrings, gastrocnemius and the knee flexion angle during jump landings. They showed that greater quadriceps activation and less hamstrings and gastrocnemius activation were correlated with smaller knee flexion angles. Small knee-flexion angles were influenced by high quadriceps / hamstrings co-activation ratio during the preparatory phase. Arabantzi et al. (2000) studied muscle activity during drop jumping from different heights. Ten athletes performed maximum drop jumps from 20, 40, and 60cm while EMG activity of the rectus femoris, biceps femoris, and gastrocnemius muscles as well as ground reaction forces were recorded. The results of this study showed that the gastrocnemius muscle is activated initially, followed by the biceps femoris then by the rectus femoris. When drop height increased from 40 to 60cm, the gastrocnemius was activated earlier, stabilizing the ankle joint in anticipation of greater impact forces. However, it is not known with jump height greater than 60 cm.

Studies in sport showed that novice athletes were slower, were not optimal in the muscle activation or timing and had different muscle coordination than elite athletes in badminton (Matsunaga & Kaneoka, 2018), swimming (Vaz et al., 2016), or taekwondo (Ervilha et al., 2020). A study of reaction forces at take-off and landing in Korean teeterboard showed a difference in peak forces and loading rate between expert acrobats (Cossin et al., 2021a). The fundamental skills for Korean teeterboard have not yet been investigated and are not clear. The precise timing and coordination of muscle action (Sasaki & Urabe, 2012; Pereira et al., 2008) are key factors for optimizing the height of the jump. Pereira et al. (2008) found that biceps femoris muscle was activated early in the worst performance when compared to the better

performance in vertical jumps. Sasaki & Urabe (2012) showed that the onset muscle activities during the single leg landing were significantly earlier than those during the double leg landing. Further research should be performed to focus on muscle onset times, activation, and knee flexion angle.

Thus, the purpose of this study was to investigate the differences in muscle activation and timing during cycles of jumping in Korean teeterboard between beginner and expert acrobats. We compared the activation muscle time and amplitude for some lower extremity muscles (vastus lateralis, gastrocnemius lateralis and biceps femoris) between novice and expert acrobats. We hypothesized that (1) the individual EMG patterns would be similar, but that a time shift would exist between expert and novices, that (2) preparation time for take-off and landing would be longer for novices compared to expert acrobats, and that (3) amplitude of activation of the low extremity muscles would be less optimal in the novice group compared to the expert group during take-off and landing.

### **6.2.3 Methods**

Participants: Participants in this study included two male professional acrobats that were expert in Korean teeterboard (expert 1: 77 kg, 1.67 m, 27 years old, 12 years of experience ; and expert 2: 65kg, 1.72 m, 22 years old, 5 years of experience) and two male novice acrobats (novice 1: 83 kg, 1.80m, 29 years old, 3 years of experience but had a break of 7 years prior to the test; and novice 2: 79 kg, 1.83m, 20 years old, 1.5 years of experience, student of a circus school; Korean teeterboard was not their specialty as circus acrobat but was a complementary discipline). Before the test, the study protocol was explained to the subjects. They were asked to fill out a personal information questionnaire and a consent form. The study was conducted in accordance with the Helsinki Declaration and was approved by the Université de Montréal Ethics Committee.

Instrumentation: Myoelectrical activity (EMG) was recorded from four muscles of the right and left lower limbs: tibialis anterior (TA), vastus lateralis (VL), gastrocnemius lateralis (GL) and biceps femoris (HAMS). At the points of the body where an electrode was to be laid, the hair was shaved, then the skin was cleaned with alcohol and cotton for setting electrodes. The EMG was collected using a 16-channel wireless system (Trigno Myomonitor, Delsys Inc., Natick, Massachusetts) at a

sampling frequency of 1925 Hz. Electrode placement was determined to use guidelines provided by Criswell (2010). Each EMG sensor also had a built-in triaxial accelerometer.

Kinematic data were collected using a 3D motion capture system (Naturalpoint: 10 OptiTrack FLEX13 cameras) sampling at 30 Hz. Markers were placed on the side at both ends of the teeterboard and on each anterior superior iliac, knee, ankle, and sternum of the subjects. All trials were also video recorded.

Test Protocol: Jumping was performed on one Korean teeterboard from Cirque du Soleil. The technical specifications for the board were: ash wood material, 3.05 m in length, width of 42 cm, the thickness varies from 2 cm at the ends to 4 cm at the middle and height of the pivot point is located at the height of 51 cm). The same 20 cm-high mattress (Spieth America, Lansing, USA) was used and placed exactly the same way for all acrobats. Subjects performed stretching, strength training and jumping on the teeterboard as a warmup for 20 minutes. Markers for the motion capture and the EMG measurement equipment were then installed on the acrobats. The subjects walked and jumped to get familiar with the equipment before recording. The acrobats were then asked to perform normal jumps under the supervision of a circus coach specialized in Korean teeterboard. The subjects could take as much time as needed to rest between jumps. The two beginner acrobats jumped together as a duo, as well as the two expert acrobats.

Dividing the movement into phases: The jump performed by the acrobat was divided into six phases: ground phase, preparation for take-off (PTO), take-off (TO), aerial phase (AE), preparation for landing (PL) and landing (LA) (Table 8). Ground phase was not studied.

Tableau 8. – Description of the jump phases.

<b>Phase</b>	<b>Defined as:</b>	<b>Calculated by:</b>
Preparation for take-off (PTO)	The acrobat on the ground is getting ready for take-off by bending his legs.	PTO starts when the acrobat bends his legs. To do so, the local minimum of the knee angle was found as the time derivative of the knee angle equal to zero.

Take-of (TO)	Period of movement of the teeterboard (from the mat to the air). This phase is characterized by the fact that the acrobat extends lower limbs and raise arms to get a high vertical take-off velocity. At the end of this phase, the acrobat no longer touches the board.	The vertical position of the marker placed at the end of the teeterboard was used to calculate the TO phase. The minimum and maximum position defined the beginning and the end of the movement of the board, respectively.
Aerial phase (AE)	It is defined as the period of flight of the acrobat.	Time between TO and PL.
Preparation for landing (PL)	The acrobat in the air is getting ready for landing by bending his legs.	The beginning of PL was defined as the local minimum of the knee angle and was found as the time derivative of the knee angle equal to zero.
Landing (LA)	Period of rotation of the teeterboard (from the air to the mat). This phase is characterized by the fact that the acrobat extends lower limbs to push on the plank to get their colleague enough momentum. At the end of this phase, the acrobat is on the ground.	The vertical position of the marker placed at the end of the teeterboard was used to calculate the LA phase. The maximum and minimum position defined the beginning and the end of the movement of the board, respectively.

Data Analysis: The first and last jumps in each series were removed from the present study, as well as the missed ones when the acrobat fell backward or lost balance during landing. Between 8 and 10 jumps for each participant were included in the study.

MATLAB was used to analyze and synchronize kinematic and EMG data. Kinematic data were smoothed fourth-order Butterworth filter with a cut-off frequency of 10 Hz. A procedure was applied to synchronize the EMG signal to the kinematic data, in order to divide the EMG signal into phases of the movement. Acceleration signals from the double integration of the kinematic data of the left knee was synchronized with the acceleration data from the accelerometer from the EMG sensor located at the left tibialis anterior (TA). Cross-correlation was used to provide the timing of best similarities between signals. We applied a procedure similar to Cossin et al. (2018) to shift one signal with respect to the other until it maximized the correlation value. By synchronizing the kinematic data to the EMG data, we were able to calculate the muscle activity phase by phase for each participant.

The coordinates of the hip joint centres were estimated from the coordinates of the markers on the right and left anterior-superior iliac spines using the method described by Bell et al. (1990). Knee joint angles were computed for each trial from the thigh and the shank vectors. Jump height was calculated from the marker on the sternum as the maximum position minus the position on the mat.

The raw EMG signal was processed with a fourth-order Butterworth filter with a band-pass frequency of 10Hz to 400Hz, full waved-rectified, low-pass filtered (fourth-order Butterworth filter with a cut-off frequency of 6Hz) and normalized by the maximal intensity obtained during the trials. For each muscle and each phase, the EMG signal was then averaged by phase; therefore, a value between 0 and 100% was calculated for each muscle and each phase to represent the muscle activity (0: no muscle activity, to 100%: high intensity). The maximum value between the left and right leg was retained for further analysis. Since EMG from TA is not actively contributing to vertical jump, this data was only used to synchronize the kinematics and will not be presented.

## 6.2.4 Results

Duration of phases and kinematics: Three phases — preparation for take-off (PTO), take-off (TO), and landing (LA) — lasted longer with novice acrobats than with expert acrobats (Table 9). Expert acrobats jumped higher and aerial phase lasted longer. Expert 2 flexed more his knees than his partner Expert 1 during landing and during take-off, which may indicate a different strategy. Novice 1 and novice 2 flexed also more their knees than expert 1, however, they both jumped less high than expert 1.

Tableau 9. – Comparisons of duration of phases and knee kinematic between experts and novices.

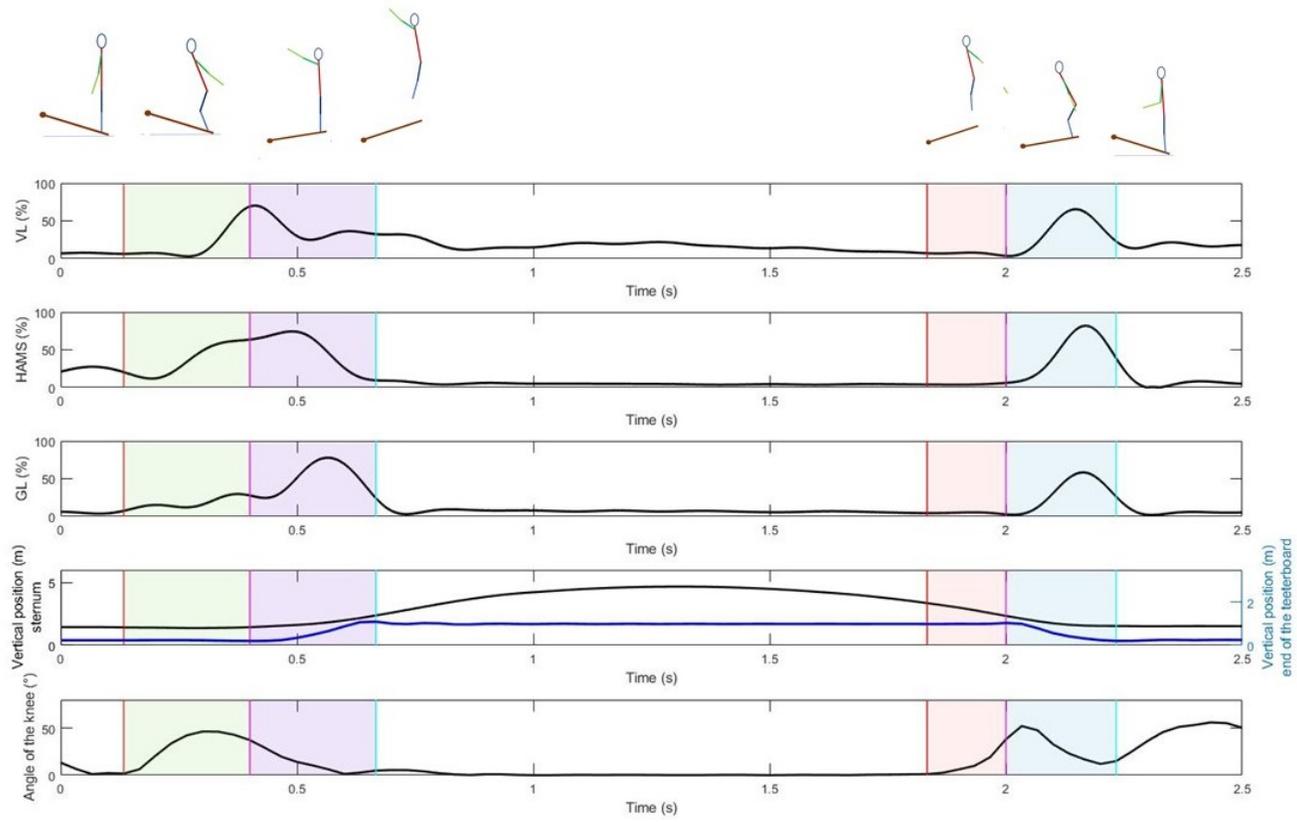
Variables	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD
	Expert 1	Expert 2	Novice 1	Novice 2
Duration PTO (s)	0.34 $\pm$ 0.05	0.31 $\pm$ 0.10	0.47 $\pm$ 0.18	0.43 $\pm$ 0.16
Duration TO (s)	0.26 $\pm$ 0.04	0.24 $\pm$ 0.02	0.28 $\pm$ 0.04	0.27 $\pm$ 0.03
Duration AE (s)	1.08 $\pm$ 0.10	1.14 $\pm$ 0.10	0.93 $\pm$ 0.11	1.04 $\pm$ 0.10
Duration PL (s)	0.12 $\pm$ 0.04	0.20 $\pm$ 0.04	0.17 $\pm$ 0.04	0.14 $\pm$ 0.05
Duration LA (s)	0.27 $\pm$ 0.02	0.27 $\pm$ 0.02	0.29 $\pm$ 0.02	0.28 $\pm$ 0.02
Jump height (m)	2.81 $\pm$ 0.29	3.19 $\pm$ 0.35	2.46 $\pm$ 0.25	2.61 $\pm$ 0.15
Maximum knee flexion angle at take-off (°)	42.6 $\pm$ 9.6	54.7 $\pm$ 13.1	58.8 $\pm$ 5.5	41.2 $\pm$ 6.9
Maximum knee flexion angle at landing (°)	36.8 $\pm$ 9.5	55.9 $\pm$ 11.6	47.7 $\pm$ 5.5	59.9 $\pm$ 31.0
Knee angle at the beginning of PTO (°)	3.8 $\pm$ 3.8	17.6 $\pm$ 12.8	25.2 $\pm$ 14.8	11.1 $\pm$ 14.9
Knee angle at touchdown at landing (°)	24.7 $\pm$ 7.0	46.0 $\pm$ 7.4	30.2 $\pm$ 3.3	23.9 $\pm$ 9.8

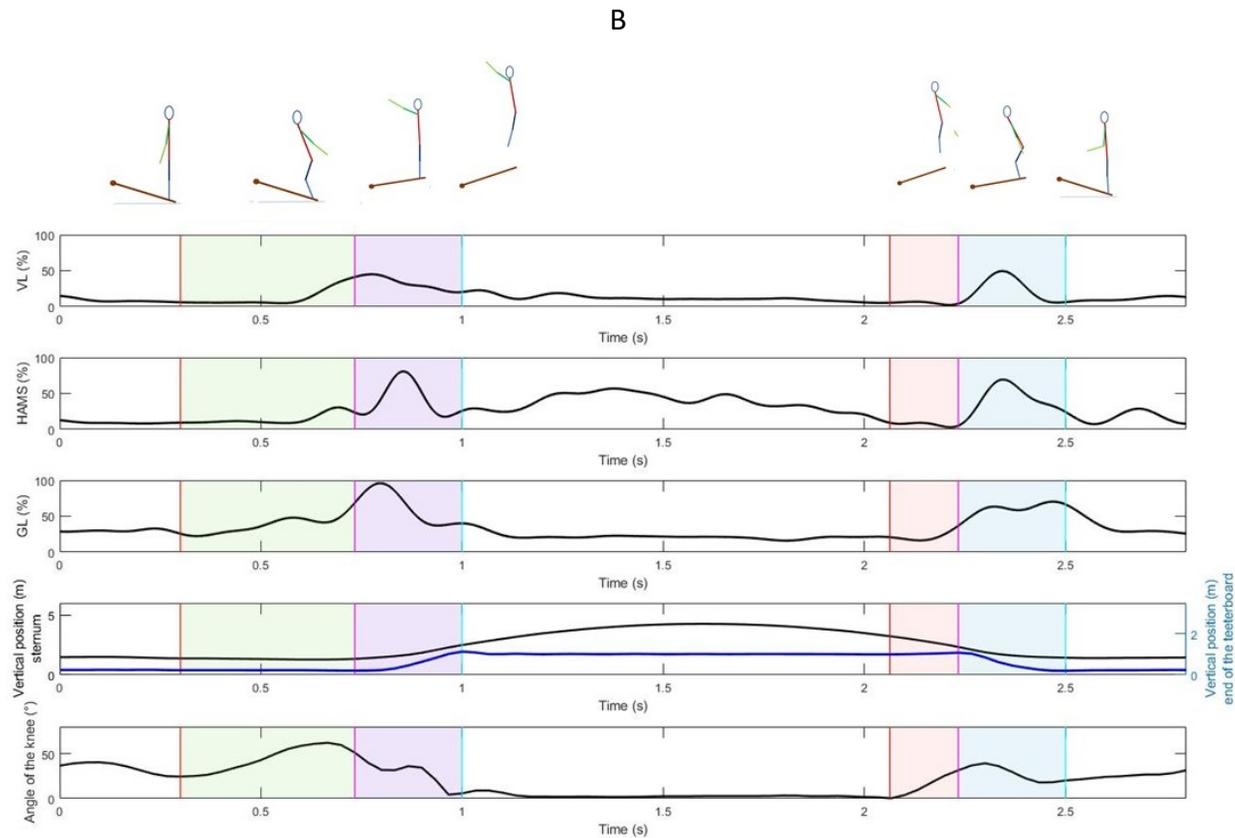
Muscle activity: Muscle activity for the expert group seemed active only during the four phases (PTO, TO, PL and LA) compared to the beginner group (Figure 18). Muscle activity appeared to be

active for all phase, including aerial and ground phase for the beginner group (Figure 18). Muscle activity pattern presented in Figure 18 is similar to the other acrobat of the group. The knees remained bent during the ground phase for almost all trials for the beginner group. No statistical analysis was made between the expert and the beginner group because of the different strategies used by the two experts and because some acrobats started PTO with knees flexed, thus muscles are already active (Figure 18).

The EMG activity during the four phases showed no clear differences between experts and novices (Figure 19). Expert acrobats exhibited slightly higher GL muscle activity during TO and HAMS during LA compared to novice acrobats. By contrast, the EMG activity was a little higher for VL during PTO and TO and for HAMS and GL during PL for novice acrobats.

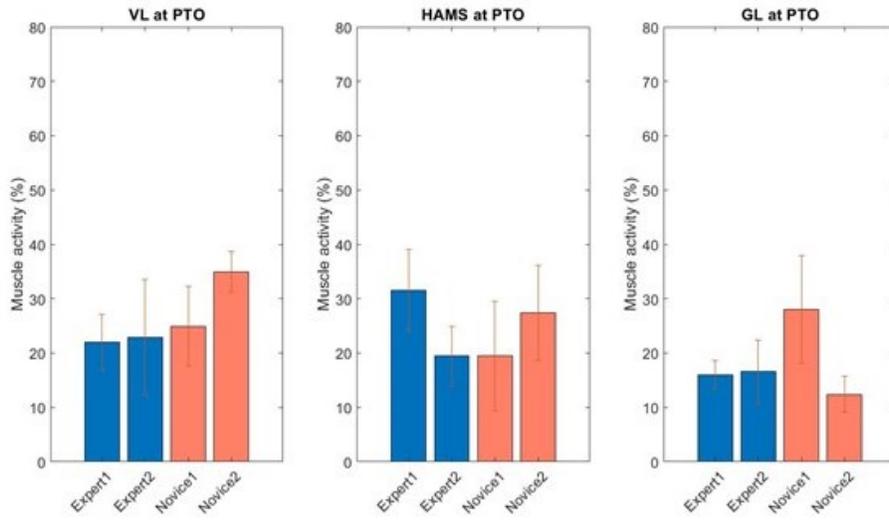
A



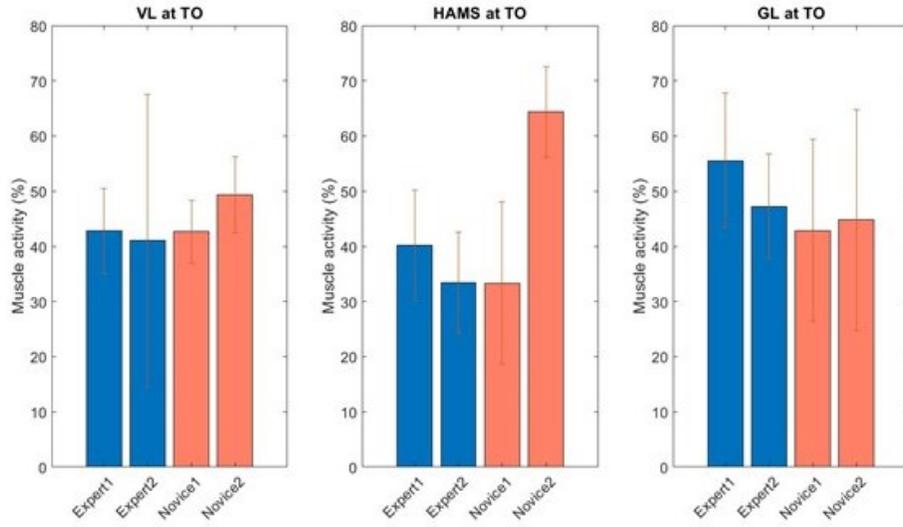


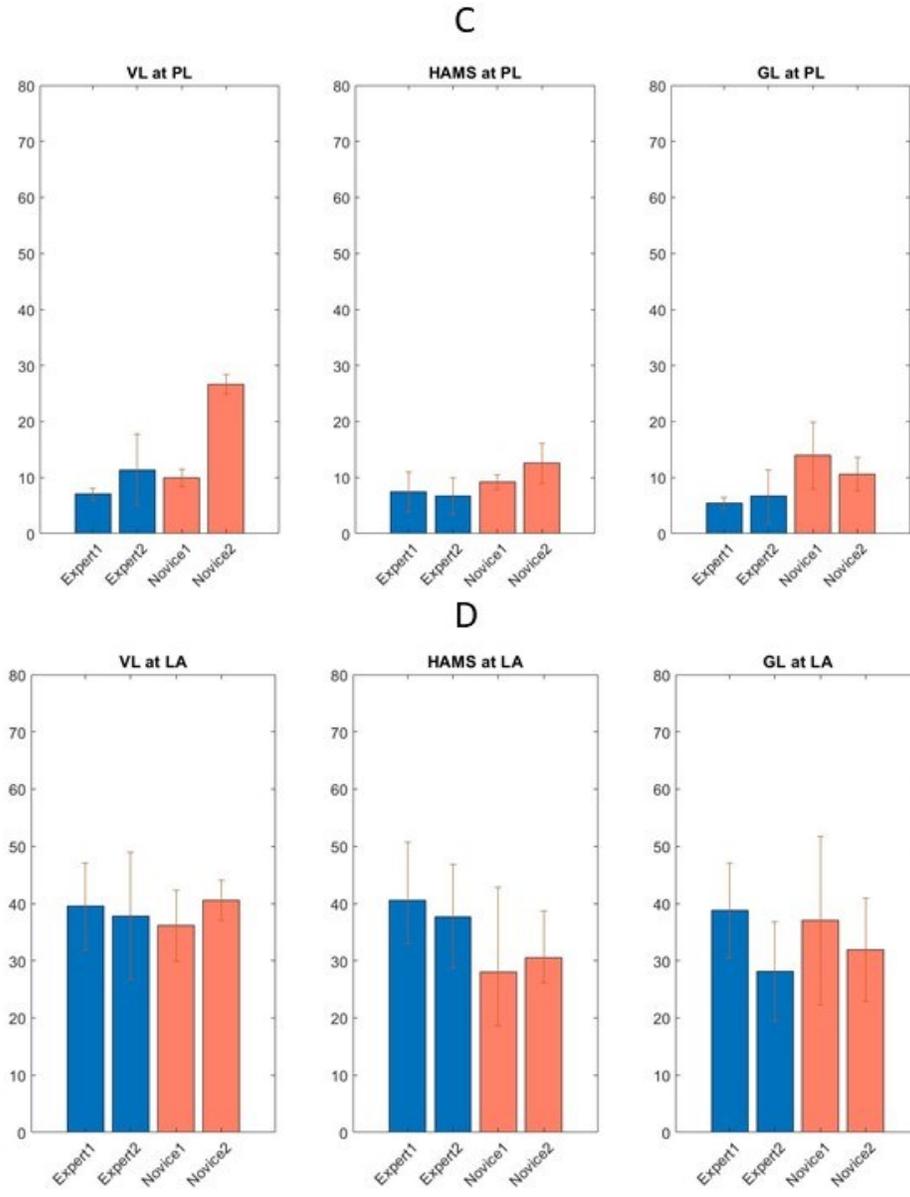
**Figure 18.** – Examples of time history of normalized EMG (%) of vastus lateralis (VL), gastrocnemius lateralis (GL) and biceps femoris (HAMS); vertical position (m) of the marker of the sternum and the marker at the end of the teeterboard; and knee angle (°) during a jump cycle for A. an expert acrobat; and B. a novice acrobat. Vertical lines represent the limits of the phases. Phases are shaded as: green = preparation for take-off; purple = take-off; pink = preparation for landing; and blue = landing.

A



B





**Figure 19.** – Mean and standard deviation of normalized EMG (%) of vastus lateralis (VL), gastrocnemius lateralis (GL) and biceps femoris (HAMS) for A. preparation for take-off (PTO); B. take-off (TO); C. preparation for landing (PL); and D. landing (LA), for the two expert and the two novice acrobats.

### 6.2.5 Discussion

This study investigates the muscle activity and duration of the lower limb during normal jumps in Korean teeterboard by comparing expert and novice acrobats. The first and second hypotheses were supported by our results. We showed that EMG patterns are similar between expert and novice groups, whereas phase duration had differences between both groups. Surprisingly, no clear difference of muscle amplitude during take-off and landing is found between both groups, which is contrary to our third hypothesis. While there is some literature on the ground reaction forces (Cossin et al., 2021), none have attempted to describe muscle activation. Knowledge of the characteristics of muscle activation and phase duration during normal jumps at high heights, as it is in Korean teeterboard, may enhance our understanding of how acrobats perform these skills and may assist coaches in prescribing appropriate training.

Duration of Phases: Average cycle times from PTO to LA were 2.13 s for novice 1, 2.16 s for novice 2, 2.08 s for expert 1 and 2.166 for expert 2, leaving no time for a missed movement or a delay. The flight time, and thus the jump height, were lower for the novice acrobats. Average flight times (AE+PL) were 1.10 s for novice 1, 1.18 for novice 2, 1.20 s for expert 1 and 1.34 for expert 2, which is in agreement with the recorded jump height. Jump height in our study from the last contact of the teeterboard was 2.11 m for expert 1, 2.49 m for expert 2, 1.76 for novice 1 and 1.91 for novice 2, when subtracting 70 cm for the height of the end of the teeterboard. Comparatively, average flight time of 1.67 s for straight jumps in trampoline was reported (Ferber et al., 2019) and jump height in trampoline ranged from 2.5 and 3.0 m (Briggs, 2014).

The preparation of take-off (PTO) lasted longer with novice acrobats, which could explain one of the errors listed by coaches in the FEDEC guide (FEDEC, 2009). The acrobat bends his lower limbs too early and wait for the plank to rotate, hence he could lose the right timing for the take-off.

TO and LA depend on the movement of the teeterboard, and therefore relies mainly on mechanical factors. Hence, it could be presumed that TO and LA would be of the same duration between experts and novices. However, we obtained that TO and LA lasted less time for the experts compared to the novices. This indicates that there is an active contribution of the acrobats during these phases. Contact time during take-off is considered an important factor in jumping.

Vertical impulse is a strong predictor of jump height (Kirby et al., 2011). Impulse is a measure of the momentum transferred from the board to the acrobat, and vice versa. Longer contact time or applying a higher force leads to higher jump height. In our study, surprisingly, average contact time during take-off (TO) was shorter for experts compared to novices. Knowing that the duration is related to the movement of the teeterboard, this may be explained by the fact that experts jumped higher, landed with a higher vertical velocity, and thus made the board rotate faster. This may also be linked to the recoil effect of the board. Acrobats tend to maximize the recoil effect to maximize the vertical velocity of the board (Cossin et al., 2021c). Future study needs to examine joint power in coordination with the rotation and the recoil effect of the teeterboard during take-off. This would aid in designing training programs suited for the needs of this circus discipline. As for landing (LA), experts used a pushing technique, i.e., extending their legs while the board is going down. Their technique seemed to take less time than the novice group.

The coach reported that beginners tend to remain flexed too much and for too long. This is exactly what we observed. Novices in our study tended to stay in a flexed position when on the mat as illustrated by the angle knee angle at the beginning of PTO. The knee angle presented at four specific events in Table 9 was higher for both beginners compared to the expert 1 (12 years of experience). Expert 2 also had high knee angle; however, knees were flexed only when necessary during the flexion-extension at take-off and landing. The difference of amplitude of knee flexion between expert 1 and expert 2 may be explained by the flexibility of the ankles. Expert 1 and the coach said that it was hard to have high flexed knees because of the angle of the board. However, even with limited knee flexion, he succeeded in reaching a higher jump height than both beginners, demonstrating a technique well adapted to their physical capacities.

Muscle Activity: Similar range of values in muscle intensity for each phase was measured between the two groups. The phases that required the greatest muscle activity were take-off (TO) and landing (LA), whereas the less muscular activity was preparation for landing (PL). The three muscles selected for the study played an important role in vertical jump performance.

Jumping is a complex human movement that requires mainly propulsive action of the lower limbs. The technique used by acrobats during PTO and TO is similar to a countermovement jump. In the

countermovement jump, the athlete starts from a standing position, initiates a downward movement, and then continues with an upward movement leading to take-off, as opposed to a squat jump. The only difference is that acrobats in Korean teeterboard need to synchronize their upward movement to the movement of the teeterboard. The movement with countermovement is almost always considered better in jump performance than a movement without countermovement (Harman et al., 1990; Van Hooren & Zolotarjova, 2017). The reason is the storage and utilization of elastic energy during the countermovement (Van Hooren & Zolotarjova, 2017). Expert acrobats in our study performed a continuous movement enabling them to better use elastic energy compared to the beginners. During PTO and TO, there were no clear differences in muscle amplitudes between beginners and experts, although expert acrobats jumped higher. These results were unexpected given the prior findings of Zaggelidis and Lazaridis (2013). They found a higher VL activity and a lower co-activation (HAMS/VL ratio) from elite judokas compared to novice judokas during the braking and the propulsive phase (PTO and TO in our study) in countermovement jumps.

Landing usually consists of the body slowing the downward action and absorbing the shock. Previous findings reported pre-activation of muscles prior to ground contact for the knee extensors and hamstring (Cowling et al., 2003; Ambegaonkar et al., 2011; Arampatzis et al., 2001). Results in our study showed really low intensity for all muscles during the preparation for landing (PL). However, acrobats use a pushing technique which is different from soft landing available in the literature. Bending the lower limbs requires low muscular effort because inertia from the fall may suffice to have the legs bent. This could provide an explanation for the low muscle activity during the preparation for landing. After ground contact, muscle activity occurs to prevent the lower body from collapsing under the body weight and to 'push' on the teeterboard. Previous research on jump landing reported a high activity for tibialis anterior, quadriceps and hamstrings (Iida et al., 2011; Zhang et al., 2000). It may prevent the arch of foot from collapsing and it helps stabilize the knee. The three muscles included in our study showed high intensity during landing. It can be postulated that the pushing technique requires an active force production provided by leg muscles. We did not observe a clear difference in muscle activation during PL and LA between the novice and expert group. These findings are in agreement Niespodziński et al. (2021). In their

study, the activity of gluteus maximus, rectus femoris and gastrocnemius were similar between gymnasts and a group control, both groups aged 18-25, during the first 100 ms of landing and the 100–200 ms after contact. They reported a difference of multifidus activity between both groups; however, we did not include measurement of multifidus in our study.

The EMG activity demonstrated no clear differences between experts and novices. These findings are in agreement with Pereira et al. (2008). They reported no significant differences of the EMG activity of 400 ms before the takeoff phase between best and worse jumps. They concluded that EMG onset time of biceps femoris influenced the vertical jump performance and not the muscle activity. In our study, we defined the beginning of PTO from the knee angle, but we did not analyze onset time from the EMG data. Unsteady surface of the teeterboard may cause perturbations in the performance. There is very little time for correction of these perturbations, then muscle and joint activation may be too slow or not synchronized with the movement of the teeterboard. It is suggested that future research include EMG onset time and/or coordination with the teeterboard.

Inconsistency within the expert participants and the novice participants made it harder to highlight clear patterns. The study limitations included: a) low number of participants and jumps; b) jump height not taken into account; c) absence of measure from other muscles. While the results of this study have described the difference of muscle activation of the lower limb between beginners and elites, measuring the activity of other muscles that contribute to jumping is needed. For example, arm swing and trunk muscles play an important role in jumping (Harman et al, 1990; Iida et al., 2011). Future work may need to analyze the coordination arm/legs or trunk/legs. Additionally, the teeterboard on which participants jumped was new, not their regular one for the expert group and completely new to the novice group. Adaptation to a new piece of equipment and therefore their shift in muscle activity were not considered.

### **6.2.6 Conclusion**

To our knowledge, this is the first study which recorded and analyzed different phases and muscle activity during vertical jumps in advanced level and beginner acrobats performing in Korean teeterboard. Differences in the duration were observed between expert and novice acrobats.

High impact forces were measured in this discipline and can cause serious injury. Muscle activity and enhanced muscle strength can protect joints from excessive motion and overload, and to help with the stability of joints. Therefore, if acrobats are able to optimize muscle activation and intensity for each jumping phase, it could help to ensure the success of the performance and prevent injuries on a high-jumping height. Our results suggest that coaches and acrobats should focus their training sessions on optimizing temporal aspects of the muscles activation.

### **Acknowledgment**

This work was supported by a research grant from Fonds de recherche Société et Culture (FRQSC) from the Quebec government. The authors would like to acknowledge the company Cirque du Soleil and the Center for Research, Innovation and Transfer in Circus Arts (CRITAC) for their support in this study.

### **Disclosure statement**

The authors declare that they have no conflicts of interest.



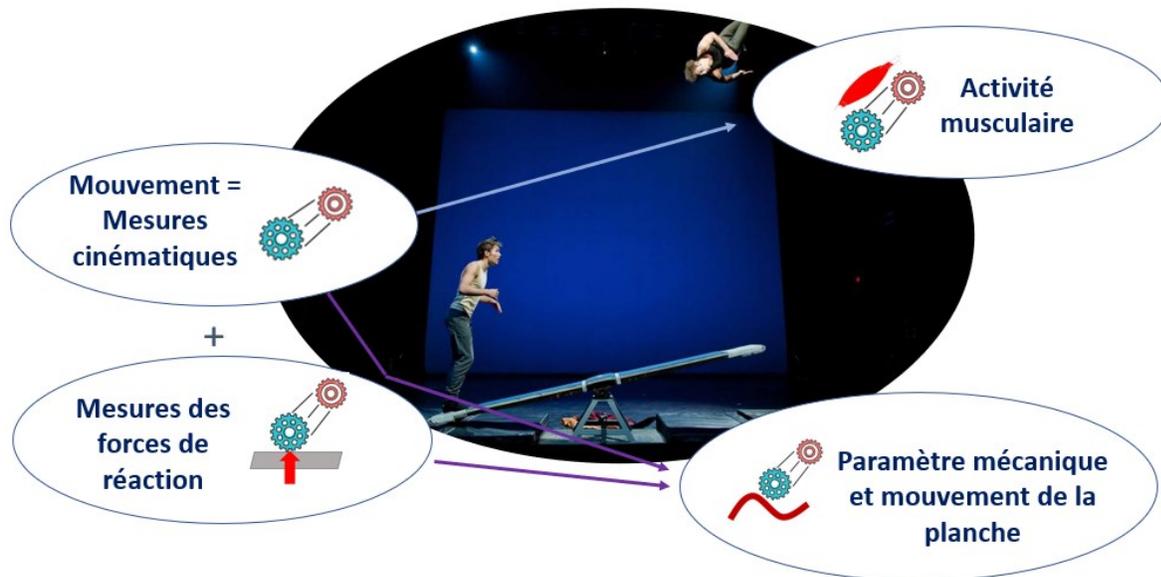
# **Chapitre 7 – L’influence du renvoi de flexion de la planche dans la performance circassienne de planche coréenne**

## **7.1 Avant-propos**

Des exemples dans le sport ont démontré que les performances humaines pourraient être améliorées par une meilleure conception des équipements. Les ingénieurs ont développé tout un pan de recherche en équipements sportifs, ce qui a abouti à une amélioration du mouvement humain (chapitre 5). Les modifications des équipements sportifs au cours des dernières décennies étaient étroitement liées au développement de nouveaux matériaux. L’approche purement mécanique permet de comprendre le comportement mécanique de l’équipement face à une interaction avec le mouvement humain (chapitre 5) afin d’améliorer la conception d’équipement. L’étape suivante consiste à combiner l’analyse de mouvement (chapitre 5) avec une approche mécanique. Il ne s’agit pas de seulement modifier l’équipement, mais de comprendre l’influence de l’équipement sur la performance (et vice-versa) dans le système acrobates-planche. Il a de plus été démontré que le changement d’équipement induit un changement au niveau du contrôle moteur (chapitre 5) et que c’est lié à la fois aux caractéristiques mécaniques de l’équipement qu’au style de contrôle moteur de l’individu.

L’étape 4 de la thèse consiste par conséquent à caractériser le mouvement et la mécanique de la planche (Figure 20). L’objectif de la troisième étude est de déterminer les facteurs mécaniques qui influencent la hauteur de saut. Cet objectif se décompose en étapes suivantes :

- (1) Caractériser mécaniquement plusieurs planches.
- (2) Mettre en évidence le mouvement et la déformation de la planche en performance.
- (3) Mesurer l’influence du renvoi de flexion de la planche dans la performance en planche coréenne.



**Figure 20.** – Étape 4 de la thèse : mouvement et mécanique de la planche.

Ce sixième chapitre présente un article intitulé : “The influence of the board bending and recoil effect on circus performance in Korean teeterboard”. Cet article est co-écrit par Annie Ross et François Prince. Cet article est présentement soumis à *European Journal of Mechanics / A Solids*.

Contrairement à ce qu’on pourrait croire, la planche n’est pas tout à fait rigide, elle se déforme en flexion et les acrobates utilisent cette capacité pour se catapulter dans les airs. Cet effet est appelé renvoi de flexion (ou ‘recoil effect’ en anglais) et a été très étudié sur les bâtons de hockey. En planche coréenne, cet effet n’est pas encore tout à fait connu, ni tout à fait exploité par les acrobates à travers le monde ou les étudiants. L’objectif de cette étude a été de quantifier l’influence du renvoi de flexion sur la hauteur de saut en planche coréenne. Une caractérisation mécanique est aussi fournie avec une mesure de la raideur et de l’amortissement de trois planches.

L’avantage d’une planche souple est qu’il serait possible de concevoir une planche avec le degré d’énergie élastique stockée et relâchée idéale pour la performance, tout en réduisant les forces d’impact subies par l’acrobate (chapitre 3) en modifiant le matériau ou les dimensions.

## 7.2 Article 4

The influence of the board bending and recoil effect on circus performance in Korean teeterboard

Marion Cossin<sup>a</sup>, Annie Ross<sup>b</sup> and François Prince<sup>c,d</sup>

<sup>a</sup>Département de Pharmacologie et Physiologie, Faculté de médecine, Université de Montréal, 2100 Edouard-Montpetit Bld, Montréal, Québec, Canada H3C 3J7; <sup>b</sup>Département de génie mécanique, Polytechnique Montréal, 2900 Edouard-Montpetit Bld, Montréal, Québec, Canada H3T 1J7; <sup>c</sup>Département de chirurgie, Faculté de médecine, Université de Montréal, 2100 Edouard-Montpetit Bld, Montréal, Québec, Canada H3C 3J7; <sup>d</sup>Institut national du sport du Québec, 4141 avenue Pierre-De Coubertin, Montréal, Québec

### 7.2.1 Abstract

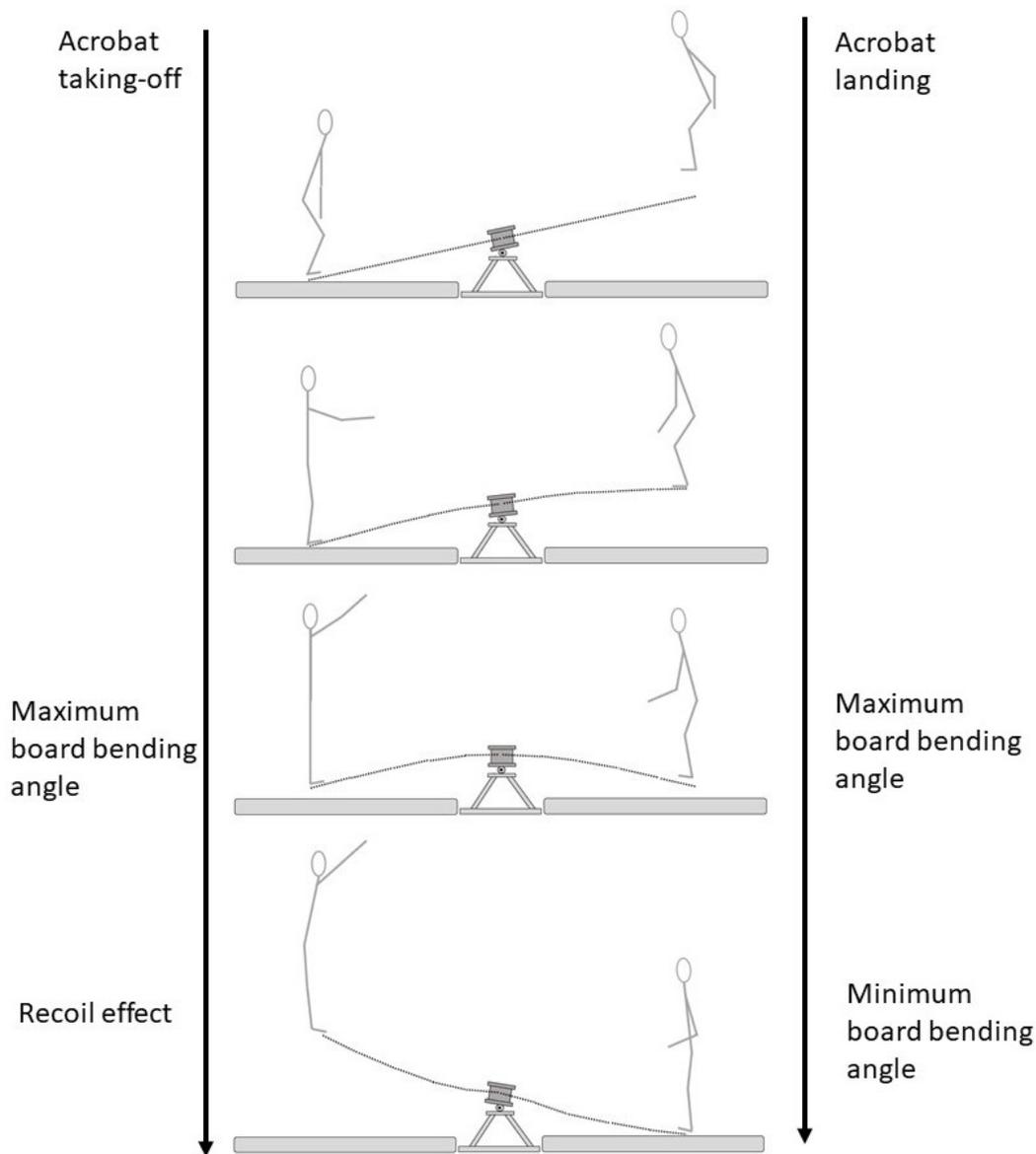
The purpose of this study was to examine the recoil effect in jumping on a Korean teeterboard, a circus equipment resembling a seesaw. To our knowledge, our study is the first to include detailed measurements of bending movement of the teeterboard per section. Two elite acrobats performed 120 jumps while a motion capture system collected kinematic data from both acrobats and the teeterboard. Board bending angles and timing were analyzed with a Boosted Regression Tree (BRT) model to identify the most important teeterboard variables associated to jump height. The BRT model showed that both the board recoil effect and the landing of the opposite acrobat influenced 46% and 37% of the jump height, respectively. The recoil timing was found to be synchronized with the last contact at take-off. Coaches should encourage acrobats to take advantage of the recoil effect to increase jump height in Korean teeterboard.

**Key Words:** circus; kinematics; recoil effect; jump height; Korean teeterboard.

### 7.2.2 Introduction

The Korean teeterboard is one of the most demanding circus acts. The apparatus resembles a playground seesaw, and the act is performed by two acrobats. This circus discipline requires

acrobats to alternately propel themselves into the air off the board, perform acrobatic jumps, and then land on the board to give their colleague the necessary momentum to jump. During take-off, acrobats use a catapult mechanism, or what they call the 'whip'. The landing of one acrobat induces the teeterboard into rotation. Due to its flexibility, the board depression at take-off acts to store elastic energy, which is released during the board recoil and rotation of the teeterboard (Figure 21). Through this recoil mechanism, the energy stored in the board is transferred to the other acrobat for take-off. We define the 'whip' as the restitution of elastic energy of the board and the recoil effect as the time of the maximum angle of the elastic recoil. The amount of energy stored and released from the board is determined by the height and movement of the acrobat landing, by the mass and movement of the acrobat taking off, and by mechanical properties of the board. Temporal events are delayed between landing and take-off: the rotation of the board at take-off starts after the touchdown of the partner landing, due to the elasticity of the teeterboard and the contact with the mattress at landing comes before the last contact with the teeterboard of the acrobat taking-off.



**Figure 21.** – Teeterboard events: bending angle and recoil effect during take-off and landing.

Jump height is a decisive factor in the performance of an acrobat. Higher jumps give more airtime to complete complex aerial tricks. Studies conducted on height in diving revealed a strong relationship between various kinematic data and dive height (Sanders & Wilson, 1988; Miller & Munro, 1984) or the position of the fulcrum (stiffness) and dive height (Jones & Miller, 1996). Models with increasing complexity have been used to provide insights about springboard diving take-off techniques and maximum jump height initiated from a compliant surface (Cheng &

Hubbard, 2004; King et al., 2009). King et al. (2009) modelled the springboard as a uniform rod allowing vertical, horizontal and rotational movements with the vertical movement represented by a linear mass-spring system with no damping and the stiffness increased with the distance of the foot from the springboard tip. As it has been demonstrated, there is a clear relationship between springboard energy restitution and dive height (Miller et al., 2002; Miller, 2000; Sanders & Wilson, 1988).

Unlike most sports, most manufacturers don't measure or know the mechanical properties of circus equipment they build. There are no standards regarding the design of the equipment, therefore, there is a large variation in dimensions and stiffness of teeterboards. The European Federation of Professional Circus Schools (FEDEC) recommends a low stiffness board for beginners because it minimizes timing errors (FEDEC, 2009). Some professionals prefer higher stiffness to have more propulsion, whereas others prefer lower stiffness to avoid high loads (Cossin et al., 2021a), combined with an increased board angle to have more propulsion. Teeterboards are tapered and usually made in ash wood. When a new custom-made teeterboard is manufactured, professionals remove layers of the board surface to reach their preferred board thickness or stiffness.

Hockey stick behaves about the same as teeterboard. Bending the stick shaft allows to store elastic energy; this energy is transmitted to the puck during the release to increase its velocity during slap shot. The restitution of energy, called the recoil effect, is widely used, and documented (Villaseñor et al., 2006; Pearsall et al., 1999; Wu et al., 2003; Worobets et al., 2006; Villaseñor-Herrera, 2004). Hockey players also use personalized equipment according to their preferences, strength, body mass and technique (Pearsall & Robbins, 2019). The combination of stick bending, and muscular strength enable the projection of the puck with high velocity. The recoil effect may contribute as much as 30% to the puck velocity (Villaseñor et al., 2006). Properties of the stick, such as the stiffness of the shaft can be adjusted to best suit the technique or the preference of the hockey player (Pearsall & Robbins, 2019). Elite players are better in taking advantage of the loading phase during the slap shot, causing increased shaft bend, a longer period of stick-ground contact and an optimized timing of the stick's bend and recoil effect (Pearsall et al., 1999; Wu et al., 2003; Worobets et al., 2006; Villaseñor-Herrera, 2004; Woo et al., 2004).

Researchers found that shot velocity depended more on the skills of the player than on the stick construction during slap shots (Pearsall et al., 1999; Wu et al., 2003; Worobets et al., 2006).

In Korean teeterboard, many factors could influence the jump height, including 1) the mass of acrobats, 2) the quality of the pushing technique of the acrobat landing, 3) the speed of the acrobat at touchdown during landing, 4) mechanical properties of the teeterboard, 5) the ability to exploit the recoil effect of the board, 6) the technique of the acrobat during take-off. While the acrobat biomechanics have been studied (Cossin et al., 2021b), the effect of the different mechanical factors (e.g., recoil effect, board bend, board velocity, and board contact time) on the jump height in Korean teeterboard is still unknown. The purpose of this study was to examine the recoil effect of the teeterboard during jumps. More specifically, this study investigated the relationship between jump height and board deformation. We hypothesized that the recoil effect has considerable influence on jump height and, more specifically, that the recoil effect should be synchronized with the last contact to the board of the acrobat taking off.

### **7.2.3 Materials and Methods**

Two professional acrobats (acrobat 1: 26 years old; height: 1.83 m; body mass: 74 kg, 10 years of experience, and acrobat 2: 30 years old; height: 1.90 m; body mass: 73 kg, 16 years of experience) were recruited and provided written informed consent to participate in this study, which was approved by the institutional ethics committee of Université de Montréal. They were regular partners and used their own teeterboard from Cirque Éloize (material: ash wood wrapped in fiberglass at the end and center, dimensions are provided in the Results section), their regular mattress (height: 15.2 cm) and their own shoes.

The mechanical test conditions for the teeterboard were similar to those used for diving springboards (Sprigings et al., 1990). Static and dynamic tests were performed twice on the teeterboard from Cirque Eloize and two other teeterboards used for comparison, one from Cirque du Soleil and one from École national de cirque of Montréal. Both static tests and both dynamic tests provided the same results. In order to determine the board's static deflection, weightlifting disks were stacked progressively at the foot contact location of the teeterboard to produce incremental loads up to a maximum of 173 kg and 216 kg depending on the teeterboard, while

the other end of the board was fixed. Then, a reading meter stick secured to a vertical pole was used to measure the static deflection. The stiffness,  $k$ , was calculated using Hooke's law. For the dynamic test, a load of 45 kg consisting of weightlifting disks hung by a strap was applied to one end of the teeterboard while the other end was fixed. The disks were removed quickly by cutting the strap, so that the board tip oscillated. A triaxial piezoelectric accelerometer sampling at 2000 Hz (bandwidth: 2 to 5000 Hz) was attached at the foot location to record the resulting vertical acceleration. The damping  $\xi$  was calculated by linear regression of the maxima found in the vertical acceleration given by the Equation:  $\xi(\%) = \frac{-P \times T}{2\pi} \times 100$ , where  $P$  = slope of the logarithm of the maxima by using the method of least squares and  $T$  = period of vibration (Clough & Penzien, 1995; Mikael, 2011). Fast Fourier transform was used to find the natural frequency.

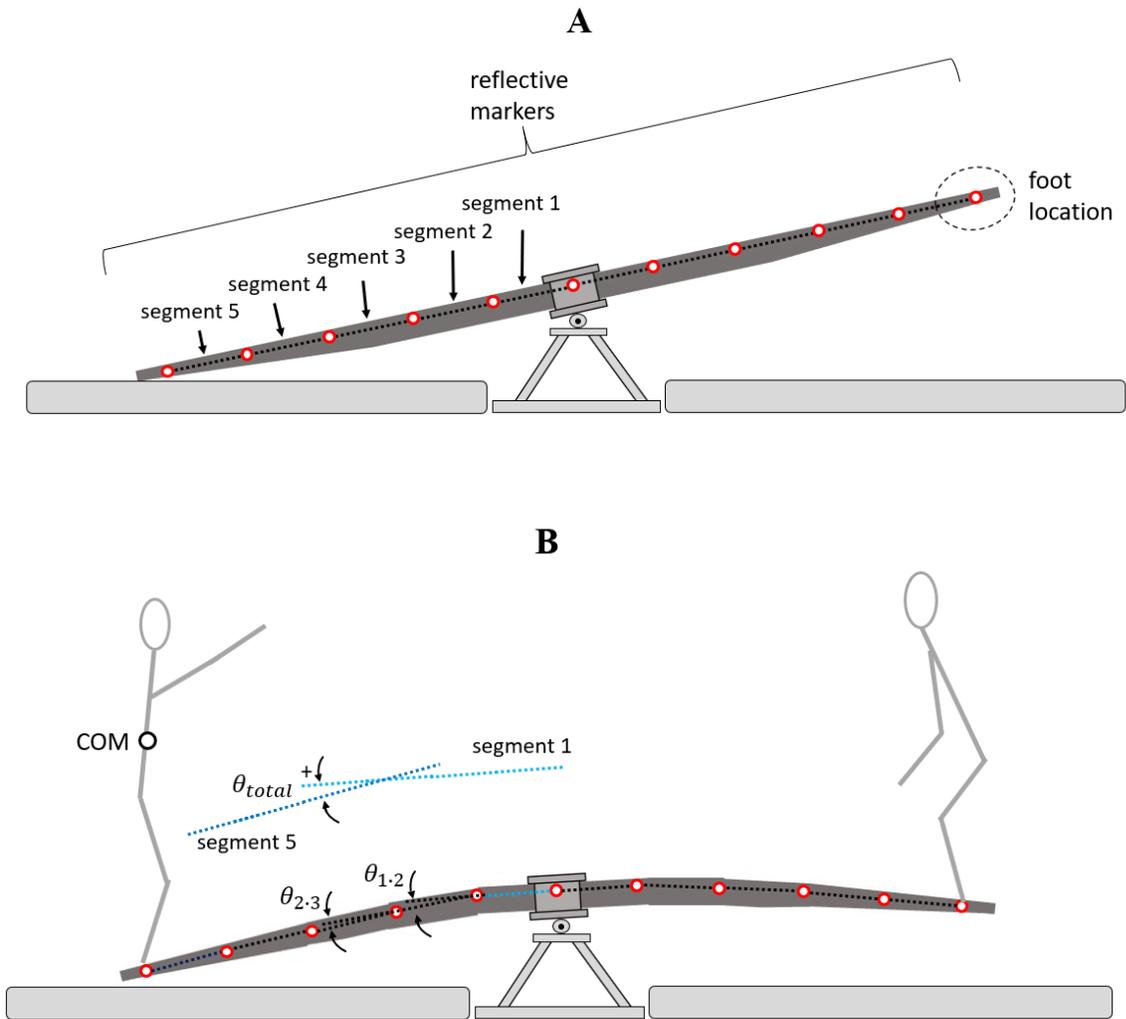
A 68-camera Vicon motion capture system (Vicon Motion Systems Ltd., Oxford, United Kingdom) sampling at 120 Hz was used to record jumps and the teeterboard movement. The acrobats were fitted with 39-reflective markers of 14 mm diameter from the Plug-in-Gait marker set. Kinematic factors of all joints during jumps were calculated using Vicon's Plug-In Gait model. Before jumping, each participant carried out a standing calibration to create an anatomical reference for each segment. Participants were given as much time as they required to warm up, practice, and rest time between series of jumps.

Three-dimensional kinematic data were low-pass filtered using a fourth-order Butterworth filter zero-lag dual-pass with a cut-off frequency of 10 Hz and analysis was then performed using Matlab (Mathworks, Natick, MA, USA). Jumps at the beginning and end of the series that were not high enough (< 3.5 m) were excluded. A total of 120 jumps were therefore analyzed. The body centre of mass was computed using custom Matlab scripts with the Plug-in-gait model. Individual participant's anthropometry measurements were entered into the Plug-in-Gait model.

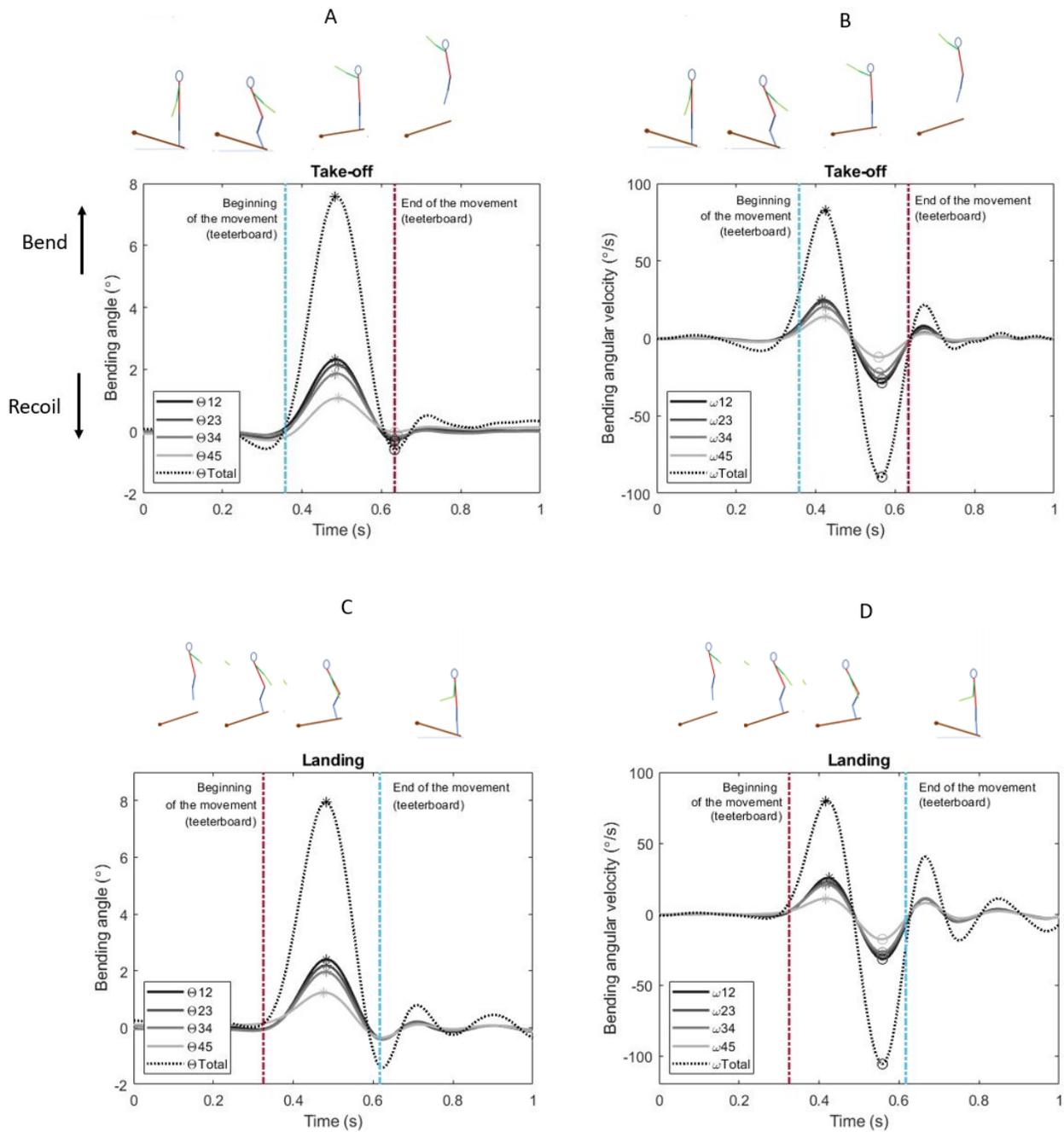
The fundamental principle of teeterboard is the interaction between both acrobat and the board to transfer kinetic energy to potential energy through the elastic energy of the board. During take-off, as a result of the rotation of the board and the extension of the legs, the acrobat's center of mass gains height Kinetic energy from the board ( $E_k$ ) is thus converted into gravitational potential

energy ( $E_p$ ). Elastic potential energy from the flexible board is also converted into gravitational potential energy. Detailed of energy calculations can be found in Appendix.

Reflective markers were also placed all along the board, at the pivot and every 30 cm, to capture the motion of the board (Figure 22). Bending angles  $\theta$  and velocities  $\omega$ , *i.e.* the time derivative of  $\theta$ , were calculated for all 5 segments at each side of the center of the board. The total bending angle  $\theta_{total}$  was calculated as the angle between segment 1 and segment 5 to quantify the total bending of the board. The total bending velocity  $\omega_{total}$  is the time derivative of  $\theta_{total}$ . Bending angles and velocities are presented in Figure 22 to allow defining recoil timing and effect. Board bending and board recoil were defined respectively as the maximum (\*) and minimum (o) bending angles. One additional tracking marker located at the end of the teeterboard was used to determine teeterboard events: the beginning and the end of the teeterboard's movement were defined, respectively, by the minimum and maximum position of that marker. Nine input variables were selected including minimum and maximum total bending angles, minimum and maximum total bending velocities and the time of minimum total bending angle expressed as a percentage of the duration of the teeterboard rotation (Figure 23A and 23B). Minimum total bending angle and velocity represent the recoil effect and the whip, respectively. The maximum total bending angle and velocity reflect the preloading phase of the board. The time of minimum total bending angle expressed as a percentage of the duration of the teeterboard rotation defines the synchronisation of the recoil effect (minimum total bending angle) with the last contact of the acrobat at take-off: a value of 100% indicates an optimized timing of the board's bend and recoil effect. If the value is less than 100%, the recoil effect happened before the last contact of the acrobat, and in the contrary, if the value is more than 100%, the recoil effect happened after the last contact of the acrobat with the board. As the landing of one acrobat plays a major role in the take-off of their partner, factors of the landing of the partner were included in the input variables. These factors include the duration of the rotation during landing, the maximum total bending angle during landing and the minimum and maximum total bending velocity during landing (Figure 23C and 23D).



**Figure 22.** – A. Setup protocol. B. Bending angles are calculated for the five segments on each side of the teeterboard:  $\theta_{1.2}$  and  $\theta_{2.3}$  are illustrated for example. The total deflection angle,  $\theta_{total}$  is calculated between segment 1 and segment 5.



**Figure 23.** – Bending angles during take-off (A) and landing (C) from a typical trial. Bending angular velocity during take-off (B) and landing (D). The two vertical lines represent the beginning and the end of the teeterboard movement. o, minimum bending angles and bending angular velocities, and \*, maximum bending angles and bending angular velocities.

A Boosted Regression Tree (BRT) model was used to determine the influence of the nine explanatory variables described above on jump height. BRT is a robust machine-learning method which combines two algorithms (regression trees and boosting) and undeniably yield higher accuracy than single tree model (Elith et al., 2008). Advantages of this method include its ability to fit complex and non-linear relationships, its tolerance of outliers, collinearity and irrelevant variables, and the data does not require distribution assumptions. BRT model enables reliable identification of the most influential variables and provides the relative influence in percentage which is the relevance of each variable. Higher value of the relative influence indicates stronger association between a given variable to the response variable. The goodness-of-fit parameter calculated in our study is defined as the percentage of explained deviance  $R^2$ . For interpretation, a value of  $R^2$  close to 100% indicates that the model explains 100% of the explanatory variation. Following Elith et al. (2008), the BRT model was run using R statistical software and the gbm R package (R Development Core Team A, 2011).

Prior to the BRT analysis, preliminary correlations and multiple linear regression were performed to examine the pattern of associations among 38 input variables and to determine the significant variables to the outcome (jump height). Bending angles and bending velocities calculated for the five segments demonstrated high correlations ( $r > 0.73$ ), thus only total bending angle and total bending velocity were selected. Only nine variables described above were retained for further analysis.

#### **7.2.4 Results**

Mechanical properties: A linear relationship between added load and board tip deflection was found and the mechanical properties obtained for each board are provided in Table 10.

Tableau 10. – Mechanical properties and dimensions of the teeterboards.

Teeterboard Parameter	Cirque Eloize	Cirque du Soleil	École nationale du cirque
Length (m)	3.20	3.05	3.39
Thickness at the middle (cm)	4.0	4.0	4.5
Thickness at the board end (cm)	2.5	2.0	3.0
Height from the ground to the pivot point (cm)	49.4	52.5	52.5
Width (cm)	43.5	42	41
Natural frequency (Hz)	6.5	9.3	9.7
Stiffness (kN/m)	14.7	12.2	18.5
Damping (%)	1.6	2.2	1.3

Board bending: The angles closer to the center of the board ( $\theta_{1,2}$  and  $\theta_{2,3}$ ) in Figure 23 bent more than the ones closer to the end of the teeterboard.

The relative influence for all explanatory variables is provided in Table 11. The BRT model explained 97.7% of the total deviance in jump height. The small standard deviation observed for the measured variables suggests that the acrobats were consistent in their jumps (Table 11).

The minimum total bending angle and the minimum total bending velocity, which are associated with the recoil phase, had a combined relative influence of 46% to the jump height. The third most important factor (20.9%) was the duration of the rotation during landing. Factors related to the landing phase accumulated 36.6% of relative influence.

Tableau 11. – Mean  $\pm$  standard deviation values for the nine explanatory and output variables, and the BRT results.

<b>Variable</b>	<b>Acrobat 1</b> Mean $\pm$ SD	<b>Acrobat 2</b> Mean $\pm$ SD	<b>Relative influence</b>
Minimum total bending angle (°) during take-off	-1.4 $\pm$ 1.3	-1.5 $\pm$ 1.0	16.5 %
Maximum total bending angle (°) during take-off	7.2 $\pm$ 1.2	7.5 $\pm$ 1.1	6.5 %
Minimum total bending velocity (°/s) during take-off	-96.3 $\pm$ 5.6	-101.8 $\pm$ 6.2	29.5 %
Maximum total bending velocity (°/s) during take-off	88.8 $\pm$ 5.4	96.7 $\pm$ 5.9	5.3 %
Time of minimum total bending angle expressed as a percentage of the duration of the rotation of the teeterboard (%)	101.9 $\pm$ 1.8	100.7 $\pm$ 1.4	5.6 %
Duration of the rotation during landing (ms)	295.7 $\pm$ 7.3	294.1 $\pm$ 11.8	20.9 %
Maximum total bending angle during landing (°)	7.0 $\pm$ 1.1	7.3 $\pm$ 1.4	4.7 %
Minimum total bending velocity during landing (°/s)	-100.7 $\pm$ 5.9	-107.2 $\pm$ 7.1	7.6 %
Maximum total bending velocity during landing (°/s)	76.7 $\pm$ 5.7	83.2 $\pm$ 6.4	3.4 %
Jump height (m)	4.36 $\pm$ 0.3	4.19 $\pm$ 0.3	--

### 7.2.5 Discussion

The main finding of this study was that the recoil effect and the acrobat landing contributed as much as 46% and 37% to the jump height, respectively. This result supported our initial hypothesis that the recoil effect would be the most important factor for acrobats to attain high heights. This was remarkable given that the recoil effect is sometimes neglected or misunderstood when acrobats are learning the Korean teeterboard. If acrobats want to gain jump height and if they have a teeterboard flexible enough, they should try to maximize the recoil effect. The fact that acrobat's landing was the second factor that contributed the most to jump height is not surprising. The landing technique is unique in Korean teeterboard compared to other similar sports (e.g., diving, trampoline) in the sense that acrobats cannot feel the feedback of their landing directly, but their landing is determinant for their partner's jump. Therefore, the acrobats must imperatively be synchronized to transfer energy from one another. In contrast, on diving or trampoline athletes recover their own energy from the springboard or the trampoline. To the best of our knowledge, this is the first study to document bending behavior along a Korean teeterboard.

The overall accuracy of the BRT model was excellent (97.7%). Our BRT model indicated that minimum total bending velocity (29.5%) was the most influential factor affecting the jump height, followed by the duration of the rotation during landing (20.9%) and the minimum total bending angle (16.5%). These variables had a cumulative relative influence of 66.9%. Maximum total bending velocity during landing (3.4%) and maximum total bending angles during landing (4.7%) both had a relative influence lower than 5% and thus could be classified as less important. Note that some important kinematics variables regarding the movement of the acrobats were not included in this study. For example, in our previous study (Cossin et al., 2021b), hip range of motion at take-off had a major influence on jump height and should not be neglected by trainers or acrobats.

However, the energy analysis in the Appendix showed that the elastic strain energy accounted for only 7% of the gravitational potential energy (jump height). Compared to the 46% obtained by the BRT model, this lower result may be explained by the fact that the BRT analysis provided relative influence between a group of selected input variables. In this study, we decided to only

include mechanical variables from kinematics of the board. The best predictor that influences jump height may not be included in our analysis. Moreover, kinetic energy represented 50% of the gravitational potential energy, and vertical velocity of the teeterboard is increased by the recoil effect. Considering this, the total contribution of the recoil effect in fact expected to be between 7% and 50%, which is more consistent with the BRT analysis. We also obtained that the work of the acrobat-partner landing accounted for 71% of the gravitational potential energy (jump height). Clearly, energy losses occurred between the acrobat landing and the acrobat jumping at other interfaces. For instance, other unmeasured energy exchanges occur due to reaction forces at the mat, board friction, board shear stress, board vibration, pivot point friction, and base-ground surface. Such losses are compensated by the impulse given by the acrobat at takeoff.

As for mechanical properties, our results show that damping is very low (between 1.3 and 2.2%) in teeterboards, which is in agreement with studies conducted on springboards, where the influence of damping was found to be negligible in diving (Boda, 1992; Miller, 2000). In fact, the stiffness of the board seemed to be the key element to determine the behavior of the teeterboard. The stiffness of the teeterboard in our study (14.7 kN/m) is similar to the two other boards we measured for comparison. As expected, a thinner board was associated with a smaller stiffness. The effect of teeterboard stiffness on jump height remains to be evaluated. A more compliant teeterboard could lead to higher bending and recoil effect and thus to higher vertical velocity. However, finding the right stiffness is a challenge and a personal choice of the acrobat. On one hand, teeterboards with a low stiffness are better to absorb the impact and maximize the recoil effect; however, it can create timing problem. Acrobats tend to avoid having both ends of the teeterboard touching the mattress at the same time. The take-off must be synchronized with the landing of the other acrobat, and a very low stiffness hinders this synchronization. On the other hand, higher stiffness generates higher impact forces (Cossin et al., 2021a), which could be uncomfortable for the acrobat. Furthermore, teeterboards are built from ash wood, a natural and inconsistent material. The mechanical properties could vary from one wood to another, which makes the construction of standardized teeterboards even more difficult.

A non-uniform bending was observed along each half of the teeterboard (Figure 23). Parts of the teeterboard closer to the center at the pivot point bent twice more than the ones near the acrobat's feet (Figure 23). This is consistent with previous research conducted on diving springboard (Kooi & Kuipers, 1994). In this study, the board was modelled using a lumped-parameter model and determined the deflected shape of the springboard due to a load at the free end. The board was curving more closer to the fulcrum than at the end of the board. However, bending behavior seems to be different in hockey sticks (Villaseñor et al., 2006). Hockey sticks bent closer to the puck than the hand of the player during slap shots. These differences might be explained by the fact that hockey players slap the blade of the stick on the ice surface to preload the stick and have the recoil effect. Hockey players use, in fact, three points of contact: the upper hand at the top of stick, the ice and the lower hand at mid-stick shaft.

The rotation of the teeterboard during landing is similar to the depression phase in diving when elastic energy is stored in the board (Miller, 2000). In diving, the more depressed the board is, the more energy the diver can recover, and increase their vertical velocity at take-off. In landing on a teeterboard, the execution of the knee and hip flexion of the landing technique increases the amount of the board depression. In teeterboard, acrobats are limited by the mat, they can't depress the board indefinitely as in diving. The only parameters in which they can have an influence are the duration of the rotation of the teeterboard (from touchdown to the contact with the mat) and therefore the bending of the board. The duration of the rotation of the teeterboard thus depends upon the mechanical properties of the teeterboard, the downward velocity of the acrobat at touchdown (Cossin et al., 2021b) and the landing technique of the acrobat.

Good timing between the movement of acrobats was also an important aspect for jump height. The minimum bending angle was synchronized with the last contact of the acrobat at take-off for almost all trials. The participants were elite, and they used their own teeterboard, which may explain this good synchronization. This synchronization may not be observed with beginners or acrobats using a teeterboard that they are not used to. The recoil phase is approximately 250 ms in diving (Sayyah et al., 2020.) whereas in our study the whip phase is approximately 130 ms.

There were differences between the two participants, especially in bending velocity and jump height. Acrobat 1 (4.36 m) jumped higher in average than acrobat 2 (4.19 m). In a previous study, the mass difference between acrobats influenced jump height and thus impact forces. However, in this study the mass difference between both acrobats was negligible (1 kg) and therefore, played a non-significant role in the observed difference in jump height. Minimum total bending angle, which represents the recoil effect at the last contact with the teeterboard during take-off, was similar between both acrobat (acrobat 1:  $-1.4^{\circ}$  and acrobat 2:  $-1.5^{\circ}$ ). Minimum total bending velocity was higher for acrobat 2 ( $-101.8^{\circ}/s$ ) than for acrobat 1 ( $-96.3^{\circ}/s$ ), yet the latter executed higher jumps. Higher minimum total bending velocity is expected to induce higher jump if both acrobats had the same technique at take-off. This indicates that acrobat 1 seems to better use the raise of the arms and the restitution of the recoil effect or to faster extend the hips and knees.

Some experimental limitations should be noted. The acrobats performed regular jumps and not acrobatic jumps. The sample size consisted only of two acrobats and they performed on their own teeterboard. With a larger sample size, the statistical power and confidence of the study could be improved. Some questions remain unanswered from this study. The output variable in this study was the jump height but other criteria such as acrobatic performance could be investigated. Examining different stiffness or technical levels may help to better understand the interaction between the design of the teeterboard and the performance. Moreover, kinetic measurements along with kinematics measurements from the teeterboard and the performer are needed to calculate joint force and torque.

### **7.2.6 Conclusion**

Bending angles and bending velocities along the Korean teeterboard were measured during 120 jumps. The recoil effect and the landing of the partner had the most influence on jump height. These results provide more insight into the mechanical parameters that affect the performance of acrobats in Korean teeterboard. Teeterboard designers, acrobats and trainers should be aware that optimizing the recoil effect and the landing technique are the best strategies to improve jump height. Future studies should examine the link between the stiffness and the performance.

## Acknowledgment

This work was supported by a scholarship from Fonds de recherche Société et Culture (FRQSC) from the Quebec government. The authors would like to acknowledge the company Cirque Éloize and the Center for Research, Innovation and Transfer in Circus Arts (CRITAC) for their support in this study.

## Disclosure statement

The authors declare that they have no conflicts of interest.

### 7.2.7 Appendix: energy calculation

An energy analysis was carried out to quantify the energetic interaction between the acrobat and the board during one jump at take-off for example purposes.

$E_p$  was calculated from changes in potential energies of the center of mass of the acrobat from the position on the mat and the maximal jump height by:

$$E_p = mg\Delta h = 2970 J$$

where  $m$  is the mass of the acrobat,  $g$  is the gravitational acceleration and  $\Delta h$  is the height of the center of mass of the acrobat from the position on the mat and the maximal jump height.

The elastic strain energy of the board in bending ( $E_e$ ) is expressed by:

$$E_e = \frac{EI}{2} \int \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 dx = \frac{EI \sum (\Delta \theta)^2}{2 \Delta x} = 200 J$$

where  $E$  is the Young's modulus taken for the ash wood at 12 GPa (Sell et Kropf, 1990),  $I$  is the moment of inertia calculated with the maximal thickness of the board,  $x$  is the distance from along the board and  $\theta$  is the deflexion of the board.

To quantify the contribution of  $E_e$  to the generation of the gravitational potential energy, the ratio ( $r_e$ ) of the amount of elastic strain energy transferred through gravitational potential energy ( $r_e$ ) was also calculated.

$$r_e = \frac{E_e}{E_p} = 7\%$$

The following equation was used to calculate the kinetic energy from the board at take-off:

$$E_k = \frac{1}{2}m\Delta v^2 = 1470 J$$

where  $m$  is the mass of the acrobat and  $\Delta v$  is the change of vertical velocity of the board.

We assessed the ratio of kinetic energy from the board to the gravitational potential energy ( $r_k$ ) by:

$$r_k = \frac{E_k}{E_p} = 50\%$$

The work of the partner-acrobat landing was calculated as follows:

$$W_{LA} = F_{LA}\Delta y = 2120 J$$

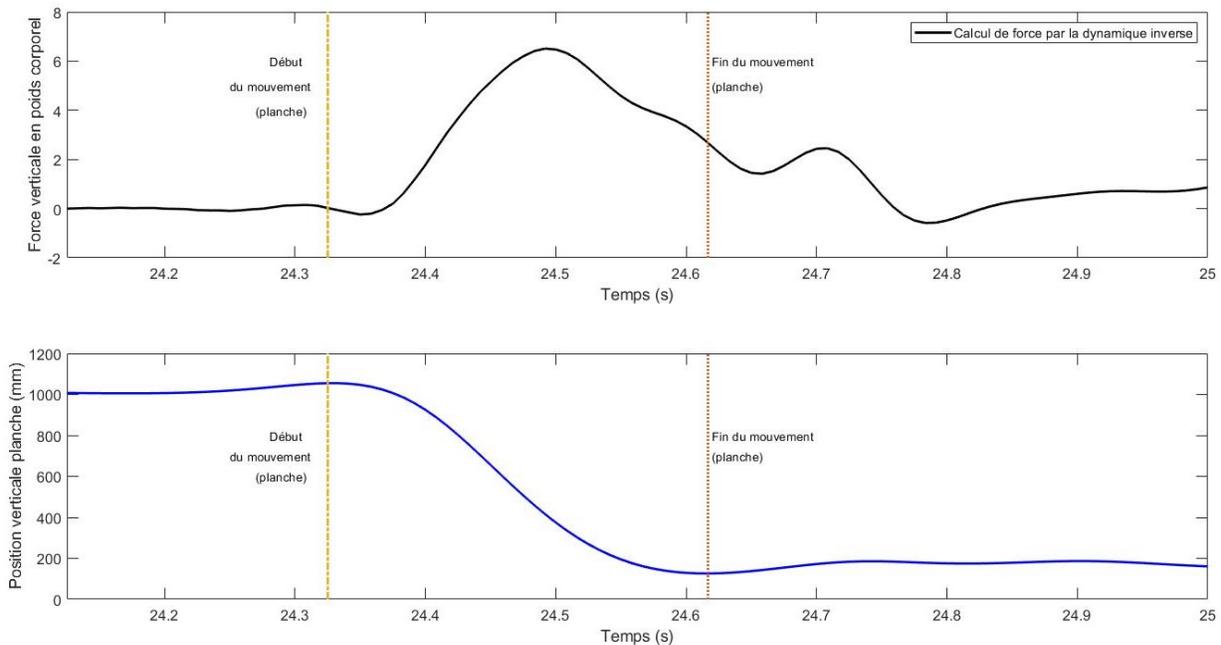
where  $F_{LA}$  is the reaction force at landing and  $\Delta y$  is the height of the board at the foot location from the maximal position to the position on the mat.  $F_{LA}$  was calculated from impact forces data from Cossin et al. (2021a). A regression linear relationship was used to the force data as a function of the jump height to find the maximal impact force at the jump height  $\Delta h$ . It was hypothesized that  $F_{LA}$  was the value of the maximal impact force at the height  $\Delta h$  divided by two to average for the duration of landing.

We assessed the ratio of work of the partner-acrobat landing to the gravitational potential energy ( $r_{LA}$ ) by:

$$r_{LA} = \frac{W_{LA}}{E_p} = 71\%$$

### 7.3 Adéquation des forces de réaction entre la capture de mouvement et les semelles à capteurs de pression

Le pic de force de réaction calculée par régression linéaire avec les données de forces mesurées au chapitre 4 est de 6.1 poids corporel pour la hauteur de saut de 4.14 m pour l'exemple pris en Annexe au 6.2.7. Il est possible de relier la force de réaction à l'accélération du centre de masse par la 2ème loi de Newton :  $F - mg = ma$ , avec  $F$  étant la force de réaction,  $mg$  le poids et  $a$  l'accélération. La force de réaction maximale calculée par cette technique, appelée dynamique inverse, sur ce même saut est de 6.5 poids corporel (Figure 24). L'écart entre les deux valeurs est assez petit : 7%.



**Figure 24.** – En haut : forces de réaction calculées par la dynamique inverse; en bas : position verticale de la planche et mise en évidence par les lignes verticales du début et de la fin du mouvement de la planche.

Les courbes de forces collectées avec les semelles à capteurs de pression montrent deux pics (Figure 11) contrairement à la force mesurée par la dynamique inverse. Le premier pic arrive à 8-10 ms tandis que le deuxième pic survient à environ 100 ms. Le pic de force calculé par la

dynamique inverse serait donc plus le deuxième pic et le premier pic est donc manquant. Plusieurs raisons pourraient expliquer cette absence, la fréquence d'échantillonnage de la capture de mouvement n'est peut-être pas assez élevée. La fréquence est de 120 Hz, ce qui fait un point tous les 8 ms et le premier pic survient à 8-10 ms. Une autre raison serait peut-être que le premier pic de force ne se transmet pas au centre de masse de l'acrobate. La méthode de la dynamique inverse a des difficultés inhérentes. Les petites erreurs dans les mesures de position sont considérablement amplifiées lorsque la position est dérivée temporellement, car les dérivées temporelles impliquent de trouver de petites différences entre les positions de points adjacents. Des techniques pour lisser les données ont été utilisées pour diminuer la perte d'informations significatives, mais même en lissant les données, les résultats sont peu concluants. L'écart peut aussi provenir des semelles à capteurs de pression. Une différence de 17.7% a été trouvée à la marche (Koch et al., 2016). De plus, la hauteur maximale des acrobates lors de la collecte de données était de 3.75 m, contrairement au 4.14 m réalisée dans cette collecte de données (article sur le renvoi de flexion). Une régression linéaire a été utilisée pour trouver la valeur de 6.1 poids corporel, cependant, sans mesure au-delà de 3.75 m, il est difficile d'évaluer correctement la valeur de la force. Yeow et al. (2009) ont par exemple trouvé que les forces de réaction avec le sol suivaient une relation de régression exponentielle avec la hauteur de saut. En conclusion, l'erreur entre la valeur du poids corporel calculée par dynamique inverse et calculée par régression linéaire depuis les forces mesurées des semelles est relativement petite. La précision est comparable avec celle trouvée dans la littérature.

## Chapitre 8 – Discussion et conclusion générale

### 8.1 Synthèse des travaux

L'objectif de cette thèse était de mieux comprendre l'interaction entre la planche coréenne et la performance acrobatique. Cette thèse est la première étude à apporter des données mécaniques et biomécaniques sur la discipline de cirque de planche coréenne. Les résultats ont abouti à la rédaction de quatre articles : le premier sur les forces d'impact, le deuxième sur les facteurs cinématiques qui influencent la hauteur de saut, le troisième sur l'activité musculaire et le dernier sur l'importance du renvoi de flexion dans la hauteur de saut.

Dans le chapitre 4, nous avons mesuré et comparé les forces de réactions à l'atterrissage et les taux de chargements maximaux pour quatre acrobates qui ont sauté sur trois planches différentes avec quatre techniques de réception (normal, amorti, jambes tendues et planche vide). Nous avons utilisé une technique d'apprentissage machine, l'arbre de régression boosté (BRT pour Boosted Regression Tree) pour quantifier l'influence de certains paramètres sur les forces et taux de chargement. Le modèle a associé les paramètres participant, hauteur de saut, planche et technique de réception aux forces et taux de chargement. La hauteur de saut est le premier contributeur (respectivement 40.8 et 37.4%). La valeur maximale des forces d'impact mesuré était 13.5 fois le poids de l'acrobate, cela a été mesuré avec la technique de jambes tendues pour la planche la plus raide. De plus, atterrir sur une planche vide représente une situation précaire puisque cela signifie que les forces d'impact sont en moyenne deux fois plus élevées que les forces générées avec la technique normale, la technique de poussée. Nos résultats démontrent des forces de réaction et des taux de chargement maximaux élevés, suscitant des inquiétudes quant aux risques de blessures. Les entraîneurs devraient connaître le risque de blessure associé à la réception en planche coréenne et des techniques de réception à favoriser pour prévenir le risque de blessure.

Dans le chapitre 5, nous présentons une étude cinématique des sauts en planche coréenne. Un total de 120 sauts a été mesuré par de la capture de mouvement. Trois analyses BRT ont été utilisées à trois étapes du mouvement, la réception de l'acrobate, la rotation de la planche et le

décollage de l'acrobate, pour trouver les variables qui influencent la hauteur de saut. Les variables qui contribuent le plus sont la vitesse verticale du centre de masse de l'acrobate au contact de la planche à l'atterrissage (relative importance: 69.4%), la vitesse maximale de la planche pour la rotation de la planche (72.7%) et le décollage (50.4%). L'amplitude de l'angle de la hanche au décollage a aussi fortement contribué au décollage avec une influence relative de 37.2%. Les concepteurs de planches, les acrobates et les entraîneurs doivent être conscients que la maximisation de ces paramètres est la meilleure stratégie pour augmenter la hauteur de saut. Cette étude a permis une meilleure compréhension de la dynamique entre les acrobates et la planche.

Dans le chapitre 6, l'activité des muscles et la durée des phases ont été comparées pour des acrobates experts et des acrobates novices lors de sauts normaux. Des capteurs d'électromyographie (EMG) ont mesuré les muscles de vastus lateralis, gastrocnemius lateralis et biceps femoris pour deux experts et deux novices. Trois phases, la préparation au décollage, le décollage et l'atterrissage ont une durée plus longue chez les acrobates novices comparés aux acrobates experts. La phase aérienne a duré plus longtemps chez les acrobates experts étant donné qu'ils ont sauté plus haut. L'amplitude des muscles n'a pas démontré de différence claire entre les deux groupes à travers les différentes phases du mouvement. Ces résultats appuient le fait que la synchronisation du mouvement et de l'activité musculaire au mouvement de la planche et entre les deux acrobates est sûrement le facteur le plus important en planche coréenne.

Dans le chapitre 7, le renvoi de la flexion de la planche a été étudié et spécifiquement son apport dans la hauteur de saut. La déformation de la planche a été analysée par section sur toute la longueur. La technique de capture de mouvement a été utilisée pour mesurer le mouvement de deux acrobates effectuant un total de 120 sauts et le mouvement de planche durant ces performances. L'angle de déformation, la vitesse angulaire de déformation et certains temps spécifiques ont été étudiés pour identifier les variables qui contribuent à la hauteur de saut. Une analyse BRT a permis de révéler que l'atterrissage de l'acrobate influence la hauteur de saut à 36.6% tandis que le renvoi de flexion contribue à 46%. Il est aussi important de noter que le renvoi de flexion est synchronisé avec le dernier contact des acrobates lors du décollage. Les propriétés mécaniques ont de plus été mesurées pour trois planches coréennes pour trouver la raideur et

l'amortissement. Bien que l'amortissement trouvé soit négligeable, la raideur semble être un paramètre important pour comprendre le comportement mécanique des planches. Une planche avec une épaisseur plus mince et une longueur plus courte aura une raideur plus petite. Et une raideur plus petite implique une plus grande déformation et un plus grand renvoi de flexion.

Ce travail de thèse constitue une première étape dans la définition du rôle de la planche, et les effets de ses propriétés comme la raideur ou les dimensions, sur la performance. Une conclusion pour les concepteurs de planche serait de viser à améliorer l'efficacité du transfert d'énergie provenant de la poussée de l'acrobate et du renvoi de flexion vers l'acrobate qui s'élanche. L'aspect temporel lié au fait que la planche est flexible est crucial (chapitre 5, 6 et 7). Le renvoi de flexion doit par exemple se faire dans un temps adéquat, c'est-à-dire proche du dernier contact avec l'acrobate. Par exemple, si la planche est trop flexible, le renvoi de flexion arrivera trop tard par rapport au mouvement de l'acrobate. Si la planche permet de maximiser la vitesse verticale par un bon timing du renvoi de flexion, l'acrobate doit ensuite arriver avec la bonne position (chapitre 5), c'est-à-dire tout droit, à ce moment précis, afin de récupérer le plus d'énergie. Cela signifie que la préparation pour le décollage et l'extension des membres inférieurs doit être effectué dans des temps précis.

Enfin la hauteur de saut est un paramètre important en planche coréenne afin de pouvoir exécuter des figures acrobatiques impressionnantes. Nous avons mis en évidence des paramètres qui permettent de maximiser la hauteur de saut, sur lesquels les entraîneurs et acrobates (amplitude des hanches ou vitesse verticale de la planche) ou concepteurs de planche (vitesse verticale de la planche) peuvent contrôler (chapitre 5). Cependant, nous avons aussi relevé que les forces d'impact et le taux de chargement était en grande partie influencés par la hauteur de saut (chapitre 4). Atteindre une plus grande hauteur de saut, c'est un critère de performance, mais il peut aussi devenir un risque de blessure. Pour essayer de diminuer ces forces et taux de chargement, il est possible de jouer sur la souplesse de la planche, la différence de poids entre les acrobates ou la technique de réception (chapitre 4 et 7).

Si la planche coréenne totalement était totalement rigide et que l'on faisait tomber une masse inerte, et si on posait l'hypothèse qu'il n'y a aucune perte d'énergie, alors la vitesse verticale du

centre de masse de la masse inerte serait la vitesse de sortie de la masse en face. En planche coréenne, comme la planche est flexible, si on fait tomber un objet inerte alors l'objet en face aurait une hauteur de saut moins élevée que le premier objet car il y aurait de la perte d'énergie élastique. La contribution de l'acrobate à l'atterrissage comme au décollage est donc cruciale au système pour augmenter la hauteur de saut. Nous avons incorporé la vitesse verticale du centre de masse de l'acrobate au moment du contact avec la planche lors de l'atterrissage dans l'analyse BRT au chapitre 5 pour différencier la contribution de ce qui est 'contrôlable' (mouvement de l'acrobate), de ce qui ne l'est pas (vitesse du centre de masse de l'acrobate à la fin de la chute libre). Nous montrons ainsi que l'action de l'acrobate au travers des paramètres 'angle de flexion maximale des hanches au contact avec la planche lors de l'atterrissage', 'angle de flexion maximale des genoux au contact avec la planche lors de l'atterrissage' et 'angle des genoux au contact de la planche lors de l'atterrissage' (qui sont associés au mouvement de poussée de l'acrobate) contribuent à 30%, comparativement à la vitesse du COM qui est d'environ 70%.

Nous avons aussi montré que la diversité humaine comporte de nombreuses dimensions, que ce soit morphologiquement, dans les techniques acrobatiques ou dans le contrôle moteur (chapitre 4, 5 et 6). La prochaine étape serait peut-être de l'optimisation individualisée. Le système acrobate-planche semble compliqué à simplement être résumé en quelques paramètres biomécaniques ou mécaniques.

## **8.2 Originalité**

Les objectifs établis dans cette thèse, ainsi que les méthodes développées pour les atteindre, s'inscrivent dans une perspective globale de mieux comprendre l'interaction entre la conception de la planche coréenne et la performance humaine.

L'originalité principale des travaux présentés réside d'allier analyses biomécaniques et mécaniques de la discipline de planche coréenne. La thèse présente des données biomécaniques et mécaniques pour la première fois sur cette discipline de cirque. À notre connaissance, aucune autre étude scientifique n'a traité ce sujet. Dans la littérature scientifique, nous pouvons trouver quatre études biomécaniques réalisées en cirque. Une thèse récente présente une caractérisation anthropométrique et physiologique sur trente étudiants en arts du cirque (Hakim, 2020). Une

mesure de la force de préhension et de la contraction volontaire maximale du muscle du quadriceps droit et gauche a aussi été réalisée. Un article, similaire à la précédente, présente une évaluation longitudinale de la composition corporelle de 92 étudiants-artistes de l'École nationale de cirque de Montréal (Decker et al., 2021). On peut aussi citer l'étude de Huberman et al. (2020) qui a rapporté les amplitudes de mouvements de l'épaule de 193 acrobates de cirque. Et finalement, l'accélération, mesurée par système inertiel, a été comparée entre entraînement et spectacle pour sept acrobates du Cirque du Soleil dans un autre papier (Barker et al., 2020). Cependant, aucune mesure des forces de réaction ou du mouvement n'a été effectuée dans ces quatre études. À notre connaissance, la présente thèse est la première à utiliser du mocap avec des acrobates de cirque et à présenter des études biomécaniques.

L'originalité réside aussi dans les méthodes utilisées. Une méthode a été développée pour caractériser et comparer mécaniquement les planches. L'analyse sur les paramètres cinématiques a été découpée en trois pour suivre la continuation temporelle du mouvement : l'acrobate qui atterrit fait pivoter la planche qui permet à l'acrobate-partenaire de décoller. En outre, le fait d'appliquer une méthode d'apprentissage machine en biomécanique est peu commun, mais commence à se démocratiser. Il est possible de trouver des articles récents utilisant des modèles d'arbre de régression boostée de gradient, gradient boosted regression trees en anglais, en biomécanique (Liu et al., 2020; Derie et al., 2020). La technique de régression arborescente boostée présente plusieurs avantages par rapport aux modèles statistiques traditionnels comme le modèle linéaire générale (GLM) : elle fonctionne aussi bien pour les données de catégorie que numériques, aucune hypothèse n'est nécessaire sur les données, elle est facile à implémenter et elle peut prendre en compte des valeurs adhérentes ou des données manquantes (Abeare, 2009; França et Cabral, 2015).

### **8.3 Limites et améliorations**

L'étude proposée a été effectuée dans un contexte exploratoire et les résultats permettent de mieux préciser des cadres de référence pour des travaux futurs, afin de proposer des méthodes pour mieux déterminer la relation entre le mouvement de l'acrobate et les caractéristiques

mécaniques de la planche. Chaque étude a en réalité permis une première analyse et a permis de mettre en avant certains facteurs, mais elles ont aussi amené son lot de questions.

Une des principales limites de ce projet réside dans le nombre peu élevé de participants, ce qui entrave la généralisation des résultats. Dans le monde, il n'y a pas un nombre conséquent d'acrobate pratiquant la planche coréenne, du fait du niveau de technique élevé que cela requiert. Une estimation approximative serait une centaine de personnes. Pour cette raison, il n'a pas été possible de rassembler plus de participants lors des collectes de données. Certains journaux en biomécanique exigent minimum 10 participants comme *Human Movement Science*. Par exemple, une consigne pour avoir 90% de puissance statistique en sport est d'avoir 5, 10 ou 20 patients qui doivent effectuer 10, 5 ou 3 essais respectivement, spécifiquement lors de mouvement similaire ou cyclique (Bates et al., 1992). Afin de pouvoir généraliser les résultats obtenus durant cette thèse, les futurs travaux devraient inclure plus de participants.

Les connaissances des paramètres cinétiques (forces de réactions) et des paramètres cinématiques (accélérations) ainsi que des paramètres segmentaires peuvent être utilisées pour calculer les forces et moments aux articulations (avec les équations de Newton), ainsi que l'énergie, le travail et la puissance de chaque articulation ou segment corporel. Cependant cette partie n'a pas été réalisée durant cette thèse.

Dans la présente étude, la hauteur de saut a été le critère de performance choisi. En effet, avant de pouvoir effectuer des figures acrobatiques, l'enjeu réside à prendre de la hauteur et à donc maîtriser l'atterrissage et le décollage pour les acrobates. Cependant, il serait intéressant d'étudier d'autres critères. Il a été mis en avant dans ce projet que l'amplitude de flexion des genoux et des hanches fût associée à la hauteur de saut. Une étude plus approfondie de la coordination entre le mouvement de flexion et d'extension des membres inférieurs entre l'acrobate et la planche que ce soit au décollage et à l'atterrissage permettrait de souligner les enjeux de temporalité. Une autre question vraiment importante concerne l'angle de la planche. Un des défis chez les débutants est de garder l'axe vertical alors la planche pousse l'acrobate vers l'avant. Une des plus grandes difficultés lors du décollage est le fait que la planche finit avec un angle par rapport à l'horizontale. Les acrobates sont donc en réalité poussés vers l'avant. C'est

pourquoi souvent les débutants tombent en avant sur la planche. La technique est de pousser avec les orteils lors des derniers instants et ainsi d'adopter une position carpe (légère flexion des hanches), cependant l'impact de cette technique n'a jamais été investigué. L'étude pourrait se concentrer sur la trajectoire du centre de masse et des techniques employées pour garder cette trajectoire verticale. L'analyse de la trajectoire parabolique permettrait aussi d'évaluer les composantes dans les trois dimensions de la vitesse initiale et il serait possible de trouver les paramètres cinématiques qui influencent cette trajectoire. Une étude sur le saut en longueur a déterminé que l'angle de foulée (angle entre les deux jambes) lors de la dernière étape de l'approche étaient fortement corrélés ( $r > 0.7$ ) avec le placement du pied sur la planche d'appel et avec la trajectoire latérale de vol du centre de masse du corps (Panoutsakopoulos, 2010). En effet, une petite impulsion latérale (proche de zéro) est développée en raison du positionnement de la (dernière) jambe sur la planche d'appel, indiquant que les sauteurs doivent faire face à une déviation latérale de leur trajectoire de vol du centre de masse. Cette déviation pendant le vol se traduit par un saut plus court de 1 à 2 cm, une distance qui peut être cruciale en saut en longueur (Panoutsakopoulos, 2010). Une future étude en planche coréenne pourrait s'attaquer aux mouvements latéraux puisqu'atterrir sur un côté de la planche représente un risque majeur de blessures.

Sur la biomécanique et la mécanique du mouvement humain, il reste quelques questions en suspens : l'influence des bras dans le mouvement, les forces de réaction au décollage, l'exécution d'acrobaties et la poussée de l'acrobate-partenaire avant les acrobaties, l'influence de la flexibilité des chevilles étant donné que la planche est en angle, les blessures surtout sur le long terme, l'entraînement physique spécifique à la discipline et la force musculaire. En outre, l'étude proposée s'est focalisée sur des sauts droits sans figures acrobatiques pour mieux comprendre le mouvement de l'acrobate lors de la réception et du décollage. Les travaux futurs pourraient observer comment les acrobates exécutent des mouvements acrobatiques et, en particulier, comment la technique utilisée lors de la réception et du décollage est modifiée juste avant une acrobatie.

En hockey, il a été démontré que le 'flex' du bâton n'a pas d'influence sur la vitesse de la rondelle chez les athlètes élités (Hannon et al. 2011; Worobets et al., 2006; Pearsall et al., 1999; Wu et al.,

2003). Les travaux démontrent que les athlètes élités adaptent leur technique selon la raideur du bâton. Wu et al. (2003) a trouvé que les joueurs de hockey professionnels modifient leur placement de main. Les joueurs experts placeraient leur main inférieure plus bas dans le tir-frappé par rapport aux joueurs non experts. Les experts ont également frappé la rondelle plus fortement et avaient une plus grande flexion et déviation du bâton. Dans notre étude, le changement de planche (et donc de raideur) a généré une faible variation dans les forces d'impact et une variation plus évidente dans les taux de chargement (chapitre 4). La hauteur de saut semble aussi varier en fonction de la planche (chapitre 4). Plus d'études sur les conséquences du changement de planche sur la cinématique et la temporalité de l'acrobate sont nécessaires pour mieux comprendre le lien entre raideur et performance en planche coréenne. En ayant une meilleure compréhension du lien entre raideur et performance, il est possible d'imaginer que les acrobates puissent commander une planche avec une raideur présélectionnée, au même titre que le 'flex' dans les bâtons de hockey.

### **8.3 Perspectives**

Les données récoltées durant ce projet ont déjà excédé le cadre de cette thèse. Les données de force d'impact et de déformation de planche ont permis de construire une planche en matériaux composites, c'est un projet financé en partie par le Cirque du Soleil et réalisé par le Centre de recherche, d'innovation et de transfert en arts du cirque (CRITAC) et le Centre de développement des composites du Québec (CDCQ). Le bois apporte des inconvénients à la planche: variabilité des propriétés du bois d'une planche à une autre (donc risque de blessures accru), sensibilité à la température et à l'humidité, usure rapide, bris de planche, etc. Par exemple, les acrobates du Cirque du Soleil ont une planche d'entraînement pour l'après-midi et une planche de spectacle différente le soir. Même fabriquées avec les mêmes dimensions et le même bois, les planches ont des comportements mécaniques différents, ce qui demande aux acrobates de constamment s'adapter afin de ne pas se blesser. De plus, par leurs nombreux spectacles en cours (pré-COVID, 44 spectacles), l'usure ou les bris des planches sont fréquents. La planche fabriquée en matériaux composites recyclable a été testée par quatre acrobates professionnels et l'enseignant de l'École nationale de cirque. La planche a reçu un accueil très favorable, un des acrobates a même signalé que cette planche était meilleure que la sienne en bois. Actuellement, la planche est désormais

mise en service à l'École nationale de cirque pour un minimum d'un an pour voir l'évolution d'une telle planche dans la durée : est-ce que les propriétés mécaniques vont évoluer? Combien de temps cette planche peut-elle durer? Ce sont le type de questions qu'il reste à répondre avant de pouvoir penser à une commercialisation.

Bien qu'un premier prototype soit très prometteur, le comportement mécanique en interaction avec les acrobates, le matelas et la base pourrait être encore mieux compris. Le modèle du ressort linéaire est une simplification. Cette modélisation a été possible parce que la déflexion a été trouvée linéaire sous l'action d'un poids. De plus, cette simplification permet de faire une première différenciation entre les planches. Pour la construction d'un futur prototype ou de futures planches, cette modélisation est pour l'instant suffisante. Cependant, les déplacements horizontaux et le mouvement de rotation sont négligés. Pour des modélisations comprenant l'acrobate par exemple, il est nécessaire de complexifier le modèle utilisé afin de simuler plus précisément l'interaction entre l'acrobate et la planche (King et al., 2019; Yeadon et al., 2006). Des modélisations de la planche plus poussées comme par des éléments finis ou des systèmes multi-corps flexibles permettraient de mieux simuler le comportement mécanique et le mouvement de la planche. Par ailleurs, on aura intérêt à concentrer les études sur la personnalisation des équipements aux préférences, à la taille et à la technique des acrobates.

## **8.4 Conclusion générale**

La discipline de planche coréenne est de plus en plus populaire, autant dans les écoles de cirque que dans les spectacles de cirque. L'équipement, constitué d'une simple planche à bascule en bois, permet à deux acrobates d'effectuer des figures acrobatiques impressionnantes. La technique de l'acrobate passe constamment d'impulsion à réception, de temps dans les airs et au sol, grâce au principe de contrepoids et de catapulte de l'équipement.

C'est dans cette optique que nous avons proposé d'étudier l'interaction entre la planche coréenne et la performance acrobatique, en alliant analyses mécaniques et biomécaniques. Avant qu'un nouvel équipement de cirque comme la planche coréenne ne soit développé, il doit y avoir une forte compréhension de la biomécanique pouvant influencer la performance et/ou le risque de blessure. Ce travail de thèse a permis de mieux comprendre les variables qui influencent les forces d'impact, la

performance, la hauteur de saut ou l'effet 'catapulte' de la planche. Les résultats ont permis de construire un premier prototype de planche en matériaux composites. L'incorporation des matériaux composites a représenté une innovation dans les équipements de sport, notamment nous pouvons citer les bâtons de hockey ou les perches pour le saut à la perche, et il ne fait aucun doute que les équipements de cirque vont suivre la même logique.

Avec une planche flexible, les acrobates doivent prendre en compte la durée de stockage et de récupération de l'énergie élastique. La rigidité optimale de la planche est différente pour chaque acrobate et dépend de plusieurs facteurs, dont la technique ou la masse de l'acrobate. Il s'agit clairement d'un problème pluridisciplinaire qui pourrait être résolu grâce à un modèle numérique qui incorpore autant de l'analyse de mouvement que de la mécanique. Les années à suivre vont sans doute être une période passionnante pour le développement de nouveaux équipements de cirque.

## Références bibliographiques

Abeare, S. (2009). *Comparisons of boosted regression tree, GLM and GAM performance in the standardization of yellowfin tuna catch-rate data from the Gulf of Mexico lonline [sic] fishery*. [mémoire de maîtrise, Louisiana State University].

Afifi, M. et Hinrichs, R. N. (2012). A mechanics comparison between landing from a countermovement jump and landing from stepping off a box. *Journal of applied biomechanics*, 28(1), 1-9.

Akasaka, K., Tamura, A., Katsuta, A., Sagawa, A., Otsudo, T., Okubo, Y., Sawada, Y. et Hall, T. (2017). Does trampoline or hard surface jumping influence lower extremity alignment?. *Journal of physical therapy science*, 29(12), 2147-2150.

Akl, A. R. (2013). The role of biomechanical parameters and muscle activity during eccentric and concentric contractions in vertical jump performance. *Journal of Physical Education and Sport*, 13(3), 430.

Alanazi, A. (2017). *Biomechanical evaluation of landing maneuvers in soccer players with an anterior cruciate ligament reconstruction* [thèse de doctorat, Texas Woman's University].

Ambegaonkar, J. P., Shultz, S. J., Perrin, D. H., Schmitz, R. J., Ackerman, T. A. et Schulz, M. R. (2011). Lower body stiffness and muscle activity differences between female dancers and basketball players during drop jumps. *Sports Health*, 3(1), 89-96.

Ancillao, A., Tedesco, S., Barton, J. et O'Flynn, B. (2018). Indirect measurement of ground reaction forces and moments by means of wearable inertial sensors: A systematic review. *Sensors*, 18(8), 2564.

Arabantzi, F., Papadopoulos, C., Prassas, S., Komsis, G. et Gourgoulis, V. (2000). Electromyographic (EMG) activity of lower extremity musculature during drop jumping from different heights. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*.

- Arampatzis, A., Schade, F., Walsh, M. et Brüggemann, G. P. (2001). Influence of leg stiffness and its effect on myodynamic jumping performance. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11(5), 355-364
- Atkinson, G. et Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports medicine*, 26(4), 217-238.
- Ball, N. et Scurr, J. (2013). Electromyography normalization methods for high-velocity muscle actions: review and recommendations. *Journal of Applied Biomechanics*, 29(5), 600-608.
- Barker, L., Burnstein, B. et Mercer, J. (2020). Acceleration profile of an acrobatic act during training and shows using wearable technology. *Sports biomechanics*, 19(2), 201-211.
- Bates, B. T., Dufek, J. S. et Davis, H. P. (1992). The effect of trial size on statistical power. *Medicine and science in sports and exercise*, 24(9), 1059-1068.
- Bazergui, A., Bui-Quoc, T., Biron, A., McNtyre, G. et Laberge C. (1987). *Résistance des Matériaux*. Montréal, Edition de l'École Polytechnique de Montréal.
- Bell, A. L., Pedersen, D. R. et Brand, R.A. (1990). A comparison of the accuracy of several hip center location prediction methods. *Journal of Biomechanics*, 23(6), 617–621
- Belotti, V. (2021, 5 avril). *La nouvelle vie d'acrobate de Karim Randé*. RCF Radio. <https://rcf.fr/vie-quotidienne/la-nouvelle-vie-d-acrobate-de-karim-rande>
- Betzler, N. F., Monk, S. A., Wallace, E. S. et Otto, S. R. (2012). Effects of golf shaft stiffness on strain, clubhead presentation and wrist kinematics. *Sports biomechanics*, 11(2), 223-238.
- Bibliothèque Nationale de France. (2009). *Encyclopédie des arts du cirque*. Tiré de : <https://cirque-cnac.bnf.fr/fr>
- Bisseling, R. W., Hof, A. L., Bredeweg, S. W., Zwerver, J. et Mulder, T. (2008). Are the take-off and landing phase dynamics of the volleyball spike jump related to patellar tendinopathy?. *British journal of sports medicine*, 42(6), 483-489.

Blajer, W., et Czaplicki, A. (2001). Modeling and inverse simulation of somersaults on the trampoline. *Journal of Biomechanics*, 34(12), 1619-1629.

Bobbert, M. F., Gerritsen, K. G., Litjens, M. C., & Van Soest, A. J. (1996). Why is countermovement jump height greater than squat jump height?. *Medicine and science in sports and exercise*, 28, 1402-1412.

Boda, W. L. (1992). *Modelling the springboard and diver as an oscillating spring system* [thèse de doctorat, University of Massachusetts Amherst].

Bodig, J. et Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites* (15th edition). Van Nostrand Reinhold Company.

Bressel, E. et Cronin, J. (2005). The landing phase of a jump strategies to minimize injuries. *Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, 76(2), 30-35.

Briggs, K. (2014). *The relationship between strength, power and trampoline jump height* [thèse de doctorat, Cardiff Metropolitan University].

Centre national des arts du cirque, Noel, K., Fournier, D., Soubies, D., Thomas, A., Thomas, W., Fasoli, G. et Thomas, C. (2018). *L'évolution de l'acrobatie contemporaine : regards croisés sur les pédagogies*. Châlons-en-champagne, France : Centre national des arts du cirque.

Cheng, K. B. et Hubbard, M. (2004). Optimal jumping strategies from compliant surfaces: A simple model of springboard standing jumps. *Human Movement Science*, 23(1), 35-48.

Clough, R. W. et Penzien, J. (1995). *Dynamics of Structures* (2<sup>e</sup> éd.). McGraw-Hill.

Cossin, M., Ross, A. et Gosselin, F. P. (2018). Repeatability of force signals in aerial circus straps. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 232(3), 225-235.

Cossin, M., Ross, A. et Prince, F. (2021a). Effect of jump heights, landing techniques, and participants on vertical ground reaction force and loading rate during landing on three different Korean teeterboards. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 17543371211058031.

Cossin, M., Ross, A. et Prince, F. (2021b). A kinematic analysis of jumping technique in elite Korean teeterboard athletes: a case-study. *Sports Biomechanics*, 1-9.

Cossin, M., Ross, A. et Prince, F. (2021c). The influence of the board bending and recoil effect on circus performance in Korean teeterboard [Article en préparation].

Cowling, E., Steele, J. et McNair, P. (2003). Effect of verbal instructions on muscle activity and risk of injury to the anterior cruciate ligament during landing. *British Journal of Sports Medicine*, 37(2), 126–130.

Criswell, E. (2010). Cram's introduction to surface electromyography. Jones & Bartlett Publishers.

Crowell, H. P. et Davis, I. S. (2011). Gait retraining to reduce lower extremity loading in runners. *Clinical biomechanics*, 26(1), 78-83.

Davis, I. S., Bowser, B. J. et Mullineaux, D. R. (2016). Greater vertical impact loading in female runners with medically diagnosed injuries: a prospective investigation. *British journal of sports medicine*, 50(14), 887-892.

Decker, A., Aubertin, P. et Kriellaars, D. (2021). Body Composition Adaptations Throughout an Elite Circus Student-Artist Training Season. *Journal of Dance Medicine & Science*, 25(1), 46-54.

Denis, D. (2001). *Dictionnaire illustré des mots et locutions en 3 volumes du cirque*. Paris : Association arts des 2 mondes.

Dempster, W. T. (1955). *Space requirements of the seated operator, geometrical, kinematic, and mechanical aspects of the body with special reference to the limbs*. Michigan State Univ East Lansing.

Derie, R., Robberechts, P., Van den Berghe, P., Gerlo, J., De Clercq, D., Segers, V. et Davis, J. (2020). Tibial acceleration-based prediction of maximal vertical loading rate during overground running: a machine learning approach. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 33.

Dufek, J. S. et Bates, B. T. (1991). Biomechanical factors associated with injury during landing in jump sports. *Sports medicine*, 12(5), 326-337.

Dul, J., Bruder, R., Buckle, P., Carayon, P., Falzon, P., Marras, W. S., Wilson, J.R. et van der Doelen, B. (2012). A strategy for human factors/ergonomics: developing the discipline and profession. *Ergonomics*, 55(4), 377-395.

Edwards, S., Steele, J. R. et McGhee, D. E. (2010). Does a drop landing represent a whole skill landing and is this moderated by fatigue?. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 20(3), 516-523.

El Kati, R., Forrester, S. et Fleming, P. (2010). Evaluation of pressure insoles during running. *Procedia Engineering*, 2(2), 3053-3058.

Elith, J., Leathwick, J. R. et Hastie, T. (2008). A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 77(4), 802-813.

Elvin, N. G., Elvin, A. A. et Arnoczky, S. P. (2007). Correlation between ground reaction force and tibial acceleration in vertical jumping. *Journal of applied biomechanics*, 23(3), 180-189.

Ervilha, U. F., Fernandes, F. D. M., Souza, C. C. D. et Hamill, J. (2020). Reaction time and muscle activation patterns in elite and novice athletes performing a taekwondo kick. *Sports biomechanics*, 19(5), 665-677.

Etienne, R., Vinet, J. et Vitali, J. (2014). *Quelle formation professionnelle supérieure pour les arts du cirque?*. Paris, France : L'Harmattan.

Fagenbaum, R. et Darling, W. G. (2003). Jump landing strategies in male and female college athletes and the implications of such strategies for anterior cruciate ligament injury. *The American journal of sports medicine*, 31(2), 233-240.

FEDEC. (2009). *Manuel d'instruction de base pour les arts du cirque*. Bruxelles : Fédération Européenne des Écoles de Cirque Professionnels. Vue à : <http://www.fedec.eu/file/241/download>

Ferger, K., Hackbarth, M., Mylo, M. D., Müller, C. et Zentgraf, K. (2019). Measuring temporal and spatial accuracy in trampolining. *Sports Engineering*, 22(3), 1-7.

Ferris, D. P., Louie, M. et Farley, C. T. (1998). Running in the real world: adjusting leg stiffness for different surfaces. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 265(1400), 989-994.

França, S. et Cabral, H. N. (2015). Predicting fish species richness in estuaries: which modelling technique to use?. *Environmental Modelling & Software*, 66, 17-26.

Frobell, R. B., Roos, H. P., Roos, E. M., Le Graverand, M. P. H., Buck, R., Tamez-Pena, J., Totterman, S., Boegard, T. et Lohmander, L. S. (2008). The acutely ACL injured knee assessed by MRI: are large volume traumatic bone marrow lesions a sign of severe compression injury?. *Osteoarthritis and Cartilage*, 16(7), 829-836.

Froissart, T. et Thomas, C. (2018). *Arts du cirque et spectacle vivant : Les formations en arts du cirque et en activités physiques artistiques*. Reims, France : Éditions et Presses universitaires de Reims (ÉPURE).

Fürst, A., Galuppo, L. D., Judy, C. E., Auer, J. A. et Snyder, J. R. (2016). Evaluation of the Tekscan F-SCAN system for measurement of the kicking force in horses. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde*, 158(9), 623-629.

Giatsis, G., Kollias, I., Panoutsakopoulos, V., et Papaïakovou, G. (2004). Volleyball: Biomechanical differences in elite beach-volleyball players in vertical squat jump on rigid and sand surface. *Sports Biomechanics*, 3(1), 145-158.

Glitsch, U. et Henrichs, B. (1992). Pressure distribution under the foot during take off in trampolining. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*.

Goudard, P. (2011). *Le cirque entre l'élan et la chute* (vol. 1). Ed. espaces 34.

Hakim, H. (2020). *CircaPerf-Motricités Circassiennes: Optimisation Biomécanique et Neuromusculaire de la Performance et Prévention de la Santé des Artistes* [thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne].

Halaki, M. et Ginn, K. (2012). Normalization of EMG signals: to normalize or not to normalize and what to normalize to. *Computational intelligence in electromyography analysis-a perspective on current applications and future challenges*, 175-194.

Hamdi, M. (2012). *Effet de trois techniques d'oscillation des bras sur la capacité d'atterrissage du gymnaste lors du salto arrière sur place*. [mémoire de maîtrise, Manouba University, Tunisia].

Hamel, C. (2016). *Anthologies des arts du cirque*. Paris : Bibliothèque nationale de France. Vue à : <http://cirque-cnac.bnf.fr/fr/acrobatie/propulsion/la-bascule>

Hannon, A., Michaud-Paquette, Y., Pearsall, D. J. et Turcotte, R. A. (2011). Dynamic strain profile of the ice hockey stick: comparisons of player calibre and stick shaft stiffness. *Sports Engineering*, 14(2), 57-65.

Harman, E. A., Rosenstein, M. T., Frykman, P. N. et Rosenstein, R. M. (1990). The effects of arms and countermovement on vertical jumping. *Medicine and science in sports and exercise*, 22(6), 825–833.

Harry, J. R., Paquette, M. R., Caia, J., Townsend, R. J., Weiss, L. W., & Schilling, B. K. (2015). Effects of footwear condition on maximal jumping performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(6), 1657-1665.

Harvie, J. et Hurley, E. (1999). *States of play: Locating Québec in the performances of Robert Lepage, Ex Machina, and the Cirque du Soleil*. *Theatre Journal*, 51(3), 299-315.

Helten, T., Brock, H., Müller, M. et Seidel, H. P. (2011). Classification of trampoline jumps using inertial sensors. *Sports Engineering*, 14(2-4), 155-164.

Hiley, M. J. et Yeadon, M. R. (2003). Optimum technique for generating angular momentum in accelerated backward giant circles prior to a dismount. *Journal of Applied Biomechanics*, 19(2), 119-130.

Hsiao, H., Guan, J. et Weatherly, M. (2002). Accuracy and precision of two in-shoe pressure measurement systems. *Ergonomics*, 45(8), 537-555.

Huberman, C., Scales, M. et Vallabhajosula, S. (2020). Shoulder Range of Motion and Strength Characteristics in Circus Acrobats. *Medical Problems of Performing Artists*, 35(3), 145-152.

Hug, F. et Dorel, S. (2009). Electromyographic analysis of pedaling: a review. *Journal of electromyography and Kinesiology*, 19(2), 182-198.

Huntley, M. P., Davis, C. L., Strangwood, M. et Otto, S. R. (2006). Comparison of the static and dynamic behaviour of carbon fibre composite golf club shafts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 220(4), 229-236.

Iida, Y., Kanehisa, H., Inaba, Y. et Nakazawa, K. (2011). Activity modulations of trunk and lower limb muscles during impact-absorbing landing. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 21(4), 602-609.

InBody. (2017). *How Cirque du Soleil Used Body Composition Analysis to Change Their Training Approach*. <https://inbodyusa.com/blogs/case-studies/how-cirque-du-soleil-used-body-composition-analysis-to-change-their-training-approach/>

Ingen Schenau, G. J. V. (1989). From rotation to translation: Constraints on multi-joint movements and the unique action of bi-articular muscles. *Human Movement Science*, 8(4), 301-337.

Jackson, M. I., Hiley, M. J. et Yeadon, M. R. (2011). A comparison of Coulomb and pseudo-Coulomb friction implementations: application to the table contact phase of gymnastics vaulting. *Journal of biomechanics*, 44(15), 2706-2711.

Jacques, H. P. (2008). *Determining and modelling the forces exerted by a trampoline suspension system* [Doctoral dissertation, Loughborough University].

Jando, D. et Gault, N. (1977). *Histoire mondiale du cirque*. Paris : J.-P. Delarge.

Johnson, W. R., Mian, A., Donnelly, C. J., Lloyd, D. et Alderson, J. (2018). Predicting athlete ground reaction forces and moments from motion capture. *Medical & biological engineering & computing*, 56(10), 1781-1792.

Jones, I. C. et Miller, D. L. (1996). Influence of fulcrum position on springboard response and takeoff performance in the running approach. *Journal of Applied Biomechanics*, 12(3), 383-408.

Kellis, E., Arabatzi, F. et Papadopoulos, C. (2003). Muscle co-activation around the knee in drop jumping using the co-contraction index. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 13(3), 229-238.

King, M. A., Kong, P. W. et Yeadon, M. R. (2009). Determining effective subject-specific strength levels for forward dives using computer simulations of recorded performances. *Journal of biomechanics*, 42(16), 2672-2677.

King, M. A., Kong, P. W. et Yeadon, M. R. (2019). Maximising forward somersault rotation in springboard diving. *Journal of biomechanics*, 85, 157-163.

Kirby, T. J., McBride, J. M., Haines, T. L. et Dayne, A. M. (2011). Relative net vertical impulse determines jumping performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 27(3), 207-214.

Koch, M., Lunde, L. K., Ernst, M., Knardahl, S. et Veiersted, K. B. (2016). Validity and reliability of pressure-measurement insoles for vertical ground reaction force assessment in field situations. *Applied ergonomics*, 53, 44-51.

Kopper, B., Csende, Z., Sáfár, S., Hortobágyi, T. et Tihanyi, J. (2013). Muscle activation history at different vertical jumps and its influence on vertical velocity. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23(1), 132-139.

Kooi, B. W. et Kuipers, M. (1994). The Dynamics of Springboards. *Journal of Applied Biomechanics*, 10(4), 335–351.

Kyröläinen, H., Avela, J. et Komi, P. V. (2005). Changes in muscle activity with increasing running speed. *Journal of sports sciences*, 23(10), 1101-1109.

Lavers, K., Leroux, L. P. et Burt, J. (2019). *Contemporary circus*. Routledge.

Leathwick, J. R., Elith, J., Francis, M. P., Hastie, T. et Taylor, P. (2006). Variation in demersal fish species richness in the oceans surrounding New Zealand: an analysis using boosted regression trees. *Marine Ecology Progress Series*, 321, 267-281.

Lehmann, T., Lorz, A., Schleichardt, A., Naundorf, F., Knoll, K., Eckardt, F. et Witte, K. (2020). A multi-body model of a springboard in gymnastics. *Science of Gymnastics Journal*, 12(3).

Leitch, K. M., Birmingham, T. B., Jones, I. C., Giffin, J. R. et Jenkyn, T. R. (2011). In-shoe plantar pressure measurements for patients with knee osteoarthritis: Reliability and effects of lateral heel wedges. *Gait & posture*, 34(3), 391-396.

Leroux, L. P. et Batson, C. R. (2016). *Cirque global: Quebec's expanding circus boundaries*. McGill-Queen's Press-MQUP.

Liu, Q., Mo, S., Cheung, V. C., Cheung, B. M., Wang, S., Chan, P. P., Malhotra, A., Cheung, R.T. et Chan, R. H. (2020). Classification of runners' performance levels with concurrent prediction of biomechanical parameters using data from inertial measurement units. *Journal of Biomechanics*, 112, 110072.

Louw, Q. et Grimmer, K. (2006). Biomechanical factors associated with the risk of knee injury when landing from a jump. *South African Journal of Sports Medicine*, 18(1), 18-23.

Luo, Z. P., Berglund, L. J. et An, K. N. (1998). Validation of F-Scan pressure sensor system: a technical note. *Journal of rehabilitation research and development*, 35, 186-186.

Matsunaga, N. et Kaneoka, K. (2018). Comparison of modular control during smash shot between advanced and beginner badminton players. *Applied bionics and biomechanics*, 2018.

Markolf, K. L., Mensch, J. S. et Amstutz, H. C. (1976). Stiffness and laxity of the knee--the contributions of the supporting structures. A quantitative in vitro study. *JBJS*, 58(5), 583-594.

McGraw, K. O. et Wong, S. P. (1996). Forming inferences about some intraclass correlation coefficients. *Psychological methods*, 1(1), 30.

McMahon, J. J., Suchomel, T. J., Lake, J. P. et Comfort, P. (2018). Understanding the key phases of the countermovement jump force-time curve. *Strength & Conditioning Journal*, 40(4), 96-106.

McMahon, T. A. et Greene, P. R. (1979). The influence of track compliance on running. *Journal of biomechanics*, 12(12), 893-904.

McNitt-Gray, J. L., Yokoi, T. et Millward, C. (1994). Landing strategies used by gymnasts on different surfaces. *Journal of applied biomechanics*, 10(3), 237-252.

Mikael, A. (2011). *Évaluation des paramètres physiques des bâtiments: amortissement, fréquence et modes de comportement des structures de génie civil: Approche expérimentale* [thèse de doctorat, Grenoble].

Miller, D. I. (2000). Springboard and platform diving. *Biomechanics in sport*, 326.

Miller, D.I. et Munro, C.F. (1984). Body segment contributions to height achieved during the flight of a springboard dive. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 16, 234–242

Miller, D. I. et Sprigings, E. J. (2001). Factors influencing the performance of springboard dives of increasing difficulty. *Journal of Applied Biomechanics*, 17(3), 217-231.

Miller, D. I., Zecevic, A. et Taylor, G. W. (2002). Hurdle preflight in springboard diving: a case of diminishing returns. *Research quarterly for exercise and sport*, 73(2), 134-145.

Mills, S. H. (1998). Indirect measurement of forces on the gymnastics rings. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*.

Mkaouer, B. (2013). *Kinetic and kinematic study of backswing techniques on floor exercises and their impact on back acrobatic series in artistic gymnastics* [thèse de doctorat, Manouba University, Tunisie].

Moritani, T., Oddsson, L. et Thorstensson, A. (1991). Phase-dependent preferential activation of the soleus and gastrocnemius muscles during hopping in humans. *Journal of electromyography and kinesiology*, 1(1), 34-40.

Moritz, C. T. et Farley, C. T. (2005). Human hopping on very soft elastic surfaces: implications for muscle pre-stretch and elastic energy storage in locomotion. *Journal of experimental biology*, 208(5), 939-949.

Mueller, M. J. et Strube, M. J. (1996). Generalizability of in-shoe peak pressure measures using the F-scan system. *Clinical Biomechanics*, 11(3), 159-164.

Mündermann, L., Corazza, S. et Andriacchi, T. P. (2006). The evolution of methods for the capture of human movement leading to markerless motion capture for biomechanical applications. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 3(1), 1-11.

Munro, D. (2014). Injury patterns and rates amongst students at the national institute of circus arts: an observational study. *Medical problems of performing artists*, 29(4), 235-240.

Niespodziński, B., Grad, R., Kochanowicz, A., Mieszkowski, J., Marina, M., Zasada, M. et Kochanowicz, K. (2021). The Neuromuscular Characteristics of Gymnasts' Jumps and Landings at Particular Stages of Sports Training. *Journal of Human Kinetics*, 78, 15.

Nigg, B. M. (1985). Biomechanics, load analysis and sports injuries in the lower extremities. *Sports medicine*, 2(5), 367-379.

Nin, D. Z., Lam, W. K., et Kong, P. W. (2016). Effect of body mass and midsole hardness on kinetic and perceptual variables during basketball landing manoeuvres. *Journal of sports sciences*, 34(8), 756-765.

Padulo, J., Tilocca, A., Powell, D., Granatelli, G., Bianco, A. et Paoli, A. (2013). EMG amplitude of the biceps femoris during jumping compared to landing movements. *Springerplus*, 2(1), 1-7.

Panoutsakopoulos, V., Papaiakevou, G. I., Katsikas, F. S. et Kollias, I. A. (2010). 3D Biomechanical analysis of the preparation of the long jump take-off. *New studies in athletics*, 25(1), 55-68.

Pearsall, D. J., Montgomery, D.L., Rothsching, N. et Turcotte, R.A. (1999) The influence of stick stiffness on the performance of ice hockey slap shots. *Sports engineering*, 2, 3-11.

Pearsall, D. et Robbins, S. (2019). *Design and materials in ice hockey*. Dans *Materials in sports equipment* (pp. 297-322). Woodhead Publishing.

Perahia, M. (2021). *D'autres cirques à Montréal: représentations artistiques d'une pensée queer du monde* [thèse de doctorat, Concordia University].

Pereira, R., Machado, M., Miragaya dos Santos, M., Pereira, L. N. et Sampaio-Jorge, F. (2008). Muscle activation sequence compromises vertical jump performance. *Serb J Sports Sci*, 2(3), 85-90.

Pourghasemi, H. R., Amiri, M., Edalat, M., Ahrari, A. H., Panahi, M., Sadhasivam, N. et Lee, S. (2020a). Assessment of urban infrastructures exposed to flood using susceptibility map and

Google Earth Engine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 1923-1937.

Pourghasemi, H. R., Gayen, A., Lasaponara, R. et Tiefenbacher, J. P. (2020b). Application of learning vector quantization and different machine learning techniques to assessing forest fire influence factors and spatial modelling. *Environmental research*, 184, 109321.

Pourghasemi, H. R. et Rahmati, O. (2018). Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision?. *Catena*, 162, 177-192.

Qian, J., Mao, Y., Tang, X., Li, Z., Wen, C. et Zhang, S. (2020). A Finite Element Model for Estimation of Contact Dynamics During a Jumping Movement on a Trampoline. *Journal of Human Kinetics*, 73, 59.

R Development Core Team A. (2011). *R Foundation for statistical computing*. <http://www.R-project.org>

Roberto Carlos Reyes. (2021, 6 avril). *Teeterboard 101: Saving a dead board!* [vidéo]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=3qIDy\\_y-nA4&ab\\_channel=RobertoCarlosReyes](https://www.youtube.com/watch?v=3qIDy_y-nA4&ab_channel=RobertoCarlosReyes)

Roberts, T. J. et Azizi, E. (2010). The series-elastic shock absorber: tendons attenuate muscle power during eccentric actions. *Journal of Applied Physiology*, 109(2), 396-404.

Roberts, T. J. et Gabaldón, A. M. (2008). Interpreting muscle function from EMG: lessons learned from direct measurements of muscle force. *Integrative and comparative biology*, 48(2), 312-320.

Robertson, P. S. (2020). Man & machine: Adaptive tools for the contemporary performance analyst. *Journal of Sports Sciences*, 1-9.

Rutkowska-Kucharska, A., Szpala, A., Jaroszczuk, S. et Sobera, M. (2018). Muscle coactivation during stability exercises in rhythmic gymnastics: A two-case study. *Applied bionics and biomechanics*, 2018.

Salvendy, G. (2012). *Handbook of human factors and ergonomics* (Ed.). John Wiley & Sons.

Sanders, R. H. et Wilson, B. D. (1988). Factors contributing to maximum height of dives after takeoff from the 3m springboard. *Journal of Applied Biomechanics*, 4(3), 231-259.

Sands, W. A. (2000). Injury prevention in women's gymnastics. *Sports medicine*, 30(5), 359-373.

Sasaki, R. et Urabe, Y. (2012). Differences in onset timing of muscle activities during two types of jumps landings. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*.

Sayyah, M., Yeadon, M. F., Hiley, M. J. et King, M. A. (2016). Factors influencing variation in dive height in 1m springboard diving. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*.

Sayyah, M., King, M. A., Hiley, M. J. et Yeadon, M. R. (2020). Functional variability in the takeoff phase of one metre springboard forward dives. *Human Movement Science*, 72, 102634.

Sell, J. et Kropf, F. (1990). *Propriétés et caractéristiques des essences de bois*. Lignum.

Schmid, M., Beltrami, G., Zambarbieri, D. et Verni, G. (2005). Centre of pressure displacements in trans-femoral amputees during gait. *Gait & posture*, 21(3), 255-262.

Schulte, D. (2009). From springboard to springboard. *Planet Circus*, 13(3), 33-34.

Seegmiller, J. G. et McCaw, S. T. (2003). Ground reaction forces among gymnasts and recreational athletes in drop landings. *Journal of athletic training*, 38(4), 311.

Shan, G. B. (2008). Sport equipment evaluation and optimization—A review of the relationship between Sport Science Research and Engineering. *The Open Sports Sciences Journal*, 1(1).

Sheppard, J. M., Dingley, A. A., Janssen, I., Spratford, W., Chapman, D. W. et Newton, R. U. (2011). The effect of assisted jumping on vertical jump height in high-performance volleyball players. *Journal of science and medicine in sport*, 14(1), 85-89.

Shrier, I., Meeuwisse, W. H., Matheson, G. O., Wingfield, K., Steele, R. J., Prince, F., Hanley, J. et Montanaro, M. (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.

Sinclair, P. J., Walker, C. A. et Rickards, T. (2012). Kinematic determinants of dive height in springboard diving. *Movement Sport Sciences*, (1), 107-112.

- Spiegel, J. B. et Parent, S. N. (2018). Re-approaching community development through the arts: A 'critical mixed methods' study of social circus in Quebec. *Community Development Journal*, 53(4), 600-617.
- Springs, E. J., Stilling, D. S., Watson, L. G. et Dorotich, P. D. (1990). Measurement of the modeling parameters for a Maxiflex "B" springboard. *Journal of Applied Biomechanics*, 6(3), 325-335.
- Stidwill, T. J., Turcotte, R. A., Dixon, P. et Pearsall, D. J. (2009). Force transducer system for measurement of ice hockey skating force. *Sports Engineering*, 12(2), 63-68.
- Sumiya, T., Suzuki, Y., Kasahara, T. et Ogata, H. (1998). Sensing stability and dynamic response of the F-Scan in-shoe sensing system: a technical note. *Journal of rehabilitation research and development*, 35(2), 192.
- Taetz, B., Bleser, G. et Miezal, M. (2016). Towards self-calibrating inertial body motion capture. In 2016 19th International Conference on Information Fusion (FUSION) (pp. 1751-1759). *IEEE*.
- Taborri, J., Keogh, J., Kos, A., Santuz, A., Umek, A., Urbanczyk, C., van der Kruk, E. et Rossi, S. (2020). Sport Biomechanics Applications Using Inertial, Force, and EMG Sensors: A Literature Overview. *Applied bionics and biomechanics*, 2020.
- Tran, T. T., Lundgren, L., Secomb, J., Farley, O. R., Haff, G. G., Newton, R. U., ... et Sheppard, J. M. (2015). Development and evaluation of a drop-and-stick method to assess landing skills in various levels of competitive surfers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(3), 396-400.
- Trapp, F. (2019). *Lectures de cirque contemporain: un modèle d'analyse des représentations circassiennes axé sur des textes et contextes* [thèse de doctorat, Montpellier 3].
- Tsoumis, G. (1991). *Science and technology of wood: structure, properties, utilization* (Vol. 115). New York: Van Nostrand Reinhold.
- Van Hooren, B. et Zolotarjova, J. (2017). The difference between countermovement and squat jump performances: a review of underlying mechanisms with practical applications. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(7), 2011-2020.

van der Worp, H., Vrielink, J. W. et Bredeweg, S. W. (2016). Do runners who suffer injuries have higher vertical ground reaction forces than those who remain injury-free? A systematic review and meta-analysis. *British journal of sports medicine*, 50(8), 450-457.

Vaz, J. R., Olstad, B. H., Cabri, J., Kjendlie, P. L., Pezarat-Correia, P. et Hug, F. (2016). Muscle coordination during breaststroke swimming: comparison between elite swimmers and beginners. *Journal of sports sciences*, 34(20), 1941-1948.

Vicon Motion Systems. (2016). *Plug-in Gait Reference Guide*. Vue à : <https://docs.vicon.com/download/attachments/42696722/Plug-in%20Gait%20Reference%20Guide.pdf?version=1&modificationDate=1502364735000&api=v2>

Vidmar, G. et Novak, P. (2009). Reliability of in-shoe plantar pressure measurements in rheumatoid arthritis patients. *International Journal of Rehabilitation Research*, 32(1), 36-40.

Villaseñor, A., Turcotte, R. A., & Pearsall, D. J. (2006). Recoil effect of the ice hockey stick during a slap shot. *Journal of applied biomechanics*, 22(3), 202-211.

Villaseñor-Herrera, A. (2004). *Recoil effect of the ice hockey stick during a slap shot* [thèse de doctorat, McGill University].

Walsh, M., Boling, M. C., McGrath, M., Blackburn, J. T. et Padua, D. A. (2012). Lower extremity muscle activation and knee flexion during a jump-landing task. *Journal of athletic training*, 47(4), 406-413.

Wanke, E. M., McCormack, M., Koch, F., Wanke, A. et Groneberg, D. A. (2012). Acute injuries in student circus artists with regard to gender specific differences. *Asian journal of sports medicine*, 3(3), 153.

Winter, D. A. (1990). *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley & Sons.

Woo, T., Loh, J., Turcotte, R. et Pearsall, D. (2004). The ice hockey slap shot, elite versus recreational. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*.

Worobets, J. T., Fairbairn, J. C. et Stefanyshyn, D. J. (2006). The influence of shaft stiffness on potential energy and puck speed during wrist and slap shots in ice hockey. *Sports Engineering*, 9(4), 191-200.

Wu, T. C., Pearsall, D., Hodges, A., Turcotte, R., Lefebvre, R., Montgomery, D. et Bateni, H. (2003). The performance of the ice hockey slap and wrist shots: the effects of stick construction and player skill. *Sports engineering*, 6(1), 31-39.

Wu, G., Siegler, S., Allard, P., Kirtley, C., Leardini, A., Rosenbaum, D., Whittle, M., D'Lima, D.D., Cristofolini, L., Witte, H., Schmid, O. et Stokes, I. (2002). ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion--part I: ankle, hip, and spine. *Journal of biomechanics*, 35, 543-548.

Wu, G., van der Helm, F.C., Veeger, H.E., Makhsous, M., Van Roy, P., Anglin, C., Nagels, J., Karduna, A.R., McQuade, K., Wang, X., Werner, F.W. et Buchholz, B. (2005). ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion--Part II: shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of biomechanics*, 38, 981-992.

Xu, D., Lu, J., Baker, J. S., Fekete, G. et Gu, Y. (2021). Temporal kinematic and kinetics differences throughout different landing ways following volleyball spike shots. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*.

Yan, A. F., Sinclair, P. J., Hiller, C., Wegener, C. et Smith, R. M. (2013). Impact attenuation during weight bearing activities in barefoot vs. shod conditions: a systematic review. *Gait & posture*, 38(2), 175-186.

Yeadon, M. R., Kong, P. W. et King, M. A. (2006). Parameter determination for a computer simulation model of a diver and a springboard. *Journal of Applied Biomechanics*, 22(3), 167-176.

Yeow, C. H., Lee, P. V. et Goh, J. C. (2009). Regression relationships of landing height with ground reaction forces, knee flexion angles, angular velocities and joint powers during double-leg landing. *The Knee*, 16(5), 381-386.

Young, W. B., Pryor, J. F. et Wilson, G. J. (1995). Countermovement and drop jump performance. *Journal of strength and conditioning research*, 9(4), 232-236.

Zaggelidis, G. et Lazaridis, S. (2013). Muscle activation profiles of lower extremities in different throwing techniques and in jumping performance in elite and novice greek judo athletes. *Journal of human kinetics*, 37, 63.

Zadpoor, A. A. et Nikooyan, A. A. (2011). The relationship between lower-extremity stress fractures and the ground reaction force: a systematic review. *Clinical biomechanics*, 26(1), 23-28.

Zhang, S. N., Bates, B. T. et Dufek, J. S. (2000). Contributions of lower extremity joints to energy dissipation during landings. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(4) 812–819.

# Annexe 1: copie du questionnaire pour mieux comprendre la discipline

## Définition

La présente définition est posée pour la suite du document :

Planche coréenne (aussi appelé bascule coréenne) : grande planche à bascule sur laquelle deux voltigeurs se propulsent en continue et à tour de rôle, tout en effectuant des acrobaties. (La planche coréenne est à ne pas confondre avec la planche sautoir.)

## Questionnaire :

Quel est votre nom ? .....

CODE ATTRIBUÉ :

Quel est votre âge ?.....

Expérience en planche coréenne :.....

Classez, s'il vous plait, ces critères du plus important à obtenir dans votre performance (ou dans la performance de vos étudiants) au moins important (Notation : si vous accordez une côte de 1, le critère est prioritaire, vous cherchez absolument à atteindre ce critère).

..... Hauteur de saut (augmenter la hauteur de saut)

..... Aptitude à exécuter des rotations (exemple : augmenter le nombre de salto ou le nombre de vrille)

..... Exécuter des mouvements acrobatiques esthétiques

..... Avoir une durée de phase aérienne plus longue

..... Avoir un temps de contact avec la planche plus long

..... Autre : .....

..... Autre : .....

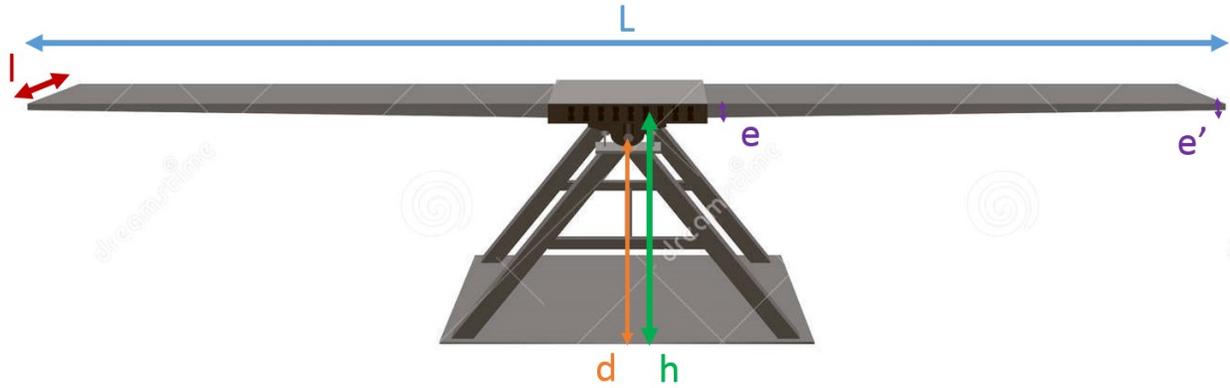
..... Autre : .....

..... Autre : .....

Pouvez-vous expliquer, s'il vous plait, quelle technique vous utilisez (ou vous recommandez) lors de la phase d'impulsion, c'est-à-dire vos derniers appuis sur la planche avant d'être dans les airs ? (Quelle partie de votre corps vous bougez à quel moment, quelle position vous prenez et pourquoi etc)

Pouvez-vous expliquer quelle technique (quel mouvement de corps) vous utilisez (ou vous recommandez) pour « pousser » sur la planche au moment où vous retombez dessus ?

Si vous avez une planche coréenne, pouvez-vous s'il vous plait nous donner les dimensions et autres spécificités de votre montage en remplissant le schéma suivant :



**Figure 25.** – Schéma d’une planche coréenne tiré de <https://www.dreamstime.com/stock-images-circus-teeter-board-acrobatics-vector-illustration-image35939754>

Grande longueur  $L$  : .....

Largeur  $l$  : .....

Épaisseur de la planche  $e$  : .....

Épaisseur de la planche  $e'$  (si épaisseur variable) : .....

Hauteur de la base au milieu de la planche  $h$  : .....

Distance sol-pivot  $d$  : .....

Merci de spécifier les unités !!!

Matériau utilisé pour fabriquer la planche : .....

Si c’est le cas, type de matelas utilisé en dessous de la planche : .....

Hauteur des matelas : .....

Autres informations :

Qu'attendez-vous d'une planche ? Quelles qualités recherchez-vous dans une planche? (ex : souplesse, réaction rapide de la planche etc)

Selon vous, quelle(s) caractéristique(s) est/sont importante(s) dans la planche ? ex : longueur de 2m, largeur, épaisseur, hauteur du pivot, etc?

Vous êtes-vous déjà blessé en pratiquant la planche coréenne ? Si oui, pouvez-vous indiquer le type et la gravité de(s) blessure(s) s'il vous plait ? À combien d'années estimez-vous une carrière en tant qu'acrobate en planche coréenne ?

Est-ce que vous avez été témoin d'un accident de planche ? Avez-vous déjà vu une planche casser ? Si oui, pouvez-vous expliquer les raisons et ce qui s'est passé s'il vous plait.

Autres commentaires pertinents sur la technique acrobatique ou sur la conception de la planche ?