



HAL
open science

Contribution à l'expertise du tir à l'arc olympique

Andrian Kuch

► **To cite this version:**

Andrian Kuch. Contribution à l'expertise du tir à l'arc olympique. Biomécanique [physics.med-ph]. Université de Poitiers, 2022. Français. NNT: 2022POIT2303 . tel-04002608

HAL Id: tel-04002608

<https://theses.hal.science/tel-04002608v1>

Submitted on 23 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS

UFR des sciences fondamentales et appliquées

Pôle Poitevin de Recherche pour l'Ingénieur en Mécanique, Matériaux et Énergétique -
PPRIMME

(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)

École Doctorale : Mathématiques, Informatique, Matériaux, Mécanique, Énergétique -
MIMME

Secteur de recherche : Biomécanique et Bio-Ingénierie

Présentée par

Andrian-Yen KUCH

le 13 Décembre 2022

Titre:

Contribution à l'expertise du tir à l'arc olympique

Directeur de thèse : **Tony MONNET**

Co-directeur de thèse : **Jean-François DEBRIL**

JURY

J-C. GÉMINARD	DR	ENS Lyon	Rapporteur
T. ROBERT	CR	Université Gustave Eiffel	Rapporteur
F. COLLOUD	PU	ENSAM Paris	Examineur
R. TISSERAND	MCF	Université de Poitiers	Examineur
J-F. DEBRIL	IR	CAIPS-CREPS de Poitiers	Examineur
T. MONNET	PU	Université de Poitiers	Examineur

Résumé

Le tir à l'arc olympique est une discipline où la performance dépend d'une multitude de paramètres comprenant le matériel, l'archer et l'environnement. Outre l'influence des conditions extérieures qu'un archer peut juste minimiser, la maîtrise de l'équipement et du geste lui permet d'être précis et répétable, deux qualités indispensables à haut niveau. Le travail réalisé s'articule donc autour du matériel composé d'un arc et de flèches, qui une fois caractérisés, sera suivi par une étude biomécanique sur des archers entraînés.

Pour commencer, les propriétés mécaniques des branches d'arc utilisées par des archers membres du Pôle France de tir à l'arc sont mesurées à l'aide d'un banc d'essai afin d'identifier celles qui sont les plus efficaces et permettent d'emmagasiner le plus d'énergie potentielle. Ensuite, un deuxième banc de mesure permet la caractérisation des futs de flèches. Puis, lorsque les flèches sont assemblées, celles-ci sont tirées à l'aide d'une machine de tir, s'affranchissant ainsi de la variabilité liée à l'humain. L'influence de chacune de propriétés mécaniques des futs sur leur position finale en cible à la distance olympique de 70 mètres a pu alors être étudiée, conduisant à l'amélioration du processus de sélection des futs pour le compte des archers de l'équipe de France.

Enfin, sachant que le lâcher de la corde est une perturbation volontaire de l'équilibre postural établi par les archers pendant la phase de visée, une étude a porté sur le lien entre la performance et les ajustements posturaux anticipés au tir à l'arc. L'existence de tels ajustements a pu être observé aussi bien chez des archers experts membres de l'équipe de France olympique, que chez des archers plus jeunes pensionnaires du Pôle France Relève de Bordeaux, avec des différences néanmoins sur leur instant de déclenchement, témoins de deux stratégies temporelles distinctes.

Cette thèse CIFRE réalisée en lien étroit avec la Fédération Française de tir à l'arc vise alors l'amélioration de la performance des archers élites, en optimisant la sélection de leur matériel, puis à mettre en exergue un mécanisme de contrôle postural précédant le lâcher de corde qui pourrait y contribuer.

Abstract

Olympic archery is a sport that relies on numerous parameters in order to perform, from the material used, to the archer motor control and then the shooting environment. Beside the external conditions that archers can only try to compensate, mastering the equipment and the shooting technique allows precision and repeatability, two undeniable qualities of expert archers. The present work aims to characterize archery material, followed by a biomechanical study on trained archers.

First, the mechanical characteristics of the bow limbs used by French elite archers are measured with an automated testbed in order to identify which are the most efficient in terms of stored elastic potential energy. Secondly, another measuring bench allows to characterise arrow shafts, which assembled with other components were released by a shooting machine, free from human induced variability. The influence of each of the arrows mechanical properties on their final target position at the olympic shooting distance of 70 meters was studied, allowing to improve the arrow shaft selection process for french elite archers.

Finally, a study was conducted on shooting performance and anticipated postural adjustments made in archery, knowing that the bowstring release is a voluntary triggered perturbation to the archer's postural equilibrium established during the aiming phase. Such postural adjustments were displayed by elite archers from the French Olympic Team as well as younger sub-elite archers from the next generation training center in Bordeaux, with slight differences on adjustments timing initiation.

This work, conducted closely with the french archery federation, contributes to improve the performance of archers, by optimising the material selection used, as well as highlights a postural control strategy prior to the bowstring release the could contribute to it.

Remerciements

Par ces quelques paragraphes, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont été impliquées dans ces trois années passées, que ce soit pour l'accomplissement de ce travail ou pour les petits moments à côtés qui m'ont permis de garder le cap.

En premier lieu, mes remerciements vont aux membres du jury pour leur temps consacré cette évaluation. En particulier, Jean-Cristophe Géminard et Thomas Robert qui ont accepté de rapporter ce travail, ainsi que Floren Colloud pour avoir accepté d'en être l'examineur.

De toute évidence, je tiens également à remercier Tony Monnet pour la supervision, l'accompagnement et les conseils avisés, m'ayant permis de réaliser ce travail dans d'excellentes conditions. Merci également à Jean-François Debril pour son expertise toujours pertinente, en plus d'avoir su trouver à tout moment les mots pour valoriser le travail réalisé. Je remercie aussi Romain Tisserand, pour avoir fourni différentes pistes de recherche qui ont été étudiées au cours de ces trois années, ainsi que de m'avoir fait bannir un mot de la langue française¹.

Merci Franck Leplanquais et Sylvie Guerineau-Brion du CRITT Sport Loisirs pour leur disponibilité et sans qui cette thèse n'aurait pas pu voir le jour. Je n'oublie pas bien sûr Philippe Prouet pour son aide précieuse concernant l'utilisation de la caméra-rapide.

J'aimerais également remercier Benoît Binon, Anne Reculet de la FFTA pour avoir initié le projet et cette démarche scientifique, Jean-Michel Tizzoni, Nicolas Riffault et Aurore Trayan pour avoir su répondre à toutes mes questions ayant un lien avec la pratique du tir à l'arc, Rémi Collin pour sa minutie dans le montage des flèches, ainsi que l'ensemble des archers qui ont accepté de participer aux expérimentations.

La machine de tir n'aurait pas été aussi précise sans l'apport des différentes améliorations insufflées par François Durand du CAIPS, et j'en profite pour le remercier pour

1. Mon premier peut faire dire tout et n'importe quoi à des chiffres
Mon deuxième cause la maladie de Lyme

l'organisation des différentes expérimentations, ainsi que les CREPS de Poitiers et de Bordeaux pour les avoir autorisées.

Merci Pierre Laguillaumie pour sa contribution à l'élaboration et à l'amélioration des deux bancs de mesure d'arc et de futs. Ce dernier surtout a été utilisé à bon escient, pour le plus grand bonheur auditif de toute l'équipe.

Les autres collègues de l'équipe RoBioSS passés ou présents, et plus généralement ceux du D3 méritent également ma gratitude pour avoir soi-disant dû supporter mon « terrorisme culinaire ». Pourtant, aussi vrai que « un et un font deux », « un truc bon plus un truc bon ça fait un truc bon ». Toujours est-il que je remercie : Antoine, Arnaud, Aurélie, Bastien, Célestin, Domitille, Erwan, Fanny, François, JB, JP, Kathleen, Kévin, Laëticia, Maëva, Manon, Margot, Marien, Mathias, Mathieu, Pascal, Quentin, Romain, Simon, Thibault et Victoria. Je ne désespère pas de vous convaincre qu'une phalange est une unité de mesure parfaitement valide.

J'ai aussi une pensée émue pour Hélène Dumontet de l'Université Pierre et Marie Curie, dont la rencontre fortuite dans les couloirs de Jussieu a posé les fondations de tout mon parcours universitaire. Que votre âme repose en paix.

Un grand merci à toute l'équipe de Flag et de gossip, pour les bons moments passés pendant les entraînements (même les si nombreux tours de terrains) et pour tous les week-ends de tournois où j'ai pu enfin comprendre le vrai sens de l'expression « faire le canard ». J'en profite surtout pour remercier Coach Titi de m'avoir initié à ce sport.

Pour finir, je remercie chaleureusement ma maman, mon frère et ma famille dans son ensemble pour m'avoir soutenu moralement dans cette aventure, mais surtout pour m'avoir aidé à surmonter les embûches semées par les aléas de la vie.

Aux ksocs et à toutes les formidables raisons d'être heureux,

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Remerciements	v
Table des matières	vii
Liste des figures	xi
Liste des tables	xiii
Introduction générale	1
I Revue de littérature	3
1 Tir à l'arc	3
1.1 Discipline olympique	3
1.1.1 Distance et taille de la cible	3
1.1.2 Format de la compétition	5
1.2 Discipline paralympique	6
2 Matériel	6
2.1 Arc classique - recurve	6
2.1.1 Branches	7
2.1.2 Cordes	9
2.1.3 Clicker	9
2.1.4 Berger bouton	9
2.1.5 Stabilisateurs	10
2.1.6 Viseur	11
2.2 Flèches	11
2.2.1 Fut	11
2.2.1.a Diamètre	11
2.2.1.b Rectitude	12
2.2.1.c Raideur	12
2.2.1.d Masse	14
2.2.2 Pointe	15
2.2.3 Empennage	15
2.2.4 Équilibrage d'une flèche montée	16
2.2.5 Balistique externe	17
2.3 Interaction arc - flèche	18
2.3.1 Paradoxe de l'archer	18
2.3.2 Balistique interne idéale	19
2.4 Cas d'un arc à poulies	21
2.5 Bilan	22

3	Archer	23
3.1	Description de la tâche	23
3.2	Balistique interne	24
3.3	Paramètres déterminants de la performance	25
3.3.1	Psychologie	25
3.3.2	Temporalité	26
3.3.3	Activité musculaire	27
3.3.4	Équilibre postural	28
3.4	Contrôle postural	28
3.4.1	Généralités	28
3.4.2	Modèle simplifié	30
3.4.3	Stratégies d'équilibration	32
3.4.4	Ajustements posturaux anticipés	33
3.4.5	Évolution via la pratique sportive	34
3.5	Bilan	35
4	Précision et répétabilité	36
4.1	Sources d'erreurs	36
4.2	Machine de tir	37
4.3	Bilan	38
5	Conclusion	39
II Matériel		41
1	Introduction	41
2	Caractérisation des arcs	42
2.1	Introduction	42
2.2	Matériel et Méthodes	42
2.2.1	Banc de mesure d'arc	42
2.2.2	Caractéristiques des branches d'arc	44
2.2.3	Paramètres recherchés	44
2.3	Résultats	45
2.3.1	Force à allonge maximale	45
2.3.2	Énergie potentielle élastique	46
2.3.3	Efficiéce	49
2.3.4	Comparaison à allonge minimale	50
2.3.5	Raideur	50
2.4	Bilan	52
3	Caractérisation des futs	53
3.1	Introduction	53
3.2	Matériel et méthodes	53
3.2.1	Banc de mesure des futs	53
3.2.2	Caractérisation d'un fut	54
3.2.3	Futs	55
3.2.4	Critères de tri	55
3.2.5	Modélisation balistique	55
3.3	Résultats	56
3.3.1	Caractéristiques des futs	56
3.3.1.a	Diamètre et rectitude	57
3.3.1.b	Masse et raideur	58

	3.3.2	Dispersion verticale en cible	59
	3.4	Bilan	61
4		Influence des propriétés mécaniques des futs	61
	4.1	Introduction	61
	4.2	Matériel et méthodes	62
	4.2.1	Caractérisations des futs	62
	4.2.2	Flèches	64
	4.2.3	Machine de tir	65
	4.2.4	Statistiques	66
	4.3	Résultats	67
	4.3.1	Caractéristiques des futs	67
	4.3.2	Caractéristiques des flèches montées	68
	4.3.3	Machine de tir	69
	4.3.4	Statistiques	71
	4.4	Limites	74
5		Conclusion	75
III Archer			77
1		Introduction	77
2		Pré-étude - étude de cas et de faisabilité	78
	2.1	Introduction	78
	2.2	Matériel et Méthodes	79
	2.2.1	Sujet	79
	2.2.2	Déroulé expérimental	79
	2.2.3	Équilibre postural	80
	2.2.4	Activations musculaires	82
	2.2.5	Détection temporelle	82
	2.2.5.a	Instants du tir	82
	2.2.5.b	Ajustement postural anticipé	84
	2.3	Résultats	84
	2.3.1	Temps de réaction	84
	2.3.2	Trajectoire du centre de pression	85
	2.3.3	Ajustement postural anticipé	85
	2.3.4	Indicateurs posturaux et musculaires	86
	2.4	Bilan	89
3		Ajustements posturaux anticipés chez des archers entraînés	90
	3.1	Matériel et Méthodes	91
	3.1.1	Sujets	91
	3.1.2	Déroulé expérimental	91
	3.1.3	Équilibre postural	92
	3.1.4	Détection temporelle	93
	3.1.4.a	Instants du tir	93
	3.1.4.b	Ajustement postural anticipé	94
	3.1.5	Position des pieds	94
	3.1.6	Analyse statistique	95
	3.2	Résultats	96
	3.2.1	Phase de visée	96
	3.2.2	Stratégies posturales	97

3.2.2.a	Caractéristiques spatiales	97
3.2.2.b	Caractéristiques temporelles	100
3.2.3	Temps de réaction	102
3.2.4	Scores	102
3.2.5	Positionnement autour de la ligne de tir	103
3.3	Limites	105
4	Conclusion	106
Conclusion générale et perspectives		107
Bibliographie		111
Annexes		128
Annexe A Actes de congrès		129
Annexe B Article scientifique		137
Annexe C Figures		140

Liste des figures

I.1	Dimensions d'une cible de tir à l'arc	4
I.2	Schéma détaillé d'un arc classique	7
I.3	Comparaison de l'énergie potentielle entre arc classique et arc droit	8
I.4	Fenêtre de tir d'un arc classique	10
I.5	composition d'une flèche	11
I.6	Norme de mesure de la raideur d'un fut	12
I.7	Raideur d'un fut en fonction de sa masse	14
I.8	Pointe d'une flèche	15
I.9	Différentes plumes	16
I.10	Illustration du paradoxe de l'archer 1	18
I.11	Illustration du paradoxe de l'archer 2	19
I.12	Balistique interne idéale	20
I.13	Schéma détaillé d'un arc à poulies	21
I.14	Comparaison de la force en fonction de l'allonge entre arc classique et arc à poulies	22
I.15	Séquence de tir	23
I.16	Séquence de tir : balistique interne	25
I.17	Organisation du contrôle postural	29
I.18	Pendule inverse	31
I.19	Sources d'erreurs au tir à l'arc	36
II.1	Banc de mesure d'arc	43
II.2	Schéma mesures des branches	43
II.3	Force en fonction du cycle d'allonge	46
II.4	Énergie potentielle en fonction du cycle d'allonge	47
II.5	Énergie potentielle en fonction de la force de l'arc et de l'allonge	47
II.6	Efficacité en fonction de la force de l'arc et de l'allonge	49
II.7	Comparaison allonge minimale	50
II.8	Profil de raideur des branches	51
II.9	Raideur finale des branches	52
II.10	Banc de mesure des futs	54
II.11	Modèle balistique	56
II.12	Raideur des futs en fonction de leur masse et diamètre mesurés	58
II.13	Dispersion	60
II.14	Régression non linéaire sur le spine	63
II.15	Extremums de raideur	64
II.16	Flèches	65
II.17	Machine de tir	66

II.18 Tirs sur machine	70
II.19 Comparaison dispersion verticale	70
II.20 Corrélogramme	72
II.21 Histogramme des RMSE entre distance mécanique et distance en cible	73
II.22 Fut à fréquence dissimilaire	74
III.1 Techniques d'armement	79
III.2 Schéma pré-étude	80
III.3 Traitement du signal EMG	83
III.4 Temporalité	83
III.5 Trajectoire du centre de pression	85
III.6 Activations musculaires	89
III.7 Photo du dispositif	92
III.8 Schéma étude anticipation	93
III.9 Instants clés du tir	94
III.10 Marqueurs pieds	95
III.11 Déplacement du centre de pression médio-latéral	98
III.12 Caractéristiques spatiales du recul médio-latéral	99
III.13 Positionnement initial vs score	105
C.1 Balistique	141
C.2 Densité spectrale	142
C.3 Signal sinusoïdal du diamètre	143
C.4 Ensemble des tirs réalisés avec la machine	144
C.5 Matrice de corrélations	145
C.6 RMSE entre distance mécanique et distance en cible	146
C.7 Tableau de tri	147

Liste des tables

II.1	Branches mesurées	44
II.2	Caractéristiques des branches : données constructeurs vs utilisation	45
II.3	Comparaison des caractéristiques des branches	48
II.4	Futs mesurés	55
II.5	Énergie et angle initial pour la balistique	57
II.6	Caractéristiques des futs I	57
II.7	Tri littérature	59
II.8	Tri balistique	61
II.9	Caractéristiques des futs II	68
II.10	Flèches montées	68
III.1	Indicateurs posturaux et musculaires	87
III.2	Caractéristiques des archers	91
III.3	Indicateurs pendant la phase de visée	97
III.4	Comparaison des groupes d'archers et des stratégies	103
III.5	Position des pieds	104

Introduction générale

Le travail présenté dans ce manuscrit est le fruit d'une collaboration entre différents acteurs issus du monde de la recherche, d'un centre de ressource technologique et du milieu associatif sportif. Pour commencer, l'Institut Pprime (Pôle Poitevin de Recherche pour l'Ingénieur en Mécanique, Matériaux et Énergétique) et plus particulièrement la composante biomécanique de l'équipe RoBioSS (Robotique, Biomécanique, Sport, Santé), s'intéresse à la mesure, la compréhension, la modélisation, la reproduction et l'amélioration de performances motrices chez l'être humain, y compris les sportifs de haut-niveau. Les disciplines sportives ayant déjà été étudiées au sein de l'équipe sont diverses et variées, incluant gymnastique, cyclisme, aviron, kayak, natation, tennis, golf, basket, patinage artistique et bien d'autres disciplines encore.

Le CRITT Sport Loisirs (Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie) quant à lui a pour vocation, entre autres, la réalisation de tests d'essais de matériaux et de matériels pour le compte d'industriels, s'assurant qu'ils soient conformes aux normes en vigueur avant leur mise sur le marché. Les équipements certifiés sont utilisés par tout un chacun au quotidien, qu'ils soient destinés à un usage industriel ou sportif (casques, protections...), ou à des fins de mobilité (vélos, trottinettes...).

La Fédération Française de Tir à l'Arc, a commencé à collaborer avec le CAIPS (Centre d'Analyse d'Images et Performance Sportive) en 2014 sur des pistes d'améliorations possibles dans la performances des archers. Après l'obtention d'une médaille d'argent par Jean-Charles Valladont aux Jeux Olympiques de Rio en 2016, elle a été alors l'instigatrice de différents projets visant à continuer sur cette lancée pour les olympiades suivantes. Cette initiative a été accompagnée par le CAIPS (Centre d'Analyse d'Images et Performance Sportive) regroupant le CREPS de Poitiers (Centre de Ressources, d'Expertise et de Performance Sportive), le CRITT Sport Loisirs et la composante robotique de l'équipe RoBioSS, aboutissant au développement de deux automates, permettant l'obtention de caractéristiques mécaniques des branches d'arc et des futs de flèches. Dans le même temps, l'attribution des Jeux Olympiques de Paris a été à la genèse du programme Sciences²⁰²⁴, dont la première thèse soutenue a consacré une très grande partie à l'identification d'optimums au tir à l'arc, à la fois sur la force de l'arc et sur l'empennage des flèches (MADDALENA 2020).

Les études réalisées pendant ces trois ans de thèse CIFRE s'inscrivent dans la continuité de la démarche initiée au niveau fédéral, pour tenter de grappiller des gains marginaux partout où ils existent. Cette discipline requiert une précision et une répétabilité à toute épreuve si on souhaite planter des flèches dans un cercle de seulement 12,2 centimètres de diamètre situé à 70 mètres. Le rapport entre ces deux dimensions indique

une tolérance de visée inférieure à 0,1 degré seulement entre une flèche valant 10 points et une valant 9 points. Dans cette course aux médailles entre nations, chaque millimètre compte. Il ne s'agit alors nullement de remettre en cause les compétences et l'expérience des entraîneurs ou des archers dans la pratique de leur discipline, mais de compléter leur approche intuitive avec des critères objectifs de mesure du matériel et du mouvement humain.

Alors que le tir à l'arc est une discipline ancienne remontant à des dizaines de milliers d'années (HEATH 1973) et qu'elle est de plus en plus pratiquée (TAYLOR 2015), la recherche de la performance dans ce domaine reste assez peu explorée. Dans une revue systématique publiée récemment (VENDRAME et al. 2022), sur les 25 dernières années, seulement 184 articles ont traité ce sujet avec une approche expérimentale ou théorique sur le matériel, la biomécanique et la psychologie chez les archers.

Le travail présenté dans ce manuscrit s'intéressera principalement à l'épreuve olympique du tir à l'arc dans laquelle seuls les arcs classiques sont utilisés. Néanmoins, pour les arcs à poulies, autorisés dans les épreuves paralympiques, leurs similarités avec les arcs classiques font que des passerelles peuvent être réalisées aussi bien du côté du matériel que du contrôle de la posture.

Pour débiter, le chapitre I présente une revue de la littérature appropriée sur la thématique du tir à l'arc et du contrôle postural, permettant de saisir la complexité de ce sport dont la performance repose sur une multitude de paramètres matériels, humains et environnementaux.

Ensuite, sont abordés les deux grands axes de travail qui ont été menés. Le premier a porté sur l'étude du matériel utilisé par les archers pensionnaires du Pôle France de Tir à l'Arc hébergé à l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance. Cette partie cherche à apporter des éléments de réponse sur des questionnements que peuvent avoir les entraîneurs et les archers sur la qualité du matériel qu'ils utilisent, à la fois sur l'arc et sur les flèches. L'influence des caractéristiques mécaniques des branches, des futs, du montage de la flèche sur la performance seront étudiées dans le chapitre II afin d'améliorer le processus de sélection.

Une fois que le matériel a été optimisé, dans des conditions environnementales favorables, la variabilité restante dans la performance sera causée par l'archer uniquement. Le chapitre III s'intéresse à deux populations d'archers : des membres du collectif olympique français et des pensionnaires du Pôle France Relève de tir à l'arc localisé au sein du CREPS de Bordeaux. Leurs stratégies de contrôle postural seront analysées pendant la phase de visée et la phase de tir pour mettre en évidence des ajustements posturaux anticipés avant le lâcher de la corde.

Je m'excuse par avance de l'utilisation d'unités de mesures impériales dont ce sport regorge. Leurs occurrences ont été limitées au strict minimum dans ce manuscrit, uniquement pour faciliter la lecture des pratiquants de la discipline.

Chapitre I

Revue de littérature

1 Tir à l'arc

Le tir à l'arc peut se décliner sous de multiples formes avec un objectif commun : atteindre une cible donnée en se servant d'un arc et d'une flèche. Cette discipline peut se pratiquer n'importe où, à des distances variables et avec des arcs qui peuvent être classique (recurve), long, traditionnel (KOOI 1991), ou encore à poulies (SUNG et al. 2018). En dehors de la chasse, sa dimension compétitive à l'international est chapeauté par la Fédération Internationale de Tir à l'Arc et au niveau national par la Fédération Française de Tir à l'Arc.

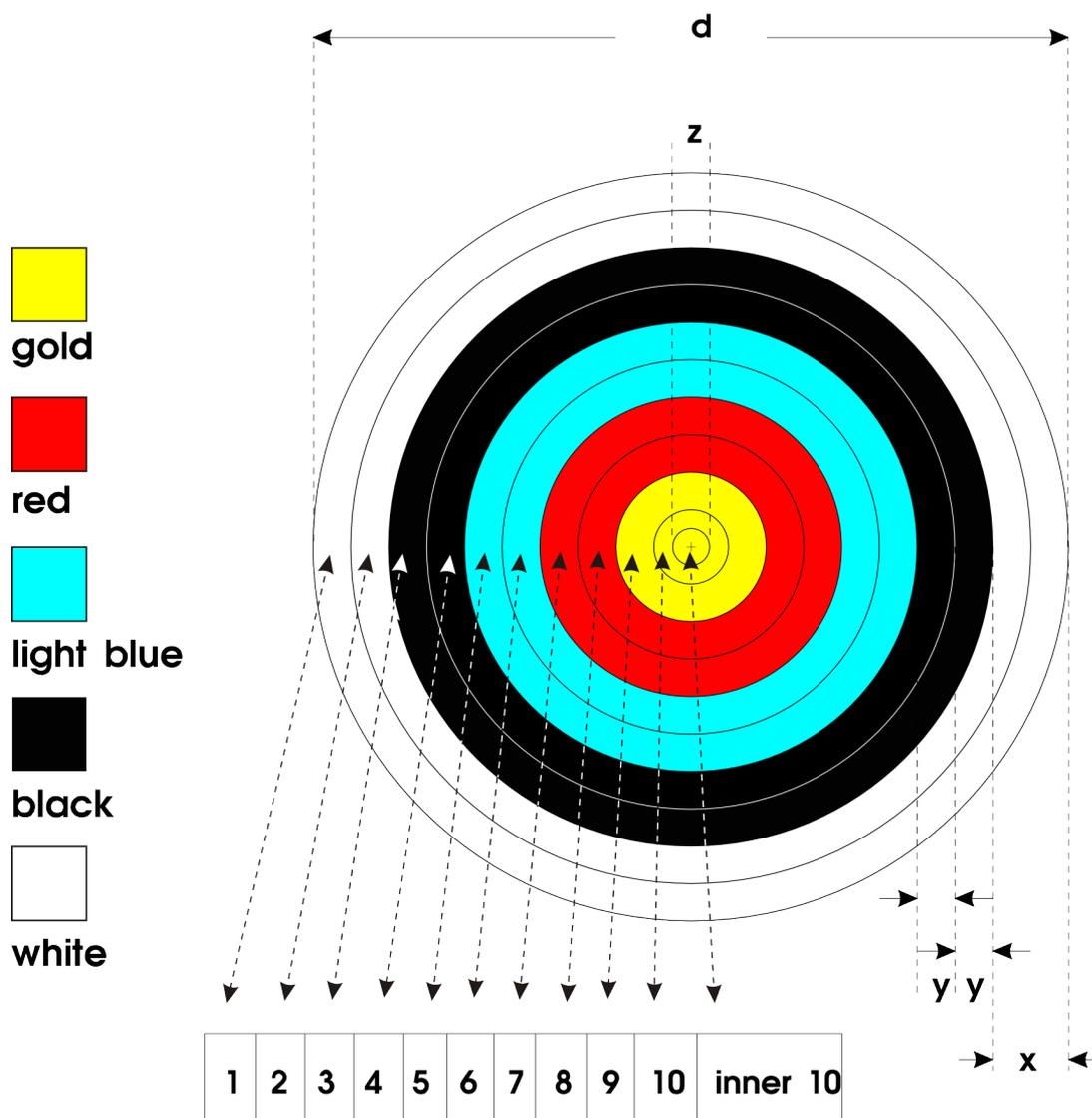
Parmi les épreuves proposées, on distingue les tirs en salle ou en extérieur. En intérieur, la distance de tir est généralement de 18 mètres (FITA 2021), sur des blasons dits tri-spots comportant trois cibles de 40 centimètres de diamètre (Figure I.1). Cette discipline est surtout pratiquée en début de saison sportive lorsque la météo n'est pas propice à la pratique en extérieur. En plein air, la distance de tir usuelle est de 70 mètres pour les arcs classiques et 50 mètres pour les arcs à poulies (FITA 2021), sur des blasons de 122 centimètres et 80 centimètres de diamètre respectivement (Figure I.1). Il existe aussi le tir en campagne, 3D, nature, qui se passent également en plein air sur des terrains divers, parfois vallonnés, avec des cibles classiques ou sur des animaux en mousse. Le run archery allie, à l'image du biathlon, course à pied et tir à l'arc².

1.1 Discipline olympique

1.1.1 Distance et taille de la cible

Aux Jeux Olympiques, le tir à l'arc est réservé exclusivement aux arcs classiques et consiste à tirer en extérieur sur une cible située à une distance de $70 \pm 0,3$ mètres. Le centre de cette dernière doit être situé à une hauteur de 130 ± 5 centimètres du sol et avoir une inclinaison comprise entre 10 et 15 degrés par rapport à la verticale (FITA 2021). La cible utilisée à cette distance possède un diamètre de 122 centimètres (Figure I.1), divisé en dix cercles concentriques avec des scores associés allant de 1 à 10 points. Le diamètre

2. <https://www.ffta.fr/pratiquer/disciplines-officielles-et-nouvelles-pratiques> (Accès mars 2022)



d	x	y	z
diameter of face	color zone	scoring zone	diameter of inner 10
122 cm	12.2 cm	6.1 cm	6.1 cm
80 cm	8 cm	4 cm	4 cm
60 cm	6 cm	3 cm	3 cm
40 cm	4 cm	2 cm	2 cm

FIGURE I.1 – Cible utilisée en tir à l’arc (FITA 2021). Aux Jeux Olympiques, le diamètre de toute la cible mesure 122 centimètres, le cercle qui permet de marquer 10 points mesure 12,2 centimètres. Les autres tailles de diamètres correspondent à des cibles utilisées pour d’autres distances (en intérieur arc classique, 40 centimètres pour 18 mètres et 60 centimètres pour 25 mètres), ou discipline (80 centimètres pour extérieur arc à poulies)

du « 10 » mesure 12,2 centimètres, puis chaque cercle possède un diamètre augmentant par incrément de 12,2 centimètres. En complément, un cercle supplémentaire appelé « X » est tracé à l'intérieur du « 10 », d'un diamètre de 6,1 centimètres, rapportant également 10 points pour une flèche atteignant cette zone. Le nombre de flèches marquées « X » peut servir comme critère de départage entre des archers en cas d'une égalité de score. Dans une situation où une flèche est à cheval sur une ligne de démarcation entre deux zones, elle fait un « cordon », le score plus élevé est alors retenu.

1.1.2 Format de la compétition

Présente en tant que discipline aux Jeux Olympiques seulement quatre fois entre 1896 et 1972, le tir à l'arc est depuis ceux de Munich en 1972, partie prenante de toutes les olympiades. Le format de la compétition a connu divers ajustements depuis pour rendre la discipline plus attrayante en intégrant le concept de face à face entre nations ou archers, avec notamment l'ajout des rencontres par équipes aux JO de Séoul en 1988 puis des matchs à élimination directe aux JO de Barcelone en 1992 (CHOI et al. 2016).

Lors des derniers Jeux Olympiques à Tokyo en 2020, cinq titres olympiques au total ont été décernés pour le tir à l'arc dans les épreuves suivantes : individuel homme et femme, tir par équipe homme et femme, ainsi que le tir par équipe mixte qui faisait sa première apparition olympique. Trois archers d'un même genre et d'une même nation composent une équipe tandis qu'un archer et une archère appartenant à une même nation forment une équipe mixte. 128 archers au total peuvent participer à cette compétition quadriennale, moyennant une performance suffisante lors de compétitions continentales et internationales dans les deux ans qui précèdent la grande messe du sport. C'est ainsi, qu'au Japon, la France était représentée par trois archers et une archère.

La compétition débute par une phase de qualification où les 64 archers et archères qualifiés tirent chacun 12 volées de 6 flèches pour un total de 72 flèches (J. L. PARK 2016). Le total des points d'un archer et le cumul des points qu'obtient une équipe permet d'établir le tableau de la phase éliminatoire à la fois pour les compétitions individuelles et par équipe. Lors des phases éliminatoires, les archers ou équipes s'affrontent dans des matchs à élimination directe, sous format de sets, jusqu'à la désignation du vainqueur. Le tableau étant établi en fonction du classement de la phase de qualification, il est important de bien se positionner dès celle-ci pour augmenter ses chances d'aller le plus loin possible dans la compétition en ayant un parcours plus favorable (J. L. PARK 2016).

Pendant un match individuel, les archers qui s'affrontent ont une contrainte temporelle de 20 secondes pour tirer une flèche, chacun leur tour en alternance, trois fois au sein d'un set. Celui ou celle qui totalise le plus de points remporte le set et récolte deux points de set. En cas de dépassement du temps imparti, un score de « 0 » sera attribué pour la flèche en question. S'il y a égalité, les archers se partagent le set et marquent un point de set chacun. Le premier archer à atteindre six points de set remporte le match et accède au tour suivant. En cas d'égalité, à cinq points de set partout, une flèche de barrage désigne le vainqueur du match. Dans ce cas de figure, les archers sont départagés par une flèche unique : celle qui est la plus proche du centre permet de gagner la rencontre. Entre 2013 à 2019, sur les compétitions de niveau mondial (coupe du monde et Jeux Olympiques),

ce sont en moyenne par an environ 110 affrontements par an qui se sont décidés sur une seule flèche de barrage, dont 3 finales, 7 demi-finales et 14 quarts de finales (BUCCIOL et al. 2020).

Lors des matchs par équipe homme ou femme, chaque nation dispose de six flèches par set, soit deux par archers. Chaque équipe a un temps total de 120 secondes pour tirer l'ensemble des flèches, sans contrainte de temps au niveau de chaque archer. Les trois archers d'une même nation tirent chacun leur tour une flèche, puis c'est au tour de l'autre équipe. Cet enchaînement se répète une seconde fois, permettant de conclure un set. L'équipe qui possède le meilleur total de point remporte le set et les deux points qui vont avec. En équipe, cinq points de sets suffisent à remporter la rencontre. S'il y a égalité, une volée de départage est tirée avec une flèche par archer. L'équipe qui a le total le plus élevé ou la flèche la plus proche du centre en cas d'égalité gagne le match. Pour les rencontres par équipe mixte, le principe est le même, mais avec un total de quatre flèches par équipe par set et 80 secondes pour les tirer.

1.2 Discipline paralympique

Si l'arc à poulies n'est pas utilisé lors des Jeux Olympiques, il est cependant présent pour les épreuves Paralympiques en compagnie de l'arc recurve. Deux catégories existent pour ces épreuves de tir à l'arc : open et W1. Dans la catégorie open, les athlètes qui concourent ont une déficience, dans les membres supérieurs ou inférieurs. Au sein de la catégorie open, on distingue la compétition open arc classique et open arc à poulies en fonction de l'arc utilisé par l'archer. En open arc classique, la distance et la cible sont les mêmes que pour les valides, c'est-à-dire 70 mètres sur une cible de 122 centimètres de diamètre. En revanche, pour la partie open arc à poulies, la distance de tir est de 50 mètres, sur une cible de 80 centimètres de diamètre (Figure I.1). Dans la catégorie W1, les archers ont des déficiences à la fois dans les membres supérieurs et inférieurs. En W1, les arcs classiques et à poulies concourent ensemble sur une distance de 50 mètres et une cible de 80 centimètres de diamètre.

2 Matériel

Après avoir présenté les généralités sur la discipline olympique et paralympique, nous allons maintenant nous intéresser à la caractérisation des propriétés physiques du matériel utilisé dans ces épreuves : les arcs, les flèches et les enjeux liés à leur interaction.

2.1 Arc classique - recurve

L'arc a existé sous une multitude de combinaisons de tailles, formes et matériaux au cours de l'histoire (KOOI 2019). Aujourd'hui, seul l'arc classique recurve est utilisé aux Jeux Olympiques (Figure I.2).

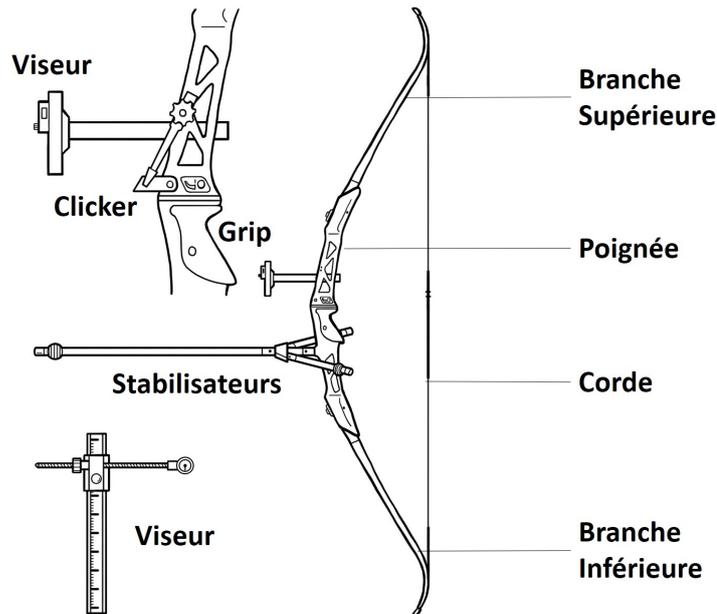


FIGURE I.2 – Dessin détaillé d'un arc classique moderne (EMMET 2014).

L'arc classique recurve moderne utilisé est composé de plusieurs parties qui sont facilement démontables et interchangeables. La masse totale d'un arc monté avec l'ensemble des accessoires est variable d'un archer à un autre, en fonction des éléments qu'ils incluent pour leur configuration. Elle se situe en général aux alentours de 2,5 kilogrammes. Le centre névralgique d'un arc correspond à la poignée, faite soit en carbone, soit en alliage d'aluminium, avec une masse excédant rarement 1,5 kilogramme (KOOI 2019). Sur cette poignée vient s'insérer les autres composants, parmi lesquels le grip qui permet à l'archer de maintenir l'arc. Au-dessus et en dessous de la poignée se trouvent les branches supérieures et inférieures composées de carbone ou de bois/carbone, d'une masse d'environ 0,3 kilogramme pour la paire (TUIJN et al. 1992). Les branches sont également une partie importante de l'arc, car c'est à cet endroit que l'énergie potentielle élastique est stockée pendant la phase d'armement. Cette énergie sera ensuite transmise à la flèche lors du lâcher de corde avec une perte d'énergie estimée à 10% sur les arcs récents (LIEU et al. 2011) contre jusqu'à 25% il y a 30 ans (TUIJN et al. 1992). Les archers choisissent la taille et la raideur des branches qu'ils utilisent en fonction de leur capacité physique. En moyenne, chez les hommes, la force nécessaire pour armer l'arc est autour de 220 newtons contre aux alentours de 180 newtons chez les femmes.

2.1.1 Branches

Le terme recurve désigne en fait la forme incurvée de l'extrémité des branches qui dérive de centaines d'années d'évolution dans la fabrication de cette arme par essai-erreur avant d'aboutir à la forme présentement utilisée pour les arcs de compétition (KOOI 1991). Cette incurvation permet d'augmenter l'énergie potentielle des branches à allonge égale (Figure I.3), en étant plus efficace et en ayant par conséquent une flèche plus rapide en sortie d'arc (DENNY 2011). Plusieurs écoles existent concernant la force de l'arc. Certains estiment qu'en réduisant celle-ci, la perturbation causée par le départ de la flèche

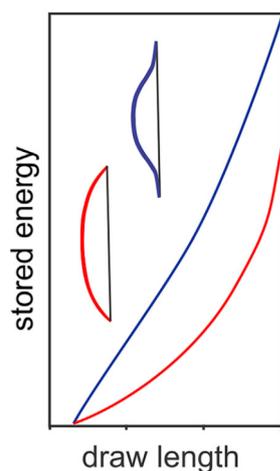


FIGURE I.3 – Énergie potentielle en fonction de l'allonge entre arc recurve en bleu et arc droit en rouge (HARRIS et al. 2021).

sera plus faible, assurant une meilleure stabilité posturale à l'archer (K. LEE et al. 2009). D'autres en revanche estiment que réduire le temps de vol de la flèche en augmentant sa vitesse permet de réduire les perturbations causées par les éléments extérieurs, comme le vent, non contrôlables par les archers. En particulier, certains ont identifié l'augmentation de la force de l'arc comme paramètre parmi ceux permettant de prédire la performance (SPRATFORD et al. 2017), notamment grâce à la compensation d'éventuelles erreurs liées au lâcher de corde (MADDALENA 2020).

Dans le commerce, les branches sont vendues à l'aide de deux critères, leur taille et la force nécessaire pour armer. La force de l'arc commercialisée est mesurée de façon normée (ARCHERY TRADE ASSOCIATION 2009) pour une allonge standardisée de 71,1 centimètres (28 pouces³). Les archers optent pour une taille et une force des branches en fonction de leur morphologie et de leur capacité physique. La taille des branches est choisie en fonction de l'allonge de l'archer liée aux longueurs segmentaires de leurs membres supérieurs. Ensuite, le deuxième choix que fait l'archer pour la sélection des branches porte sur la force de l'arc, paramètre qui est dépendant de leur propre capacité physique. La raideur des branches fournies par les industriels sera donc fonction de la taille et de la force désirée par les archers. Les branches d'arc sont légèrement asymétriques (ZANEVSKYY 2006), ce qui implique d'avoir un réglage supplémentaire appelé « tiller ». Ce réglage permet de gérer leur inclinaison et assurer un fonctionnement synchrone lors de la restitution de l'énergie potentielle élastique.

Par la diversité morphologique des êtres humains, l'allonge pour bander l'arc sera différente entre chaque archer et également différente de l'allonge standard de la norme de mesure. Par conséquent, la force qui leur est nécessaire pour bander l'arc diffère entre eux et avec celle indiquée par le fabricant. Mais plus que cette force, il s'agit plutôt de l'énergie potentielle élastique qui est emmagasinée lors de la phase d'armement qui conditionne la vitesse initiale de la flèche lorsqu'elle est projetée. Les entraîneurs et les archers questionnent régulièrement la qualité du matériel qu'ils utilisent et s'interrogent sur la force ou l'énergie qui résulte de l'usage spécifique de chacun des archers. Il paraît alors né-

3. 1 pouce = 2,54 cm

cessaire d'établir un comparatif entre les différentes branches qui existent sur le marché pour déterminer celles qui seraient plus avantageuses. Pour y parvenir, un banc de mesure d'arc a été développé par le CREPS de Poitiers et l'Institut Pprime. Cet automate permet la mesure de la force de l'arc en fonction de l'allonge et sera présenté ultérieurement dans la section II.2.2.1.

2.1.2 Cordes

Les branches sont reliées l'une à l'autre par l'intermédiaire d'une corde tressée (Figure I.2), formée d'une dizaine de brins et pesant aux alentours de six grammes (KOOI 2019). La matière utilisée le plus aujourd'hui est la fibre de polyéthylène (Fast Flight), plus légère et plus efficace que le Dacron ou le Kevlar utilisés auparavant (KOOI 2019). Il est conseillé d'avoir un plus grand nombre de brins pour les arcs nécessitant plus de force pour une grande durabilité dans l'utilisation. Il a été par ailleurs démontré que le nombre de brins n'a pas une influence notable sur la vitesse de sortie de la flèche (KOOI 2019). Sur cette corde, se trouve le point d'encoche qui permet d'avoir un positionnement répétable de la flèche sur l'arc lors de chaque tir. La hauteur de ce point est déterminée par une équerre conçue pour l'occasion de manière à avoir un angle droit entre la corde à vide et la flèche lorsque celle-ci est positionnée sur le repose-flèche (Figure I.4).

2.1.3 Clicker

Pour permettre à l'archer d'avoir une allonge répétable et donc une énergie potentielle élastique similaire lors de chaque tir (LEPERS et al. 2020), une petite aide métallique appelée clicker est utilisée. Sans cette aide, il a été démontré que les archers experts se différencient des archers moins bons en partie grâce à leur capacité à avoir une excellente répétabilité sur la vitesse de la flèche en sortie d'arc, conséquence d'une allonge répétable (CLARYS et al. 1990). Cet objet est monté sur la poignée de l'arc, dans la fenêtre de l'arc au-dessus du grip (Figure I.4 gauche). Au début de chaque séquence de tir, la flèche est positionnée au-dessus du repose flèche et entre d'un côté le clicker et de l'autre le Berger bouton (Figure I.4 droite). Lorsque l'archer tend la corde, la flèche recule jusqu'à dépasser le clicker. On dit alors que le clicker « tombe » exactement lorsque l'allonge de l'archer est atteinte. Un son métallique caractéristique est produit lorsque le clicker touche la poignée, c'est suite à cet événement que la corde est lâchée par l'archer (CALLAWAY et al. 2017), après un temps de réaction au son qui est produit (ERTAN, KENTEL, S. Turgut TÜMER et al. 2005 ; SOYLU et al. 2006 ; KIM et al. 2015 ; SPRATFORD et al. 2017).

2.1.4 Berger bouton

Le Berger bouton, aussi appelé plunger, est un ressort de compression monté, également monté sur la poignée de l'arc (Figure I.4). Au contact de la flèche avant la tombée du clicker et dans les 10 premières millisecondes suivant le lâcher de la corde (J. L. PARK 2013), cet outil permet à la flèche de sortir plus facilement de l'arc en évitant tout contact néfaste entre une de ses parties et la poignée qui perturberait son vol. Deux paramètres



FIGURE I.4 – Gauche : fenêtre d’arc classique, configuration sans flèche, droite : configuration avec flèche, (LIEU et al. 2011).

sont modifiables sur le ressort, la raideur et la protrusion, qui lorsqu’ils sont correctement réglés en fonction de la raideur de la flèche, permettent de corriger la rotation initiale de la flèche (MADDALENA 2020). Pour un droitier, une raideur trop élevée du Berger bouton éjectera la flèche vers la gauche de la cible, et inversement pour une raideur pas assez élevée (LIEU et al. 2011).

2.1.5 Stabilisateurs

Les stabilisateurs permettent aux archers d’avoir un meilleur contrôle de leur arc avant, pendant et après le tir de deux façons différentes : réduire les vibrations liées au départ de la flèche et augmenter l’inertie de l’arc (ZANEVSKYY 2007). À haut niveau, il est composé d’une barre centrale en avant de l’arc, associée à deux barres latérales plus courtes (Figure I.2) au moyen d’un objet appelé V-bar vissé sur la poignée (ELLISON 2000). Pour un arc recurve moyen nécessitant une force de 200 newtons pour armer, l’accélération d’une flèche de 20 grammes est d’environ 12500 m/s^2 (LISTON 1991). Cela induit une énergie cinétique produite lors du recul de l’arc après le lâcher estimée à environ 0,2 joule et une vitesse de recul de la poignée mesurée allant jusqu’à 250 mm/s (MEYER 2015). L’énergie cinétique de la poignée pendant ce recul serait jusqu’à 80% plus importante sans système de stabilisation (ZANEVSKYY 2012).

Augmenter l’inertie de l’arc permet de limiter les mouvements parasites. Cela est possible grâce au long stabilisateur central qui limite la rotation de l’arc le long de l’axe vertical, tandis que les barres latérales permettent surtout de compenser le stabilisateur central en ramenant la position du centre de gravité de l’arc vers la poignée. Selon les entraîneurs et les archers du Pôle France, le centre de gravité de l’arc entier doit être situé à l’avant de la poignée pour permettre à cet ensemble de basculer vers l’avant après un tir. L’ensemble du système de stabilisation pèse environ 0,5 kilogramme et des petites masses complémentaires peuvent être rajoutées aux extrémités de chaque élément stabilisateur pour pouvoir ajuster plus finement la position du centre de gravité de l’arc. Une modélisation de l’ensemble arc-stabilisateur a déterminé un optimum dans le positionnement des stabilisateurs latéraux : dans le même plan que le stabilisateur central et avec un écartement maximal (ZANEVSKYY 2012).

2.1.6 Viseur

La visée pour les arcs classiques se fait au moyen d'un seul viseur (Figure I.2), sans aide visuelle de type agrandissement, déporté en avant de la poignée servant de point de référence et dont la position dans l'espace est facilement réglable entre chaque volée si besoin. Des méthodes d'optimisation du processus de réglage du viseur en compétition ont été proposées (J. L. PARK 2022), privilégiant des corrections franches dès la fin de la première volée suivies d'ajustements plus fins pour des pertes minimales de points. Il est composé avec des parties en carbone ou en aluminium, d'une masse avoisinant 0,2 kilogramme. L'archer aligne son œil directeur avec le viseur et le centre de la cible. L'utilisation d'un viseur comme intermédiaire entre l'œil et la cible permet d'améliorer la précision du tir tout en retirant l'avantage que possèdent les archers ayant l'œil dominant du même côté que leur latéralité (LABORDE et al. 2009).

2.2 Flèches

Le second objet spécifique au tir à l'arc et non moins important est la flèche dont une représentation sur la Figure I.5 montre ses quatre parties principales. Le corps de la flèche, aussi appelé fut, est composé d'un tube creux en aluminium, enrobé d'une couche de carbone pour les tirs en extérieurs et entièrement en aluminium pour les tirs en salle (J. L. PARK 2013; J. L. PARK 2021a). Les paramètres fournis par les fabricant qui permettent de caractériser les tubes sont leur diamètre, leur raideur, leur masse et leur rectitude. La stabilisation de la flèche en vol se fait grâce à la pointe, située à l'avant, et à l'empennage placé à l'arrière. L'encoche quant à elle permet de maintenir la flèche sur la corde pendant la phase de visée et de poussée.

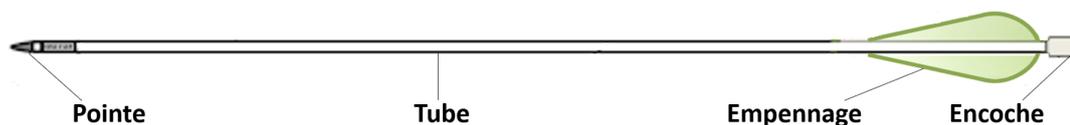


FIGURE I.5 – Flèche de compétition et ses différentes parties (JEONG et al. 2013)

2.2.1 Fut

2.2.1.a Diamètre

Le diamètre des futs diffère selon les distances de tir. Pour les compétitions longues distance en extérieur, il se situe aux alentours de 5 millimètres, contre environ 9 millimètres pour les compétitions en salle. Cette différence s'explique par un compromis entre l'avantage que procure un plus grand diamètre de tube concernant les scores pour les flèches dites « cordons », et la traînée plus grande pendant la phase balistique qui résulterait d'un diamètre plus grand et ralentirait la flèche en vol (J. L. PARK 2011b).

2.2.1.b Rectitude

La rectitude d'une flèche représente l'homogénéité de son diamètre autour de son axe longitudinal (ARCHERY TRADE ASSOCIATION 2009). Pour la mesurer, il est préconisé par ARCHERY TRADE ASSOCIATION 2009 d'utiliser soit un laser optique, soit un palpeur, pointant le milieu d'un fut, puis de faire tourner le fut sur lui-même. La tolérance de rectitude pour des flèches X10 de Easton est de 0,025 millimètre (0,001 pouce). Ce paramètre influence grandement le comportement de la flèche lors d'un tir, dès la poussée exercée par la corde puis pendant la phase balistique (J. L. PARK, AITCHISON et al. 2018). Sur des tirs réalisés à 25 mètres, il a été noté que des flèches qui ne respectaient pas ces tolérances dispersaient plus en cible que des flèches plus droites (J. L. PARK, AITCHISON et al. 2018). Dans la même étude, la dispersion de ces mêmes flèches augmentait avec la distance de tir, par conséquent, il est très probable qu'elle s'amplifierait avec des tirs à la distance olympique de 70 mètres.

2.2.1.c Raideur

La raideur caractérise la propriété fondamentale des flèches qui lui permet d'osciller dès la sortie de l'arc (KOOI 1998) et d'atteindre la cible. Au tir à l'arc, le terme utilisé pour caractériser la raideur d'un fut est appelé 'spine'. Ce paramètre est défini de façon normée (ARCHERY TRADE ASSOCIATION 2009) par un test de flexion en 3 points (Figure I.6) sur des tubes nus non montés.

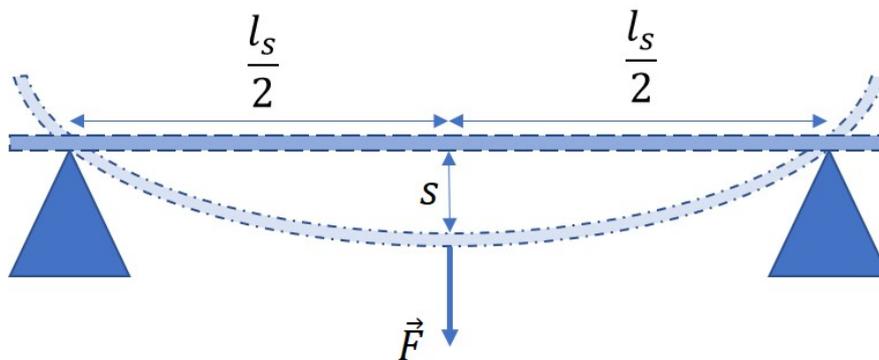


FIGURE I.6 – Norme de mesure de la raideur (spine) d'un fut

Soit un tube d'une longueur l posé sur deux appuis simples parallèles séparés par une distance l_s , le spine s désigne, dans le milieu du tir à l'arc, en millipouces la flexion du fut pour une force ponctuelle \vec{F} appliquée en son milieu. Deux distances l_s sont utilisées 71,1 centimètres (28 pouces⁴) pour des tubes d'une longueur supérieure à 73,7 centimètres (29 pouces) et 58,4 centimètres (23 pouces) pour des tubes plus courts. La force \vec{F} est appliquée au moyen d'un poids étalon d'une masse de 0,88 kilogramme (1,94 livre⁵), soit 8,6 N. Pour des petites déformations, on a une relation entre la quantité EI , permettant de caractériser la raideur en physique des matériaux et le spine s :

4. 1 pouce = 2,54 cm

5. 1 lb = 0,45 kg

$$s = \frac{Fl_s^3}{48EI} \quad (\text{I.1})$$

avec E le module de Young du matériau et I le moment quadratique. En assimilant un fut de flèche à une poutre creuse de section constante, de diamètre extérieur d_f et intérieur d_i , on a :

$$I = \frac{\pi}{64}(d_f^4 - d_i^4) \quad (\text{I.2})$$

Chez les archers français, les seuls tubes utilisés sont les tubes X10 de la marque Easton (Salt Lake City, États-Unis). Différentes catégories de spine existent et sont choisies par les archers en fonction de la force de leur arc : plus elle sera élevée, plus les flèches doivent être raides, et inversement (KOOI 1998; ZANEVSKYY 2001; LIEU et al. 2011; LEPERS et al. 2020). Les catégories usuelles de spine vont de 350 pour les flèches plus raides à 650, voire plus pour les flèches les plus souples (J. L. PARK 2021a). Avec ces valeurs caractéristiques, en prenant un fut ayant pour diamètre extérieur et intérieur 5 millimètres et 4 millimètres respectivement, on peut retrouver un module de Young compris entre 4,8 et 9,5 GPa pour un fut, ce qui est cohérent et dans le bon ordre de grandeur des matériaux avec fibres de carbone (ZANEVSKYY 2001; RIECKMANN et al. 2012; MEYER 2015). On voit via l'équation I.2 que pour augmenter la raideur des flèches, les fabricants peuvent jouer soit sur le matériau, soit sur les diamètres extérieur et intérieur du tube. C'est cette dernière solution qu'ils privilégient.

Les matériaux composites qui sont utilisés ne permettent pas d'avoir une raideur identique d'un fut à l'autre par les processus de fabrication actuels. La tolérance concernant la raideur des futs fournis par le fabricant n'est pas communiquée par le fabricant, au contraire de paramètres comme la rectitude ou la masse⁶, mais il a été suggéré qu'une variation équivalent à 1% du spine entraîne une différence de 1,8 centimètre en cible (J. L. PARK 2021a). Après discussion avec les entraîneurs, l'homogénéité des futs achetés dans le commerce et utilisés par les archers français fait l'objet d'une attention particulière depuis des années. En effet, tous les ans, une société allemande trie et classe des centaines de futs qui sont envoyés par la Fédération Française de Tir à l'arc, en fonction de leur raideur et de l'étendue de cette raideur. Pour chaque lot étudié, ce sont pas moins de 75% de futs qui sont jugés non conformes aux exigences d'une pratique de haut-niveau, selon des critères établis par la société allemande, mais qu'ils refusent de communiquer.

La norme qui existe pour la mesure de la raideur d'un fut est bien établie (Figure I.6), mais elle ne prend pas en compte le positionnement initial de la flèche vis-à-vis de son axe longitudinal. Dans le cas d'une poutre idéale, la flexion dans une direction orthogonale à son axe longitudinal sera identique et l'orientation initiale lors du test de flexion n'aura aucune incidence. Cependant, le processus de fabrication des futs ainsi que les matériaux qui sont utilisés ne permettent pas d'assurer cette perfection. C'est d'ailleurs pour cela que la mesure de la rectitude s'effectue en faisant tourner la flèche sur elle-même. Si le diamètre extérieur de la flèche est variable le long de son pourtour, en combinant les équations I.1 et I.2, le spine, témoin de la raideur, le sera aussi. Comment la variation de raideur autour du périmètre du fut influence son interaction avec l'arc puis sa trajectoire

6. https://eastonarchery.com/arrows_/x10/ (Accès juin 2022)

et sa position finale sur la cible n'a pas été décrit, ni pris en compte dans les tris de futs effectués.

Pour palier à la dépendance à une société étrangère et à une nation concurrente d'un point de vue sportif, un autre banc de mesure a été développé permettant la mesure des propriétés mécaniques des futs de flèches, sur l'entièreté du périmètre. Il sera présenté ultérieurement dans la section II.2.2.1.

2.2.1.d Masse

La masse des futs pour les catégories de raideurs usuelles citées précédemment sont communiquées par le fabricant⁷ et sont comprises entre 12 et 21 grammes (Figure I.7). On peut noter une très bonne corrélation entre la masse et le spine d'un fut de flèche, comme préconisé par ZANEVSKYY 2001. On peut cependant constater que les futs de la catégorie 350 et 380 sont ceux qui respectent le moins cette relation, mais la raison d'une telle différence dans le processus de fabrication n'est pas explicitée. Pour un lot de 12 flèches Easton X10, la tolérance en masse du fabricant⁷ est fixée à 0,032 gramme (0,5 grain⁸), ce qui équivaut selon un modèle balistique simple (section II.3.2.5) à moins de 1,8 centimètre d'écart en cible entre deux flèches d'un même lot (J. L. PARK 2021a). Selon ce même fabricant, la tolérance globale pour deux flèches d'une même catégorie de raideur, indépendamment du lot dans lequel elles sont vendues ne dépasse pas 0,097 gramme (1,5 grain), ce qui équivaut à un écart inférieur à 5,5 centimètres en cible à 70 mètres, soit moins de la moitié du diamètre pour un « 10 ».

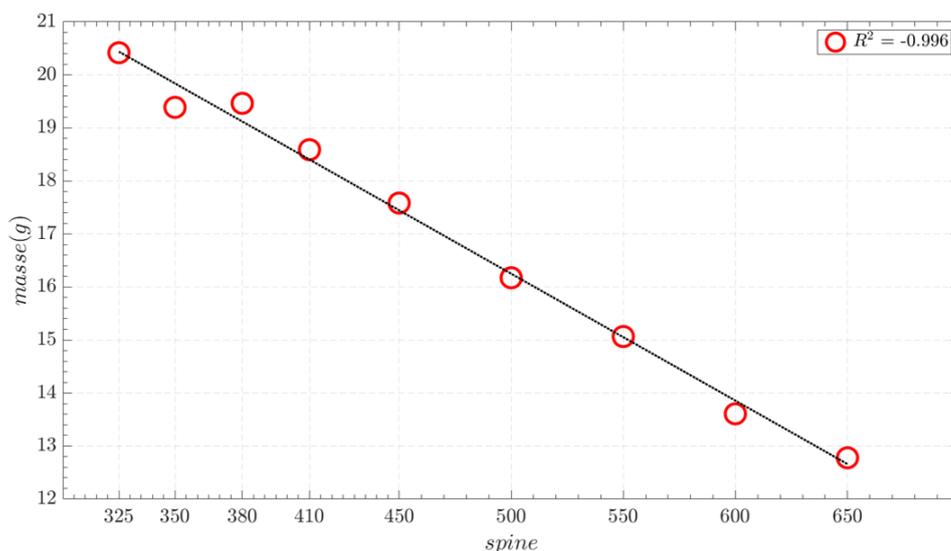


FIGURE I.7 – Relation entre le spine (raideur) d'un fut et sa masse, selon la documentation du fabricant⁷ (Accès juin 2022)

7. https://eastonarchery.com/arrows_/x10/ (Accès juin 2022)

8. 1 gr = 0,065 g

2.2.2 Pointe

Une fois les tubes achetés, la première étape dans le processus de montage consiste à les découper pour qu'ils correspondent spécifiquement à l'allonge d'un archer, puis la pointe y est ajoutée. Faite en acier ou en tungstène pour les flèches modernes, elles sont collées à l'avant du tube grâce à une résine. Dans un premier temps, la pointe est chauffée puis enrobée de résine qui fond au contact du fait de la chaleur. L'ensemble est ensuite inséré directement dans le tube et c'est le refroidissement de la résine dans le tube qui permet le maintien de l'ensemble pointe-tube (J. L. PARK 2013).

Chez les archers de haut-niveau, ce sont des pointes de 7,8 grammes (120 grains) qui sont le plus souvent utilisées (J. L. PARK 2021a). Il est possible de diminuer la masse de cette pointe par pallier de 0,65 gramme (10 grains), jusqu'à un minimum de 6,5 grammes (100 grains) en cassant les morceaux prévus à cet effet (Figure I.8). Cependant, des flèches avec des pointes moins lourdes seront plus susceptibles d'être déviées par le vent (J. L. PARK 2020). Contrairement aux futs, il n'y a pas de tolérance de masse indiquée par le fabricant pour les pointes, mais des mesures ont estimé que cette variation était égale à celle des futs, c'est-à-dire 0,032 gramme (J. L. PARK 2021a). Une fois le montage effectué, la masse de la pointe représente entre 30 et 40 % de la masse totale de la flèche lorsqu'elle est montée (J. L. PARK 2020).



FIGURE I.8 – Pointe utilisée chez les archers élités⁹

2.2.3 Empennage

A l'arrière de la flèche (Figure I.5) se trouve deux composants en plastique : l'empennage formé par trois plumes collées à intervalles réguliers autour du tube ainsi qu'une encoche juste insérée servant de point de contact entre la flèche et la corde (J. L. PARK 2011b). Il existe deux types de plumes : droites ou vrillées (Figure I.9), dont la taille est libre. Pendant la phase balistique, la flèche se stabilise en tournant sur elle-même le long de l'axe longitudinal, avec des vitesses de rotations de l'ordre de 300-700 rad/s en fonction des empennages (MADDALENA 2020; MIYAZAKI, MUKAIYAMA et al. 2013). Ceci est rendu possible pour des plumes droites en les orientant de quelques degrés par rapport à l'axe du tube, ou de façon naturelle avec des plumes vrillées (J. L. PARK 2011b; J. L. PARK, AITCHISON et al. 2018; LEDSONE 2018).

Les empennages vrillés donnent une plus grande vitesse de rotation à la flèche par rapport aux empennages plats (MADDALENA 2020), cela rend la flèche plus stable en vol

9. <https://eastonarchery.com/product/x10-ballistic-tungsten-points-dozen-pack/> (Accès juin 2022)

(MIYAZAKI, MATSUMOTO et al. 2017). Cependant, l'augmentation de l'énergie de rotation de la flèche entraînera une diminution de sa vitesse de déplacement vers la cible étant donné qu'elle utilisera une plus grande partie de l'énergie transmise par les branches pour la rotation. La traînée d'une flèche dans la phase balistique est causée principalement par le tube suivi des plumes (J. L. PARK 2011b; OKAWA et al. 2013). Deux types de plumes sont principalement utilisés, droites ou vrillées (Figure I.9), avec des optimums de surface qui ont été identifiés en fonction des conditions extérieures (MIYAZAKI, MATSUMOTO et al. 2017; MADDALENA 2020; ORTIZ, SERINO et al. 2020) : une surface d'empennage plus grande permet de stabiliser la flèche en vol, la réduire permet de diminuer l'influence néfaste du vent.



FIGURE I.9 – Différentes tailles et types de plumes utilisées (MADDALENA 2020), gauche : plumes vrillées, droite : plumes droites

L'espacement régulier des plumes autour du fut donne trois orientations possibles à l'encoche et donc trois positions possibles à une flèche lorsqu'elle est positionnée sur l'arc. Un questionnement des entraîneurs et des archers sur le montage des flèches porte sur l'importance du placement des plumes autour du fut ainsi que sur l'orientation optimale de l'encoche. Lorsque les flèches sont montées, un archer n'a aucune assurance concernant la conformité des composants. Le processus qu'il suit pour trier les bonnes flèches des mauvaises flèches passe par des tirs à courte et longue distance. De façon empirique, lorsqu'une flèche nouvellement montée s'éloigne du groupement composé d'autres flèches neuves, l'archer tourne l'encoche pour la tirer avec les deux autres orientations possibles. Si la flèche n'est pas groupée pour une des trois orientations, elle est mise de côté, sinon elle est considérée comme bonne. D'après les entraîneurs et les archers, tourner l'encoche d'un tiers de tour suffit parfois à faire tomber la flèche errante avec le reste du groupe. Ce travail est d'évidence fastidieux et certains archers avouent même ne pas y dédier assez de temps.

2.2.4 Équilibrage d'une flèche montée

Une métrique souvent utilisée dans le tir à l'arc pour déterminer si une flèche est équilibrée est le FOC (Équation I.3), pour Forward-Of-Center, qui est simplement une représentation de la localisation du centre de masse par rapport au centre géométrique de la flèche (MEYER 2015).

$$FOC = \frac{x_M}{L} - \frac{1}{2} \quad (I.3)$$

avec x_M la distance entre le centre de masse et l'arrière de la flèche et L la longueur totale de la flèche.

Pour tout projectile, le centre de masse doit être nécessairement en avant de son centre géométrique pour une meilleure stabilité en vol (DENNY 2011 ; LEPERS et al. 2020) et ceci est réalisé grâce à la pointe, plus lourde que le fut, insérée à l'avant de la flèche. Les valeurs recommandées de FOC pour la distance olympique de 70 m sont comprises entre 0,11 et 0,16 (ASHBY 2007). Par ailleurs, sur une flèche montée, le centre de gravité est situé bien en avant du centre de pression aérodynamique, ce qui permet également la stabilité de la flèche en vol (MIYAZAKI, MUKAIYAMA et al. 2013).

2.2.5 Balistique externe

Lorsqu'une flèche est tirée, comme tout projectile, elle est soumise pendant la phase aérienne à son poids \vec{P}_f et à des forces aérodynamiques que sont la traînée \vec{F}_D de sens opposé à la vitesse \vec{v} de la flèche et la portance \vec{F}_L orthogonale à \vec{v} . Ces forces ont pour normes :

$$|P_f| = m_T g \quad (I.4)$$

avec $m_T = (m_f + m_e + m_p + m_n)$, m_T la masse totale de la flèche montée, m_f la masse du fut, m_e la masse de l'empennage, m_p la masse de la pointe et m_n la masse de l'encoche, $g = 9.81 m.s^{-2}$ l'accélération de la pesanteur.

$$|F_D| = \frac{1}{2} C_D \rho A_T v^2 \quad (I.5)$$

$$|F_L| = \frac{1}{2} C_L \rho A_T v^2 \quad (I.6)$$

où A_T représente la section totale de la flèche, que l'on peut décomposer en une somme de la section du fut (A_f) et de l'empennage (A_e). En supposant que la section du fut soit circulaire, $A_f = \frac{\pi d_f^2}{4}$, pour un diamètre d_f donné. Si la section d'un empennage est rectangulaire, $A_e = n_e * h_e * l_e$, pour un nombre de plumes n_e ainsi leur hauteur h_e et largeur respective l_e . ρ la masse volumique de l'air et C_D et C_L les coefficients de traînée et de portance qui varient pendant la phase aérienne en fonction de l'angle d'attaque de la flèche (MIYAZAKI, MUKAIYAMA et al. 2013). Pour des flèches, dans le cas de petits angles, le coefficient de traînée dépend très peu de l'angle d'attaque et peut être approximé par une valeur fixe, tandis que le coefficient de portance varie linéairement (MADDALENA 2020). La vitesse de la flèche diminue de façon quasi linéaire avec la distance parcourue. Après 70 mètres, la vitesse terminale de la flèche en cible représente environ 85% de sa vitesse initiale (MEYER 2015 ; MADDALENA 2020 ; ENRIQUEZ et al. 2021). Comme on peut le voir à travers leur expression, les forces aérodynamiques sont dépendantes des caractéristiques propres à chaque flèche et proportionnelles à sa vitesse

quadratique. Dans ce manuscrit, nous ne nous intéresserons ni à l'influence des conditions environnementales, ni à celles des propriétés aérodynamiques des flèches pendant la balistique externe, car elles ont été étudiées en profondeur dans MADDALENA 2020.

2.3 Interaction arc - flèche

2.3.1 Paradoxe de l'archer

Pour comprendre l'importance de la flexibilité de la flèche, on représente sur la Figure I.10 issue de KOOI 1998, en vue de dessus, une situation qui se présente pour d'anciens arcs recurve datant d'avant les années 1950 ou sur un arc long. La flèche est représentée dans deux positions, à l'allonge à vide ainsi qu'à l'allonge maximale. Sur ces types d'arc, pour un droitier, la flèche lorsqu'elle est armée pointe vers la gauche de la cible car la ligne de visée n'est pas colinéaire avec l'axe médian de l'arc. Pourtant, une flèche vole suivant l'axe médian de l'arc et non pas le long de la ligne de visée, c'est ce qu'on appelle « paradoxe de l'archer ». Si la flèche était raide, lors de la poussée de la corde suivant l'axe médian, elle serait déviée au fur et à mesure qu'elle s'approcherait du grip. C'est donc seulement grâce à leur souplesse qu'elles peuvent contourner la poignée de l'arc pour en sortir correctement, puis aller se planter dans la cible.

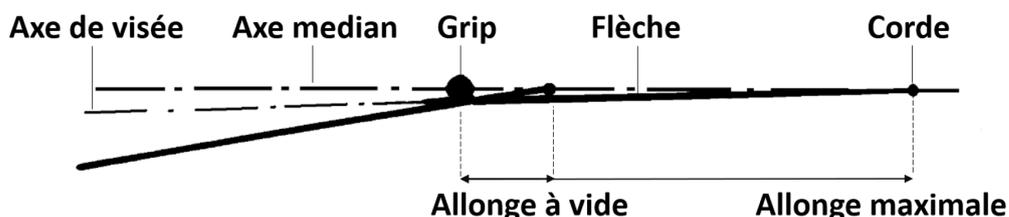


FIGURE I.10 – Situation pour une flèche raide, adapté de KOOI 1998

La trajectoire très particulière de la flèche lorsqu'elle quitte l'arc est illustrée sur la Figure I.11a tirée de HICKMAN 1947. Sur ce schéma, centré sur la flèche, sont représentées les différentes formes que cette dernière prend lorsqu'elle est éjectée, vers la gauche de l'image. Sous la force extrême exercée par la corde après le lâcher, la flèche fléchit pendant son accélération et contourne le grip grâce à sa flexibilité (ZANEVSKYY 2001). Ensuite, les flexions successives se poursuivent pendant toute la partie balistique jusqu'à arriver dans la cible (LIEU et al. 2011 ; MEYER 2015). Sur les arcs modernes, les arcs recurve ont désormais tous une fenêtre de tir dite « centrée » (KOOI 1998) permettant de confondre l'axe de visée avec l'axe médian de l'arc, supprimant par conséquent le paradoxe de l'archer.

Cependant, un phénomène lié au lâcher de la corde nécessite toujours que les flèches soient flexibles. En effet, la méthode usuelle utilisée pour tenir la corde sur les arcs recurve est dite méditerranéenne (CLARYS et al. 1990 ; KOOI 1998), illustré sur la Figure I.11b à gauche. Avec ce type de prise, les archers tiennent la corde avec trois doigts, un au-dessus de l'encoche, deux en dessous. Ainsi, lorsque l'archer lâche la corde, l'extension des doigts n'est pas assez rapide pour que la corde se libère dans le plan vertical de l'arc (K.

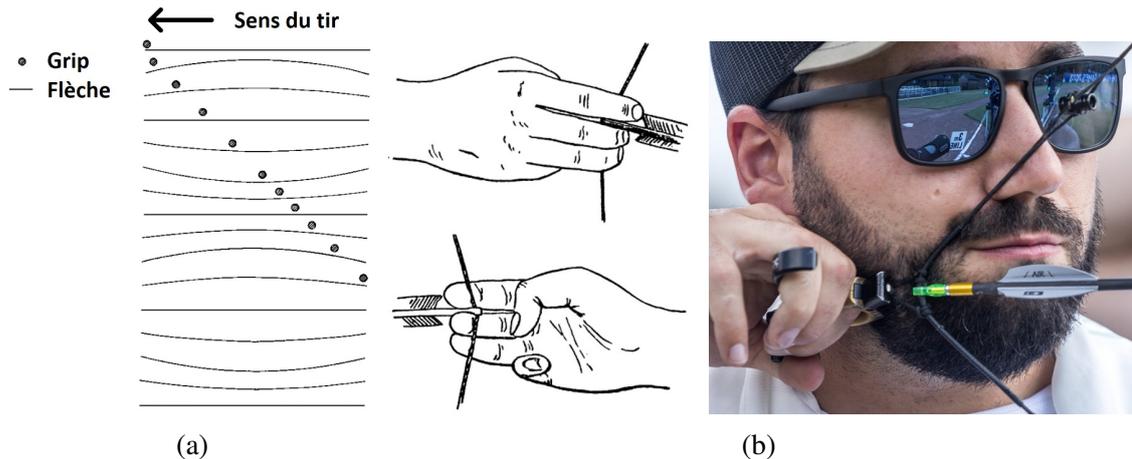


FIGURE I.11 – (a) Illustration du paradoxe de l'archer adapté de (HICKMAN 1947), (b) gauche : lâcher méditerranéen pour les arcs recurve (MORSE 1885), droite : lâcher par déclencheur pour les arcs à poulies, ©Dean Alberga, 2022

LEE et al. 2009). Ainsi, la trajectoire que cette dernière suit n'est pas rectiligne le long de l'axe vertical, mais connaîtra un léger mouvement latéral (KOOI et SPARENBERG 1997 ; ZANEVSKYY 2001 ; HORSACK et al. 2011 ; J. L. PARK 2013), causé par son glissement le long du bout des doigts, représenté sur les deux premières situations de la Figure I.12. Ce décalage latéral de la corde entraîne une poussée initiale de la flèche vers le grip et c'est la flexibilité de la flèche qui permettra de compenser le mouvement latéral de la corde. Pour que la libération de la corde soit la plus fluide possible, mais aussi pour protéger les doigts contre les frictions répétées de la corde, les archers utilisent un accessoire en cuir appelé « palette ». Positionné comme une couche de protection entre les doigts et la corde, cette dernière quand elle est relâchée glisse sur la surface en cuir avant de poursuivre sa trajectoire.

2.3.2 Balistique interne idéale

Par analogie avec la terminologie utilisée pour les armes à feu, le terme balistique interne désigne la trajectoire de la flèche pendant qu'elle est encore au contact de l'arc lors d'un tir.

Une telle balistique interne idéale est présentée sur la Figure I.12 (LIEU et al. 2011), pour un droitier. Juste avant le lâcher, la flèche est en contact avec trois parties de l'arc : la corde via l'encoche au niveau du point d'encochage à l'arrière, le Berger bouton et le repose flèche à l'avant (Figure I.12a). La déviation latérale de la corde, ainsi que la flexion de la flèche qui commence dès que la corde est lâchée (Figure I.12b), cause une pression sur le Berger bouton approximativement pendant 3 à 7 millisecondes après le lâcher (J. L. PARK 2013) qui contribue à éloigner la flèche de l'arc (Figure I.12c). La flèche fléchit ensuite dans la direction opposée à l'arc tout en continuant d'avancer (Figure I.12d), de façon à contourner la poignée. Lorsque la flèche a effectué un cycle de flexion, dans l'idéal, le contact entre la corde et l'encoche s'estompe (ZANEVSKYY 2001). Cet instant se produit entre 14 (J. L. PARK 2013) et 16 millisecondes après le lâcher (KOOI

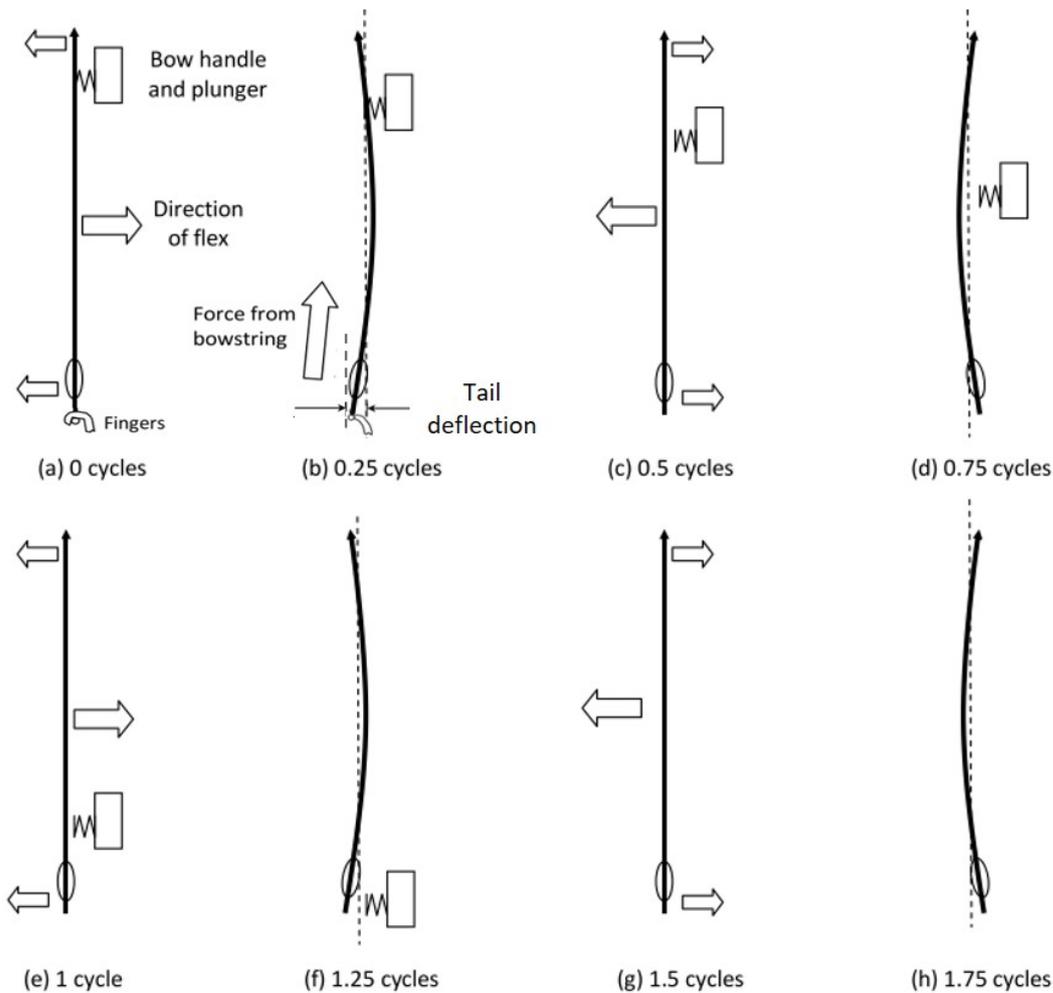


FIGURE I.12 – Balistique interne idéale pour un droitier, adapté de LIEU et al. 2011

et SPARENBERG 1997; ZANEVSKYY 2012). Par la suite, le deuxième cycle de flexion permet à l'arrière de la flèche de sortir de l'arc sans toucher le Berger bouton. Lorsque l'arrière de la flèche est au niveau de la poignée (Figure I.12f), la flexion dans le sens de l'arc permet à l'encoche de s'éloigner de l'arc.

Une fois la poignée dépassée, environ 18 millisecondes après le lâcher (J. L. PARK 2013), la flèche peut alors continuer son trajet vers la cible avec des flexions présentes jusqu'à l'impact en cible (MEYER 2015), mais dont les amplitudes seront de plus en plus faibles (Figure I.12g et h). La rotation de la flèche le long de son axe longitudinal n'est pas représentée sur la figure, mais est néanmoins présente dès l'instant illustré en b. Dans la pratique, les abaques fournis par les constructeurs permettent aux archers de faire choisir judicieusement le spine des futs en fonction de la force de l'arc pour obtenir une balistique interne proche de l'idéal. Les trois orientations initiales possibles de la flèche (section I.2.2.3) suggèrent qu'il y aurait peut-être un positionnement optimal des plumes et de l'encoche, dépendant de la variation de raideur autour du fut, permettant d'avoir une interaction idéale arc-flèche lors de l'éjection de la flèche. Ainsi, en faisant tourner

l'encoche lors du tri empirique, l'archer positionnerait le fut dans une configuration plus proche de l'optimum.

2.4 Cas d'un arc à poulies

Les similarités entre les arcs à poulies et les arcs classiques recurve sont présentées pour mettre en évidence les passerelles réalisables concernant l'étude du matériel pour ces deux types d'arcs. Comme les arcs classiques, les arcs à poulies (Figure I.13) possèdent aussi une poignée et une paire de branches, fabriqués avec les mêmes matériaux et ayant la même fonction (SUNG et al. 2018). Leur principale différence se situe sur la présence de câbles supplémentaires reliés aux poulies situées à chaque extrémité de l'arc (J. L. PARK 2011c; MEYER 2015; SUNG et al. 2018). Le système de câbles et de poulies, accompagné du guide câble, procure un avantage mécanique non négligeable par rapport aux arcs classiques.

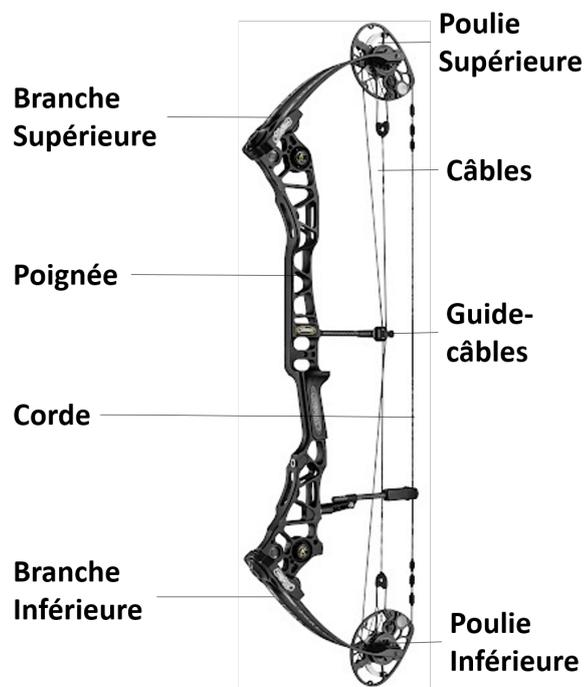


FIGURE I.13 – Dessin détaillé d'un arc à poulies. Par soucis de simplification, l'arc à poulies est présenté sans stabilisateurs ni viseur, bien qu'ils soient utilisés en compétition.

Sur la Figure I.14 est représentée la force de l'arc en fonction de l'allonge pour les deux types d'arcs. On note une différence dans le profil des deux courbes, monotone croissante pour les arcs classiques avec le maximum de force atteint à l'allonge maximale tandis que l'allure est parabolique pour les arcs à poulies avec un maximum atteint en milieu d'allonge. Au début de l'allonge, la force que l'archer doit fournir sera supérieure pour les arcs à poulies. En revanche, le pivot des poulies se produisant pendant l'allonge permet de réduire la force que doit fournir l'archer à la fin de l'allonge. Ceci permet une plus grande stabilité posturale (SIMSEK et CERRAH 2013) et un meilleur contrôle de

l'arc à poulies pendant la phase de visée, par conséquent la précision du tir sera meilleure (MADDALENA 2020). Une des façons de caractériser les poulies est leur effort de maintien, c'est-à-dire le pourcentage de force nécessaire à l'allonge de l'archer par rapport au maximum atteint au cours de l'allonge. Ce pourcentage est assez variable avec des valeurs comprises entre 20 et 50% (SUNG et al. 2018) de la force maximale.

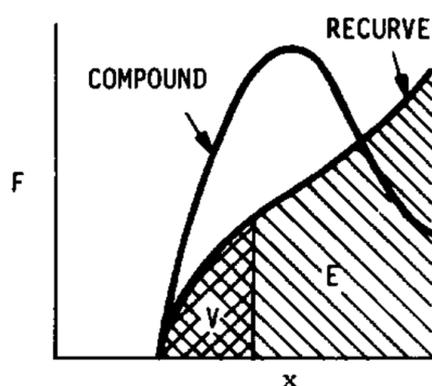


FIGURE I.14 – Comparaison de la force F nécessaire pour armer en fonction de l'allonge x pour un arc à poulies et un arc classique recurve. V représente l'énergie potentielle élastique emmagasinée à l'allonge x et E représente celle à l'allonge finale (MARLOW 1981)

Pour les arcs à poulies, la fenêtre de tir est également centrée, le paradoxe de l'archer n'existe pas, car la flèche est alignée sur la cible. Les doigts de l'archer ne sont pas en contact direct avec la corde, le lâcher étant réalisé au moyen d'un déclencheur en forme de crochet, ce qui a pour conséquence d'enlever le déplacement initial latéral de la corde (Figure I.11b). La flèche aura ainsi des cycles de flexions plutôt dans le plan vertical (J. L. PARK 2011c; SUNG et al. 2018), sans avoir besoin de contourner la poignée comme dans les arcs recurves. Ainsi, l'interaction entre l'arc à poulies et la flèche est moins complexe que pour un arc classique et facilite le choix des flèches. À force d'arc égale, selon les abaques des fabricants, les futs tirés par les arcs à poulies sont plus raides que ceux tirés par les arcs recurves.

2.5 Bilan

Le tir à l'arc est une discipline dont la précision nécessaire exige une maîtrise fine du matériel qui est utilisé. L'arc et les flèches sont propres à chaque archer et la compréhension de leurs propriétés mécaniques ainsi que leur maîtrise semble être un facteur clé pour optimiser la performance. Les réglages existant sur l'arc classique sont nombreux. Les questions soulevées par les entraîneurs et les archers sur les caractéristiques des branches d'arcs dans leur condition d'utilisation méritent d'être analysées et si possible d'y apporter des réponses. À propos des flèches, la multitude de propriétés mécanique qui peuvent influencer la performance finale rend leur sélection difficile. Les principales interroga-

tions des archers portent sur les critères de sélection des futs en amont de leur montage afin d'alléger le tri sur cible qui est fastidieux et qui n'est donc pas forcément réalisé.

3 Archer

Après avoir détaillé le matériel nécessaire pour pratiquer le tir à l'arc, la composante humaine de cette discipline est abordée en décrivant la technique de tir, les paramètres biomécaniques déterminants dans la performance. Ces enjeux de répétabilité et de précision chez un archer s'appliquent qu'il utilise un arc classique ou un arc à poulies.

3.1 Description de la tâche

Pour commencer, la gestuelle de l'archer pour cette discipline est présentée. Chaque séquence de tir débute par le positionnement de l'archer à la distance de tir. Sur la Figure I.15, la ligne de tir est matérialisée par la ligne noire tracée au sol, située à 70 mètres de la cible. Dans les règles officielles (FITA 2021), il est simplement mentionné que l'archer doit être au-dessus de la ligne de tir. Il existe deux types d'appuis, utilisés en fonction des préférences de chacun, pieds parallèles à la ligne comme sur la Figure I.15, ou appuis ouverts avec la pointe du pied avant orientée à 45 degrés vers la cible. Une très grande majorité (J. L. PARK 2019) des archers se tient debout, de profil par rapport à la cible, centrés sur la ligne, un pied de chaque côté (Figure I.15a). Cependant, il semblerait que se tenir au-dessus de la ligne de la manière la plus avancée autorisée possible, c'est-à-dire avoir le pied arrière collé sur la ligne, procure un très léger avantage, de l'ordre de 1 point sur 720, du fait de la distance de tir réduite lors de chaque tir (J. L. PARK 2019). Ce positionnement initial présenterait également l'avantage d'avoir un repère au sol pour placer un des pieds de manière répétable lors de chaque tir.

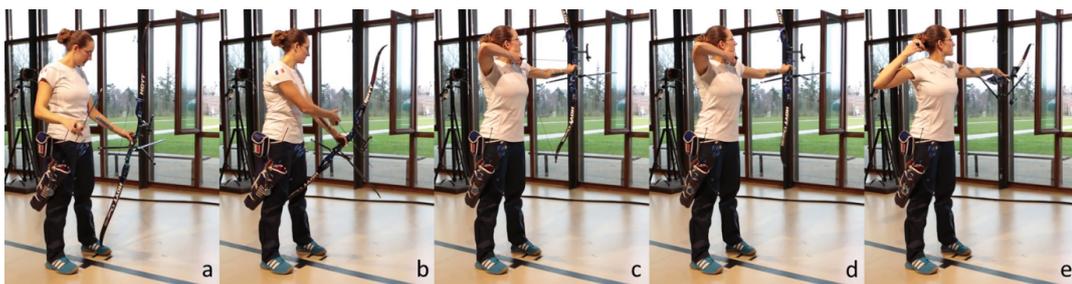


FIGURE I.15 – Séquence de tir d'une archère française (Bérengère Schuh), instants-clés du tir, a : début de la préparation, b : début de l'armement, c : visée, d : libération, e : continuité du tir.

Une fois l'archer positionné au-dessus de la ligne de tir, commence la phase d'armement (Figure I.15b), avec l'archer qui place la flèche sur l'arc, le fut entre le clicker et le Berger-bouton, sur le repose flèche à l'avant et l'encoche au niveau du point d'encoche à l'arrière dans une configuration proche de la Figure I.4 (droite). Ensuite, l'archer positionne son bras de corde autour du point d'encoche selon la prise méditerranéenne

présentée auparavant (Figure I.11b) et son bras d'arc contre la poignée. L'arc commence alors à être mis faiblement en tension, en même temps que les mouvements d'abduction du bras d'arc et du bras de corde. Trois écoles existent pour cette phase d'armement, qui consistent chacune à lever l'arc à une hauteur plus ou moins haute avant de mettre le bras de corde en action. Ces techniques sont détaillées dans la section III.2.

En fonction de la technique que l'archer utilise, lorsque la hauteur d'arc est atteinte, débute une phase simultanée de traction de la corde tout en poussant sur la poignée avec le bras opposé, de façon à répartir les efforts musculaires pour armer l'arc (LEROYER et al. 1993). La corde est ramenée au contact du visage à une position appelée point d'ancrage, repère spatial important pour l'archer. Il est opportun de noter que l'arc est maintenu en place par la résistance du bras d'arc pendant la traction du bras de corde sur la corde et que la poignée est seulement plaquée contre la paume de la main d'arc sans que l'archer ne cherche à serrer le grip.

À cet instant, l'allonge de l'archer est quasiment atteinte, c'est le début de la visée, où l'objectif de l'archer est d'aligner le viseur sur le centre de la cible (Figure I.15c). Dès que l'alignement est effectué, l'archer poursuit la traction de la corde sur deux derniers millimètres (K. LEE et al. 2009), jusqu'à entendre le clicker lorsque l'allonge est atteinte. La corde est relâchée par les doigts sur la corde après un temps de latence correspondant au temps de réaction au stimulus auditif (Figure I.15d). Suite au lâcher de la corde, le bras de corde poursuit son mouvement dans la direction opposée à la cible, tandis que l'arc après un léger recul lié à l'accélération de la flèche, bascule vers avant (Figure I.15e). Les consignes données par les entraîneurs sont de ne surtout pas tenter de raccourcir la durée du temps de réaction naturel en anticipant le lâcher la corde. Si les archers ont plutôt tendance à respecter cette consigne de ne pas précipiter le tir, dans un cadre du maintien de l'équilibre pour des perturbations volontaires, des ajustements posturaux anticipés devraient avoir lieu (ARUIN et LATASH 1995). Ces mécanismes du contrôle postural seront abordés en détail dans la section I.3.4.

Le temps total pour effectuer l'entièreté de la séquence de tir ne dure en général pas plus de 10 secondes. En compétition individuelle ou par équipe, les archers ont en moyenne un temps alloué de vingt secondes pour enclencher un tir (section I.1.1.2). Après le positionnement sur la ligne, à peu près trois secondes s'écoulent entre l'insertion de la flèche et le début de la phase de visée quasiment à l'allonge total. Entre la phase de visée et le déclenchement du tir, environ trois secondes se sont écoulées sur la vidéo dont sont extraites les photos de la Figure I.15, sachant qu'il est conseillé par les entraîneurs de tirer en moins de trois secondes et demi après avoir atteint le point d'ancrage (K. LEE et al. 2009).

3.2 Balistique interne

Entre les instants c et d de la Figure I.15, à l'aide d'une caméra rapide, on peut observer la balistique interne décrite précédemment. Les lignes rouges matérialisent la corde, et le polygone rouge permet de mettre en évidence la localisation de l'encoche. L'instant a de la Figure I.16 correspond au tout début de la phase de tir, la flèche est au point

d'ancrage sur le visage, le clicker est déjà tombé, l'archer commence juste à relâcher les doigts. 4 millisecondes plus tard, la corde quitte les doigts, se sépare de son point d'ancrage (Figure I.16b). 12 millisecondes après le lâcher, la flèche se détache de la corde (Figure I.16c) et quitte l'arc après 14 millisecondes (Figure I.16c). Ces deux dernières temporalités sont dans l'ordre de grandeurs, quoique légèrement inférieures à ce qui a été décrit dans la littérature, du fait d'une force d'arc plus importante pour l'archer filmé.

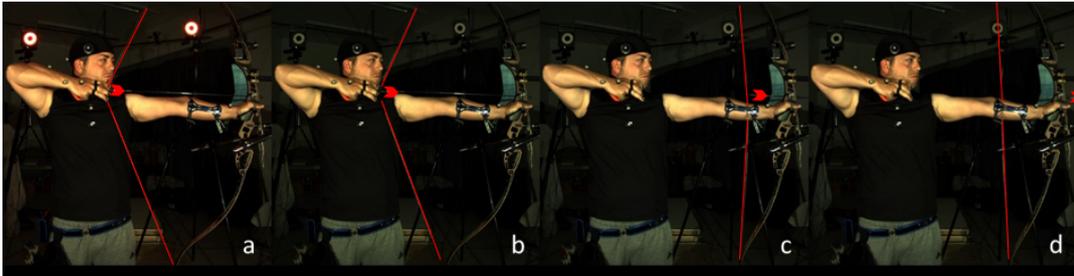


FIGURE I.16 – Balistique interne pendant un tir (Antoine Ramblière), la corde est représentée par les traits rouges, instants-clés, a : début du lâcher, b : la corde quitte les doigts, c : la flèche quitte la corde, d : la flèche sort de l'arc.

3.3 Paramètres déterminants de la performance

Un objectif de la Fédération Française de Tir à l'arc est de disposer d'une station d'expertise fonctionnant en routine d'entraînement, permettant de faire un retour sur la qualité des tirs des archers à l'aide de critères objectifs de performance, en complément de l'expertise des entraîneurs. De nombreuses études se sont intéressées au tir à l'arc et ont pu identifier ces critères liés à l'archer et à sa technique. La plupart des paramètres ont été agrégés dans une revue systématique parue récemment (VENDRAME et al. 2022).

3.3.1 Psychologie

Lorsque les archers sont interrogés sur ce qu'ils estiment être important pour pouvoir produire une bonne performance pendant un tir, ce ne sont ni les aspects physiques, ni les aspects techniques qui ressortent en premier, mais plutôt l'aspect mental (KIM et al. 2015). Le premier critère pour obtenir une bonne performance serait selon eux la confiance en soi, déjà identifiée et décrite auparavant (LANDERS et al. 1986; K. LEE et al. 2009), ce qui ne semble pas aberrant dans un sport aussi individuel que le tir à l'arc. En effet, pour performer à très haut niveau, quelle que soit la discipline, l'aspect psychologique est tout aussi important que l'aspect physique et technique (RICE et al. 2016). La maîtrise de cet aspect permet de ne pas sous-performer lors de moments cruciaux, comme cela peut être le cas sur des flèches de barrage (BUCCIOL et al. 2020). Seulement après ce critère psychologique cité par un plus grand nombre d'archers suivent dans de mêmes proportions deux aspects techniques liés à la stabilité et à la répétabilité qui sont l'équilibre au niveau de la ligne d'épaule pendant la phase de visée et la variabilité temporelle du lâcher par rapport à la tombée du clicker, ainsi qu'un autre aspect mental qui est la concentration pendant le tir.

3.3.2 Temporalité

Certaines étapes de la gestuelle réalisée pendant le tir et notamment leurs durées ont été corrélées à un meilleur résultat. Une réduction du temps total de la phase d'armement, à partir de la mise en tension de l'arc jusqu'à la tombée du clicker, pour une durée moyenne de 4,8 secondes permettrait de réaliser de meilleurs scores (TINAZCI 2011). Par ailleurs, en compétition, les archers médaillés passent moins de temps sur cette phase préparatoire que leurs adversaires (TAKAI et al. 2012). Concernant la durée de la phase de visée, les conclusions sont un peu plus disparates. Toutefois, il semble qu'il y aurait une durée idéale comprise entre 3 et 10 secondes, descendre en dessous peut être aussi néfaste sur la performance que de trop prolonger ce temps (KEAST et al. 1990). Par ailleurs, pour performer, un archer doit pouvoir être répétable sur le temps passé pendant cette phase (TAKAI et al. 2009). Sur un plus grand nombre de tirs réalisés, le score est en revanche négativement corrélé à la durée de la phase de visée avec une durée moyenne de 3,5 secondes (CALLAWAY et al. 2017). Ce dernier résultat semble contre-intuitif, car lorsque l'allonge est maximale, la visée est moins précise (MADDALENA 2020) du fait d'une augmentation des activations musculaires au niveau de l'épaule qui se traduit par des tremblements plus intenses (J. J. LIN et al. 2010). Ces résultats pourraient être expliqués par la distance de tir de seulement 18 mètres de l'étude, où les arcs utilisés nécessitent moins de force pour armer. Les archers pourraient alors se permettre de maintenir leur allonge plus longtemps sans pour autant altérer leur performance car les fluctuations de visées seront réduites (MADDALENA 2020).

La tombée du clicker étant un évènement ponctuel qui se produit lors de chaque tir, il sert dans quasiment toutes les études sur le tir à l'arc comme référence temporelle. Pour le détecter, plusieurs techniques ont été proposées : interrupteur mécanique qui déclenche une mesure lorsque le clicker tombe et entre en contact avec la poignée de l'arc (MARTIN et HEISE 1992; LEROYER et al. 1993; SQUADRONE, RODANO et GALLOZZI 1994; ERTAN, KENTEL, S. Turgut TÜMER et al. 2005; ERTAN, SOYLU et al. 2005; ERTAN 2009; ERTAN, KNICKER et al. 2011; TINAZCI 2011; SIMSEK, CERRAH, ERTAN et al. 2018; SIMSEK, CERRAH, ERTAN et al. 2019), microphone (SPRATFORD et al. 2017; CALLAWAY et al. 2017), caméra rapide (NISHIZONO et al. 1987; SHINOHARA et al. 2018), accéléromètre positionné sur la poignée (EDELMAAN-NUSSER et al. 2006) ou encore indirectement à travers les schémas d'activations musculaires de l'archer différent entre la phase de visée et la phase d'armement (ERTAN, KENTEL, S. Turgut TÜMER et al. 2005; SOYLU et al. 2006).

Il a été démontré qu'un temps de réaction plus court au stimulus auditif produit par le clicker est corrélé avec des flèches qui font un meilleur score (TINAZCI 2011; SPRATFORD et al. 2017). Ce temps est significativement inférieur pour les archers experts par rapport à des archers de moins bon niveau (ERTAN, KENTEL, S. T. TÜMER et al. 2003). De plus, un archer doit être capable de reproduire ce temps de réaction avec le moins de variations possible et ce serait plutôt cette répétabilité qui semble être primordial (HELLER 2012; CALLAWAY et al. 2017). Les temps de réaction rapportés sont de l'ordre de 100-180 millisecondes pour les archers élites, contre plus de 200 millisecondes pour des archers moins entraînés. Ces temps correspondent à des temps de réaction standard

pour un stimulus auditif prévisible, se situant typiquement entre 120 et 160 millisecondes (JAKOBS et al. 2009).

3.3.3 Activité musculaire

Les activités musculaires, des membres supérieurs et du dos surtout, ont été décrites tout au long du processus de tir. Les groupes musculaires étudiés regroupent principalement ceux du dos (trapèze, grand dorsal), de l'épaule (deltoïde), des bras (biceps, triceps) et avant-bras (extenseur et fléchisseurs des doigts).

Entre différents niveaux d'archer, les principaux muscles sollicités diffèrent. Chez les archers entraînés, et ce, dès la phase d'armement, ce sont les muscles du dos qui s'activent le plus, en particulier le trapèze, contributeur à la stabilisation de la scapula (BAKHSH et al. 2018), contrairement aux muscles du bras et de l'avant-bras plus utilisés chez les archers moins entraînés ou débutants (NISHIZONO et al. 1987; SHINOHARA et al. 2018). Cette utilisation majoritaire de plus gros groupes musculaires situés dans le dos permet de soulager les muscles des bras et avant-bras côté corde. De fait, le poids de l'arc sera mieux supporté par les archers, assurant une visée plus stable et par conséquent l'obtention des meilleurs scores (ERTAN, SOYLU et al. 2005). Concernant le deltoïde, sollicité lors d'un mouvement d'abduction de l'épaule (LEROYER et al. 1993), certains ont rapporté une activation plus élevée chez les archers experts (SIMSEK, CERRAH, ERTAN et al. 2018), aucune différence entre les niveaux (SHINOHARA et al. 2018), ou encore une corrélation négative entre l'activation de ce muscle et le score (TINAZCI 2011).

Sur le bras de corde, il a été observé chez les archers élites une abduction de l'épaule inférieure (99°) comparée à des archers de moins bon niveau (107°) (SHINOHARA et al. 2018). Ainsi, l'abduction de l'épaule chez les archers de haut niveau est plus proche d'un optimum de 90° proposé pour avoir un tremblement minimal au niveau de l'épaule pendant la phase de visée (J. J. LIN et al. 2010). Lors du lâcher de corde, la stratégie musculaire est soit uniquement une relaxation des fléchisseurs des doigts (MARTIN, SILER et al. 1990; ERTAN 2009), soit une relaxation des fléchisseurs coordonnée avec une contraction de l'antagoniste extenseurs des doigts (NISHIZONO et al. 1987; MARTIN, SILER et al. 1990; ERTAN, KENTEL, S. T. TÜMER et al. 2003; TAHA et al. 2017). La différence entre les archers experts et non-experts résiderait dans un relâchement des fléchisseurs plus tôt chez les archers entraînés, conséquence d'un temps de réaction plus court (ERTAN, KENTEL, S. T. TÜMER et al. 2003). Par ailleurs, du côté du bras d'arc, le pic d'activation supérieur des extenseurs des doigts chez les experts par rapport à une population novice, témoigne de leur capacité ne pas serrer la poignée d'arc pendant la séquence de tir (ERTAN 2009). Les archers novices qui serrent la poignée produisent potentiellement une rotation de la poignée d'arc autour de l'axe vertical lors de l'éjection de la flèche, ce qui contribuerait à une moins bonne performance (ERTAN 2009; J. L. PARK 2013).

Finalement, le critère discriminant entre un archer de très bon niveau et un archer débutant n'est probablement pas tant l'intensité de l'activation musculaire des muscles du haut du corps, mais plutôt sa capacité à être répétable et pouvoir reproduire le même schéma d'activation lors de chaque tir, témoignant d'un meilleur contrôle moteur

(CLARYS et al. 1990; MARTIN, SILER et al. 1990; LEROYER et al. 1993; SQUADRONE, RODANO et GALLOZZI 1994; SOYLU et al. 2006).

3.3.4 Équilibre postural

Dans les sports de tirs pratiqués debout (pistolet, carabine) l'équilibre postural a été établi comme déterminant principal de la performance. Que ce soit pour le tir debout en biathlon ou en tir sportif, l'athlète se positionne de profil de la même manière que les archers sur un pas de tir. Entre différents niveaux d'expertise, outre un déplacement moins important du centre de pression et des oscillations posturales moins prononcées pour les experts (ERA et al. 1996), la différence se situe sur un meilleur contrôle de l'équilibre dans la direction antéro-postérieure ou perpendiculaire à la ligne de tir (SATTLECKER et al. 2017; KO et al. 2017; CHADEFaux, VALDES-TAMAYO et al. 2020). Chez des tireurs entraînés, il a été noté que la performance décroît quand les oscillations posturales augmentent (ERA et al. 1996; BALL et al. 2003; MASON, L.F.COWAN et al. 1990).

Pour le tir à l'arc, l'équilibre postural est également un critère qui permet de discriminer les archers de niveaux différents (MASON et PELGRIM 1986; SIMSEK, CERRAH, ERTAN et al. 2019; TAHA et al. 2017), même si ce n'est pas le seul (SQUADRONE et RODANO 1994). Au sein d'archers experts, si la configuration corporelle dans l'espace ne serait pas un critère assez discriminant (STUART et al. 1990), de façon analogue à ce qui a été observé dans le tir sportif, la performance serait liée à de plus faibles oscillations posturales, que ce soit pendant la phase de visée (KEAST et al. 1990; SARRO et al. 2020; ZAWI et al. 2013), ou après le lâcher (ZAWI et al. 2013; SPRATFORD et al. 2017), et à de plus faibles oscillations de l'arc par rapport à la cible (EDELmann-NUSSER et al. 2006; GRUBER et al. 2002; MADDALENA 2020).

L'équilibre postural est un critère objectif de la performance dans le tir à l'arc établi par la littérature. Il semble adéquat d'en présenter les principaux mécanismes qui mènent à l'hypothèse d'une production d'ajustements posturaux anticipés chez les archers avant le lâcher de la corde, malgré que les consignes données par les entraîneurs soient de « ne pas anticiper le lâcher ».

3.4 Contrôle postural

3.4.1 Généralités

Le contrôle postural est une tâche motrice complexe (Figure I.17) faisant appel à de multiples processus sensorimoteur (HORAK et MACPHERSON 1996). Il a été défini comme permettant le positionnement du corps dans l'espace en respectant deux objectifs principaux que sont l'orientation et l'équilibre postural (MASSION 1994; SHUMWAY-COOK et al. 1995; HORAK et MACPHERSON 1996). Le terme orientation posturale englobe le positionnement relatif des segments corporels les uns par rapport aux autres, contraints par la tâche (BALASUBRAMANIAM et al. 2000; HUXHAM et al. 2001) et l'environnement (NASHNER et MCCOLLUM 1985; LESTIENNE et V. GURFINKEL 1988; RICCIO et al. 1992), rendu possible par le maintien d'un certain tonus musculaire. L'équi-

libre postural s'entend comme la capacité à maintenir le corps et plus exactement la projection verticale du centre de masse dans des limites de stabilité définies par la base de support dans des conditions qui ont été décrites comme « statiques » (SHUMWAY-COOK et al. 1995) et dynamiques (HOF et al. 2005). Ces deux parties distinctes sont contrôlées différemment par le système nerveux (KANDEL et al. 2014), mais sont interdépendantes (ST GEORGE et al. 2018; MANCINI et al. 2020).

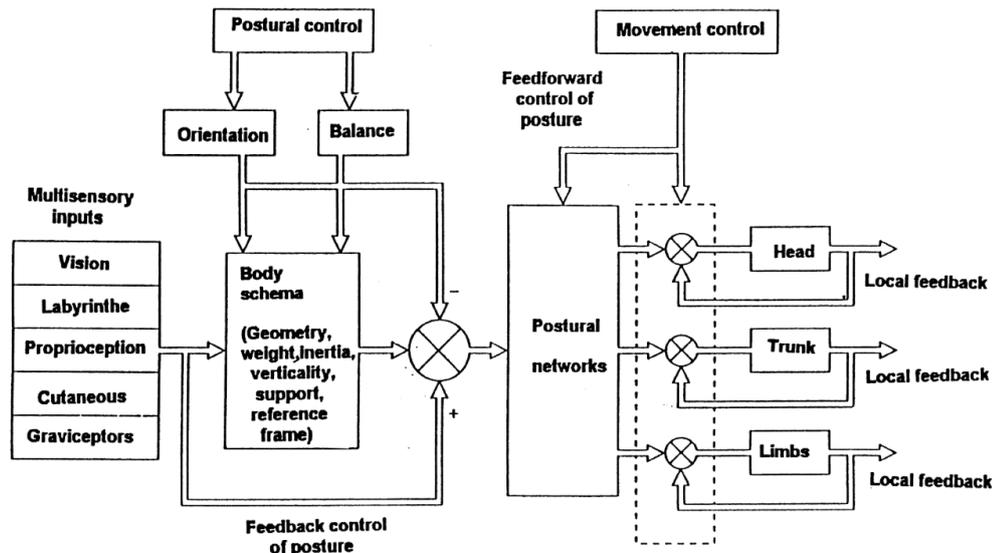


FIGURE I.17 – Organisation du contrôle postural (MASSION 1994)

Le maintien de l'équilibre postural bipodal chez l'être humain, système polyarticulé devant lutter contre la gravité, est par essence instable (WINTER 1995; PETERKA 2002; MERGNER 2010; KANDEL et al. 2014) du fait de sa géométrie corporelle. En effet, environ deux tiers de la masse d'un humain se situe au-dessus de ses hanches (WINTER 2009), ce qui contribue à une position verticale du centre de masse global relativement haute en comparaison à l'étroitesse de la base de support ou polygone de sustentation formé par ses deux pieds au sol. Une modélisation couramment utilisée est celle du pendule inverse qui sous l'influence de la gravité tend à basculer d'un côté ou d'un autre (WINTER 1995). Pour y parvenir, le tonus musculaire des muscles anti-gravitaires seul ne suffit pas (KANDEL et al. 2014). Le système nerveux central se repose en permanence sur plusieurs afférences sensorielles provenant, majoritairement (PETERKA 2002), de la vision (D. LEE et al. 1975; LESTIENNE, SOECHTING et al. 1977; BERTHOZ, LACOUR et al. 1979; A. M. BRONSTEIN 1986), de l'appareil vestibulaire (NASHNER et WOLFSON 1974; HORSTMANN et al. 1988; HORAK, SHUPERT et al. 1994; DAY et al. 1997) et de la proprioception (NASHNER 1977; Rolf JOHANSSON et al. 1988; KAVOUNOUDIAS et al. 1999; HORAK, NASHNER et DIENER 1990), mais également de récepteurs extéroceptifs cutanés (WU et al. 1997; MAGNUSSON, ENBOM, R. JOHANSSON et PYYKKÖ 1990; MAGNUSSON, ENBOM, R. JOHANSSON et WIKLUND 1990). Ces informations permettent d'alimenter la représentation interne du schéma corporel, jouant un rôle es-

sentiel dans l'organisation de la posture et de la commande motrice (V. S. GURFINKEL et al. 1988; MASSION 1994; HORAK et MACPHERSON 1996).

Dans un cadre idéal, une posture stabilisée est le socle de tout mouvement en servant d'interface avec l'environnement (MASSION 1998). Ainsi, la régulation simultanée de l'orientation du tronc, des bras et de la tête est primordiale pour effectuer une action (MASSION 1994). La nécessité de stabiliser la tête via les muscles proprioceptifs nucaux provient du fait qu'elle héberge le système oculaire et vestibulaire (BERTHOZ et POZZO 1994; A. BRONSTEIN et al. 2004), fournissant une référence spatiale interne et environnementale vis-à-vis de l'axe vertical. Pour le système oculaire, le déplacement de la scène visuelle capté par les photorécepteurs de la rétine permet la perception du mouvement (PAILLARD 2016). Dans le système vestibulaire, ce sont les organes otolithiques et les canaux semi-circulaires qui permettent de rapporter les accélérations linéaires et angulaires de la tête (A. BRONSTEIN et al. 2004; PAILLARD 2016). Les gravicepteurs situés dans le tronc sont critiques (A. BRONSTEIN et al. 2004) dans son orientation et sa stabilisation pendant des mouvements initiés par les membres inférieurs (MOUCHNINO et al. 1992), dont la proprioception provient de fuseaux neuromusculaires et des organes tendineux de Golgi (JAMI 1992). Les récepteurs cutanés quant à eux permettent de réguler l'amplitude et la direction de la force de contact sur la surface d'appui (A. BRONSTEIN et al. 2004). L'ensemble de ces éléments, mis bout à bout, permettent la réalisation d'un mouvement contrôlé, qui est finalement un état transitoire entre deux postures (MASSION 1992).

3.4.2 Modèle simplifié

Lors du maintien de la posture debout, le corps régule la position du centre de masse via le déplacement en phase du centre de pression (WINTER 1995). Par centre de masse, on entend le barycentre des centres de masses de l'ensemble des segments qui composent le corps, confondu avec le centre de gravité chez l'être humain, qui est un point virtuel d'application de la résultante des forces de gravité. Le centre de pression quant à lui représente le barycentre des composantes verticales des forces de contact sous la surface d'appui. Une représentation très simplifiée de l'équilibre postural est le pendule inverse simple (LESTIENNE, SOECHTING et al. 1977; WINTER 1995; WINTER et al. 1998; GAGE et al. 2004), présentée sur la Figure I.18.

Pour un sujet maintenant une posture debout présentant des oscillations posturales dans le plan sagittal autour de sa cheville O , avec \vec{W} son poids s'appliquant à son centre de masse, \vec{R} la force de réaction du sol, d'intensité identique et de direction opposée s'appliquant au centre de pression, g et p les distances entre les lignes d'actions de ces deux forces et la cheville respectivement. En appliquant le principe fondamental de la dynamique en rotation au niveau de la cheville ($\Sigma \vec{M}_O = I \vec{\alpha}$), on obtient une relation liant les distances g et p avec le moment d'inertie I autour de O et l'accélération angulaire $\vec{\alpha}$ du pendule inverse :

$$Rp - Wg = I\alpha \quad (\text{I.7})$$

Dans la première situation de la Figure I.18, le sujet est légèrement penché en avant. Par conséquent, la quantité Rp est inférieure à Wg , ce qui crée un effet bras de levier

induisant une accélération angulaire dans le sens horaire et un mouvement d'oscillation vers l'avant. En réaction, afin d'éviter une chute, la distance p doit devenir supérieure à g (situation 2). À présent, le centre de pression est davantage en avant que le centre de masse, entraînant le corps dans un mouvement oscillatoire vers l'arrière (situation 3). Toujours pour éviter de tomber, le centre de pression doit reculer (situation 4) et on se retrouve alors dans une configuration similaire au premier instant, et ainsi de suite.

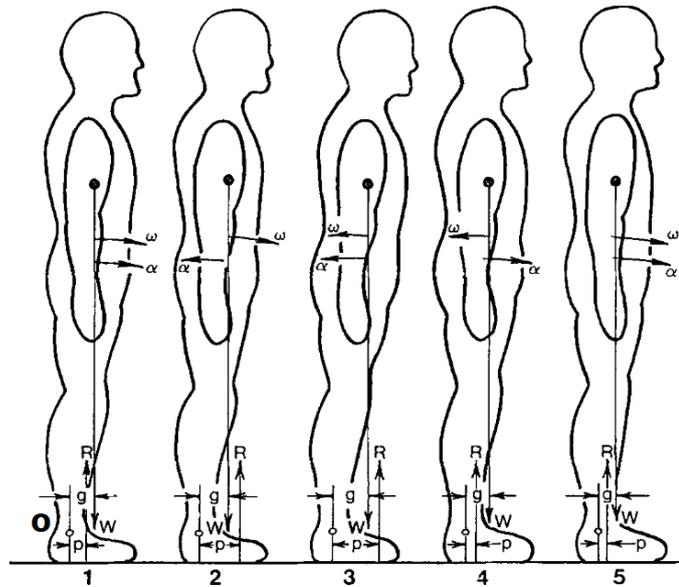


FIGURE I.18 – Différentes configurations des oscillations posturales modélisées par un pendule inverse (WINTER 1995)

Dans le cas d'un pendule inverse, l'accélération linéaire \ddot{x} du centre de masse peut être écrite sous la forme :

$$\alpha = \frac{\ddot{x}}{d} \quad (\text{I.8})$$

où d est la distance entre O et le centre de masse du système. En combinant les équations I.7 et I.8, on obtient :

$$Rp - Wg = \frac{I\ddot{x}}{d} \quad (\text{I.9})$$

W et R ayant la même intensité,

$$p - g = \frac{I\ddot{x}}{Wd} \quad (\text{I.10})$$

En introduisant une constante $K = \frac{I}{Wd}$ dépendante de l'anthropométrie du sujet, on obtient :

$$p - g = K\ddot{x} \quad (\text{I.11})$$

qui relie le déplacement du centre de pression au centre de masse et montre que leur différence est proportionnelle à l'accélération horizontale du centre de masse.

Dans le plan frontal, les oscillations médio-latérales dans des conditions de maintien de l'équilibre bipodal s'articulent autour des hanches et des chevilles (WINTER 1995). Il y aurait donc quatre moyens de contrôler le déplacement médio-latéral : inversion/éversion des chevilles et adduction/abduction des hanches. En utilisant deux plateformes de forces, il a été démontré que le mécanisme pour le contrôle de l'équilibre sur cet axe suit un schéma de chargement/déchargement des appuis au sol (WINTER 1995). Dans ce cas, le déplacement du centre de pression global au cours du temps (COP_{global}) reçoit une contribution du centre de pression du pied gauche (COP_g) et du pied droit (COP_d) pondérée par le poids total :

$$COP_{global}(t) = COP_g \frac{R_{vg}}{R_{vg} + R_{vd}} + COP_d \frac{R_{vd}}{R_{vg} + R_{vd}} \quad (I.12)$$

où R_{vd} représente la force de réaction verticale sous le pied droit et R_{vg} celle sous le pied gauche. L'équation I.12 montre qu'une augmentation de la force verticale sous un des pieds sera accompagnée d'une diminution de la même ampleur sous l'autre. Ces modèles peuvent alors être complexifiés en rajoutant des degrés de liberté au niveau d'autres articulations pour être plus représentatif des synergies articulaires (CREATH et al. 2005 ; HSU et al. 2007 ; KILBY et al. 2015) et musculaires (TORRES-OVIEDO et al. 2006 ; TING et al. 2007) existant dans le contrôle de la posture.

3.4.3 Stratégies d'équilibration

Les stratégies de contrôle postural peuvent être prédictives ou réactives (POLLOCK et al. 2000 ; SANTOS et al. 2010). Une perturbation de l'équilibre postural établi survient quand les conditions qui permettent le maintien d'équilibre sont modifiées (HORAK, S. M. HENRY et al. 1997). On parle de réponse posturale automatique ou d'ajustements posturaux par compensation quand la perturbation est externe. Elles surviennent après la perturbation et consistent en des stratégies motrices ayant pour objectif de ramener le corps dans un état d'équilibre (MASSION 1994), soit en régulant la position du centre de masse, soit en agrandissant la base de support, soit des combinaisons de ces stratégies (HORAK et MACPHERSON 1996 ; HORAK 2006 ; KANDEL et al. 2014 ; MANCINI et al. 2020). Cependant, comme elles interviennent seulement après la survenue de la perturbation, elles ne peuvent pas compenser l'entièreté de leurs conséquences (MASSION 1998).

La régulation du centre de masse suit des stratégies de chevilles et/ou de hanches, fonctions de la tâche et de l'environnement (NASHNER et MCCOLLUM 1985 ; HORAK et NASHNER 1986). La stratégie de cheville est principalement utilisée pour des corrections de faibles amplitudes sur des surfaces dures, tandis que la stratégie de hanche sera utilisée pour des perturbations externes qui nécessitent une réponse posturale plus rapide (HORAK et NASHNER 1986). En dernier recours, lorsque ni les stratégies de chevilles ou de hanches sont suffisantes, la base de support est agrandie, par exemple en effectuant un pas dans la direction de la perturbation (HORAK 1987). Néanmoins, la stratégie finalement utilisée par une personne subissant une perturbation peut être modulée car in-

fluencée par l'intention, l'expérience passée et la prévision réalisée de la gêne occasionnée (BURLEIGH et al. 1994; SANTOS et al. 2010).

3.4.4 Ajustements posturaux anticipés

Les ajustements posturaux anticipés sont présents dans une multitude de mouvements réalisés dans la vie quotidienne comme lever un bras, soulever une charge, lever une jambe, tirer sur une poignée, sauter puis atterrir (MASSION 1992; CAVALLARI et al. 2016) et pour des perturbations externes prévisibles (SANTOS et al. 2010; KRISHNAN et al. 2012). Ils sont dits anticipés, car intervenant la plupart du temps avant une perturbation de l'équilibre (BOUISSET et al. 1981; MASSION 1992; MASSION 1994; KANDEL et al. 2014). Par exemple, il a été démontré que pour lever un bras, l'activation des muscles posturaux du membre inférieurs précède l'activation des muscles dédiés à la tâche motrice (BELEN'KII 1966; BOUISSET et al. 1981; FRIEDLI et al. 1984; WOOLLACOTT et al. 1984). L'hypothèse qui a été évoquée alors est que cette pré-activation est un ajustement postural afin de minimiser la perturbation induite par le déplacement des membres supérieurs. Cela signifie donc qu'il y a un schéma de contrôle inconscient (CAVALLARI et al. 2016), où une prédiction des conséquences de la perturbation est réalisée en amont et qu'une stratégie spécifique est mise en place pour la contrer avant même qu'elle ne survienne (FRIEDLI et al. 1984; MASSION 1998). Après le mouvement du bras, les muscles du tronc et des membres inférieurs sont de nouveaux actifs dans leur schéma réactif pour encore plus stabiliser le corps suite au mouvement réalisé.

Dès lors qu'il y a un mouvement volontaire, par les segments qui sont déplacés, la position du centre de masse est modifiée, menaçant potentiellement l'équilibre (MASSION 1992; MASSION 1994; HORAK et MACPHERSON 1996; HORAK 2006). Ainsi, tout mouvement volontaire est accompagné par un ajustement postural (ARUIN et LATASH 1995), avec un recrutement de muscles posturaux spécifiques en fonction de la tâche (CORDO et al. 1982). Les synergies d'activation musculaires mises en place par anticipation sont les mêmes que celles observées dans des stratégies réactives d'équilibration (NASHNER 1977), avec d'abord le membre inférieur, puis le tronc avant les muscles préposés au mouvement demandé (CORDO et al. 1982), témoignant d'une synergie neuromusculaire préprogrammée. Les ajustements posturaux anticipés auraient finalement trois fonctions principales, minimisation des conséquences d'une perturbation sur l'équilibre et l'orientation posturale, préparation à un mouvement futur, assistance à un mouvement en termes de force ou de vitesse (MASSION 1992; MASSION 1998; A. BRONSTEIN et al. 2004). La participation au maintien de l'équilibre s'effectue d'une part en régulant par avance la position du centre de masse, et d'autre part avec le maintien d'une orientation des segments importants pour la posture comme la tête et le tronc pour garder leurs valeurs de référence (MASSION 1992).

De plus, des ajustements posturaux anticipés ont été également détectés dans les muscles appartenant au même membre préposé au mouvement (CAVALLARI et al. 2016). Par exemple, pour une flexion de poignet (AOKI 1991) ou une flexion de doigts (CARONNI et CAVALLARI 2009), des ajustements posturaux anticipés sont présents dans les membres supérieurs afin de stabiliser le bras. Ces ajustements intra-segmentaire ont le même objectif, le même mode de contrôle et les mêmes propriétés que les ajustements inter seg-

mentaires (CAVALLARI et al. 2016). Ainsi, les ajustements posturaux anticipés inter et intra-segmentaires permettent pendant une tâche motrice de coordonner posture, mouvement, équilibre (MASSION 1992) et précision (CARONNI, BOLZONI et al. 2013) grâce à un couplage complexe entre la commande de contrôle postural et la commande motrice (MANCINI et al. 2020).

Dans des tâches demandant une précision supplémentaire à un mouvement, comme par exemple pointer une cible, les caractéristiques des ajustements posturaux ont été démontrées comme dépendantes de la difficulté de la tâche, à savoir taille de la cible (BONNETBLANC et al. 2004; NANA-IBRAHIM et al. 2007; BERTUCCO et al. 2010) ou viser en étant assis ou debout (BERRIGAN et al. 2006), avec un compromis entre vitesse et précision déterminée dès la planification du mouvement (DUARTE et al. 2007). Dans des tâches de pointage en position debout où une coordination entre le tronc et le bras est nécessaire, une taille plus réduite de la cible suggère une régulation plus fine du centre de pression permettant un meilleur contrôle de la main (BERRIGAN et al. 2006).

Au tir à l'arc, pendant la phase de visée, l'archer recherche à limiter ses oscillations posturales. Lorsqu'il lâche la corde, une perturbation de cet équilibre ce produit. L'énergie potentielle élastique stockée dans les branches est transmise à la flèche et son éjection entraîne un recul de l'arc. Pour maintenir l'équilibre et limiter cette perturbation, des ajustements posturaux anticipés pré-programmés devraient se produire avant ou en même temps que le lâcher de corde.

3.4.5 Évolution via la pratique sportive

Les capacités de contrôle postural se développent avec l'âge (HYTÖNEN et al. 1993; MALLAU et al. 2010; ASSAIANTE et al. 2014) jusqu'à un certain point avant de décliner autour de 60 à 70 ans (HYTÖNEN et al. 1993; BALOH et al. 1998; ABRAHAMOVA et al. 2008; M. HENRY et al. 2019). Elles peuvent aussi être affectées par certaines maladies (HORAK, S. M. HENRY et al. 1997; ST GEORGE et al. 2018) ou encore stimulées artificiellement (NASHNER et WOLFSON 1974; KAVOUNOUDIAS et al. 1999). Chez des jeunes sujets en bonne santé, c'est probablement la pratique d'une activité physique, sans sur-sollicitation de l'organisme (PAILLARD 2012), qui permet de modifier durablement l'équilibre postural (PAILLARD 2017).

La réalisation d'une performance sportive, peu importe la discipline, suppose un contrôle de la posture optimisé acquis après maintes répétitions de la même tâche motrice dans un environnement donné (MASSION 1992; HORAK 2006). Cette optimisation s'affine au fil de l'entraînement avec l'amélioration de la prise en compte des contraintes internes et externes pour produire le mouvement (MASSION 1992), comme par exemple les positions successives du corps dans l'espace, les activations musculaires qui permettent d'y parvenir, ou encore le type de surface, les obstacles éventuels, le vent. De nouvelles stratégies neuronales sont alors développées, améliorées et mémorisées, afin que le geste devienne automatique (SMETACEK et al. 2004). L'ensemble de ces facteurs contribuent

aux voies sensorielles de l'équilibre, qui s'adaptent et se spécialisent en privilégiant une voie plutôt qu'une autre (PAILLARD 2017).

Un entraînement spécifique et régulier dans une tâche donnée d'équilibre permet d'améliorer la performance de cette tâche spécifiquement (KÜMMEL et al. 2016) et également d'une façon générale en développant des adaptations fonctionnelles de la posture (BEHM et al. 2015). Dans de multiples disciplines sportives comme le judo (PERRIN et al. 2002), la danse (CROTTS et al. 1996), les études de posturographie ont montré un meilleur maintien de la posture debout chez les pratiquants réguliers. De plus, le temps passé sur l'apprentissage est également un facteur de performance (LESINSKI et al. 2015). Il n'est donc pas surprenant que le maintien de la station debout présente de meilleures caractéristiques d'oscillations posturales chez des sportifs élités pratiquant de façon régulière des sports de tirs. En tir à l'arc (STAMBOLIEVA et al. 2015) ou en tir au pistolet (AALTO et al. 1990), la vitesse et l'amplitude des oscillations sont plus faibles avec et sans vision que des sujets normaux. Cela suggère que ce sont plutôt les contributions proprioceptives et vestibulaires qui se sont développées chez ces sportifs. Une spécificité supplémentaire du tir à l'arc est l'orientation de la tête vers la cible alors que le corps est de profil. Cette configuration nécessiterait une adaptation du schéma interne afin de prendre en compte cette contrainte (V. S. GURFINKEL et al. 1988).

De la même manière, la faculté de réaliser des ajustements posturaux se développe avec le temps (HAAS et al. 2008). Les caractéristiques des ajustements dépendent de plusieurs facteurs liés au mouvement réalisé, à savoir son amplitude (ARUIN et LATASH 1995; ARUIN et LATASH 1996; ARUIN, FORREST et al. 1998; LE PELLECC et al. 1999; ARUIN et SHIRATORI 2004), sa vitesse (HORAK, ESSELMAN et al. 1984; DUARTE et al. 2007; BERTUCCO et al. 2010), sa direction (ARUIN et LATASH 1995; AOKI 1991; CARONNI et CAVALLARI 2009). La réponse posturale anticipée dépend aussi entre autres de l'expérience passée dans la tâche réalisée (HORAK, DIENER et al. 1989; HORAK 2006; L. M. HALL et al. 2010) et peut donc être améliorée. En effet, via la pratique et l'entraînement, le système nerveux est capable d'anticiper précisément les conséquences mécaniques d'une perturbation (HORAK et MACPHERSON 1996; KANDEL et al. 2014), et ce après seulement quelques répétitions d'un même mouvement.

3.5 Bilan

Pour performer lors de grandes compétitions, les archers doivent avoir une maîtrise répétable et fine de leur posture de manière à limiter leurs oscillations posturales. Dans la temporalité d'une séquence de tir, il est possible de distinguer la phase de visée de la phase de tir. Dans la première, un archer cherche à limiter ses oscillations posturales lui permettant d'être plus stable au niveau de la visée et d'être plus précis. Dans la seconde, l'archer est plus actif en lâchant la corde, créant un contexte de perturbation induite volontairement. Le recul de l'arc provoqué par l'éjection de la flèche crée un déséquilibre postural qui tranche avec la phase de visée. Pour le compenser, les archers devraient avoir intégré les conséquences mécaniques de cette perturbation et avoir développé des ajustements posturaux anticipés pour les limiter. De plus, les caractéristiques de ces ajustements

pourraient être différentes selon le niveau d’expertise des archers et contribueraient à la différence de niveau.

4 Précision et répétabilité

4.1 Sources d’erreurs

À travers la présentation des différents éléments du tir à l’arc, il est possible de constater que la performance dans ce sport est dépendante de différents paramètres. Ceci implique que les sources d’erreurs peuvent provenir de multiples origines aussi bien matérielles, qu’humaine ou encore environnementale. Une étude (J. L. PARK 2014) propose une liste d’erreur possible ainsi que leur influence sur la dispersion de la flèche en cible.

Cette liste, présentée sur la Figure I.19, présume déjà que l’arc est bien réglé pour les arcs classiques recurve, mais pas pour les arcs à poulies où le réglage des poulies apparaît. En revanche, les flèches qui sont tirées possèdent des propriétés mécaniques différentes, avec une masse et une raideur variable (J. L. PARK 2021a). En complément, on peut aussi mentionner le diamètre (J. L. PARK 2011b) et la rectitude (J. L. PARK, AITCHISON et al. 2018) des futs qui auront une conséquence sur sa phase aérienne.

Variable	Error	Impact versus distance
X-axis displacement	Draw length variation	Linear
	Aiming error	Linear
Y-axis displacement	Moving at release	Linear
	Arrow mass variation	Linear
	Arrow stiffness variation	Linear
	Nose contact with the string (compound)	Linear
	Cam timing (compound)	Linear
	Anchor position variation	Linear
	Variable finger pressure (recurve)	Linear
	Incorrect sight setting	Linear
Z-axis displacement	Aiming error	Linear
	Moving at release	Linear
	Wind drift	Quadratic
	Arrow stiffness variation	Linear
	Face contact with the string	Linear
	Variable speed of release (recurve)	Linear
	Incorrect sight setting	Linear
	Bow cant variation	Quadratic
X-axis rotation	Bow torque variation (incorrect hand position)	Linear
Y-axis rotation	Hand position vertically	Linear
Z-axis rotation		

FIGURE I.19 – Sources d’erreur au tir à l’arc (J. L. PARK 2014), l’axe x représente l’axe du tir, y l’axe vertical et z l’axe horizontal. En vert les erreurs spécifiques aux arcs à poulies, en bleu celles liées à l’archer et à sa technique, en jaune celles liées au matériel et en rouge les conditions extérieures.

Parmi les erreurs liées à l’environnement, il y a le vent qui va influencer sur la flèche pendant sa phase aérienne, surtout si sa traînée est importante (MADDALENA 2020). En plus, le vent peut potentiellement perturber l’équilibre postural de l’archer pendant sa phase de visée si des fortes bourrasques sont présentes sur le pas de tir, comme par exemple lors des derniers Jeux Olympiques à Tokyo (ORTIZ, ANDO et al. 2020). Par conséquent, pour limiter l’influence du vent sur une flèche, il faut soit augmenter sa vitesse, soit sa

masse (ORTIZ, ANDO et al. 2020), soit jouer sur la taille de l'empennage (MIYAZAKI, MATSUMOTO et al. 2017; MADDALENA 2020; ORTIZ, SERINO et al. 2020). Malgré toutes les mesures préventives, le vent restera toujours un élément extérieur que l'archer ne pourra pas contrôler, mais au mieux atténuer. L'expertise d'un archer, en plus des paramètres biomécaniques ou psychologique, englobe également la capacité à s'adapter au vent et à pouvoir tirer dans des conditions dégradées (J. L. PARK 2021b).

Enfin, il y a les erreurs liées à l'archer et à sa technique. Parmi les sources d'erreurs proposées, certaines sont résolues par des outils qu'utilisent les archers, comme le clicker par exemple, qui permet de limiter les variabilités causées par l'allonge de l'arc non répétable. Au niveau de l'arc, selon un modèle établi par LAU et al. 2018 des variations de l'ordre de 2 à 5° autour de l'axe de tir peuvent contribuer à une perte 0,6 points par flèche, ce qui n'est pas négligeable du tout à haut niveau. Concernant la rotation de l'arc le long de l'axe vertical, 0,05° d'écart sont suffisants pour perdre 1 point (J. L. PARK 2013). Les autres sources d'erreurs sont du domaine de l'équilibre postural de l'archer que l'expertise permet de maîtriser (MASON et PELGRIM 1986; SIMSEK, CERRAH, ERTAN et al. 2019; TAHA et al. 2017) afin de limiter la dispersion des flèches en cible.

Devant toutes les sources d'erreurs possibles, il est difficile dans toutes les études expérimentales de parvenir à isoler tel ou tel paramètre pouvant influencer sur la performance, sachant qu'elle dépend aussi de la répétabilité des archers (HELLER 2012; CALLAWAY et al. 2017; CLARYS et al. 1990; MARTIN, SILER et al. 1990; LEROYER et al. 1993; SQUADRONE, RODANO et GALLOZZI 1994; SOYLU et al. 2006; QUAN et al. 2017).

4.2 Machine de tir

Pour s'affranchir de la variabilité causée par l'humain, des mécanismes de tirs ont été développés pour étudier les flèches dans la phase aérienne. De telles machines existent depuis au moins 1986 (J. W. PARK et al. 2016) et ont été mentionnées dans certaines études (KOOI 1998; J. L. PARK 2011c; J. L. PARK 2011a; BARTON et al. 2012; MEYER 2015; J. L. PARK 2021a; EREN, ROMANS et al. 2021). Certaines s'affranchissent même de l'arc en propulsant les flèches à l'aide d'un système de compression électrique permettant de faire varier les vitesses d'éjection (MIYAZAKI, MUKAIYAMA et al. 2013). Cependant, un tel système ne peut pas permettre une reproduction fidèle du comportement de la flèche en vol.

Une machine permettant de tirer avec un arc ('Spott hogg hooter shooter') est commercialisée et disponible sur des sites de fournisseurs de matériel de tir à l'arc ^{10 11 12 13} pour un montant légèrement supérieur à 2500 euros. La machine permet de fixer un arc, de tendre puis de lâcher la corde sans que l'humain ait besoin de tenir l'arc à bout de bras.

Accès juillet 2022

10. <https://theacheryshop.co.uk/spott-hogg-hooter-shooter>

11. <https://www.abbeyarchery.com.au/p/SHHS/Spot-Hogg+Hooter+Shooter+Bow+Tuning+Machine.html>

12. <https://www.elizaarchery.com/spot-hogg-hooter-shooter>

13. <https://www.hattila.com/fr/autres-materiels/3842-spot-hogg-hooter-shooter.html>

Cependant, cette machine est seulement conçue pour les arcs à poulies, qui possèdent un mécanisme de déclenchement de type crochet (Figure I.11b droite) et ne permet donc pas de répliquer le mouvement latéral de la corde sur des lâchers effectués en arc classique. Cette machine de tir est utilisée dans des études de balistique pour tester l'influence des propriétés des flèches (J. L. PARK, AITCHISON et al. 2018), des nouveaux systèmes de mesures embarqués dans les flèches directement (BARTON et al. 2011), mais également plus récemment sur des études expérimentales balistiques portant sur des projectiles préhistoriques (LOWE et al. 2019; WERNER et al. 2019; SITTON et al. 2020; EREN, BEBBER et al. 2022).

Même parmi les prototypes non commercialisés, la plupart des études avec machine de tir se sont effectuées sur des arcs à poulies (J. L. PARK 2011c; J. L. PARK 2011a; J. L. PARK 2021a) ou sur des arcs classiques recurve mais avec un déclencheur (K. B. LIN et al. 2009; J. L. PARK 2013). Des prototypes non commercialisés sont également utilisés dans plusieurs études, parfois sans détails sur leur mode de fonctionnement. Ce type de dispositif permet de reproduire des vitesses d'éjection de la flèche avec un écart-type d'environ 0,06 m/s (K. B. LIN et al. 2009). D'après un modèle balistique simplifié qui sera présenté dans la section II.3.2.5, pour des vitesses d'éjections typiques d'une flèche, une variation de cet ordre représenterait entre 0,8 et 1,3 centimètre d'écart vertical en cible à 70 mètres.

Une seule étude présente une machine utilisant un arc classique et disposant d'un système de décochage répliquant les doigts d'un archer (OHARA et al. 2020), automatisé et programmé pour lâcher la corde après la tombée du clicker dans un temps similaire aux humains (150 millisecondes). La machine présentée permet dans des conditions non venteuses de placer 10 flèches tirées dans le disque qui représente la zone des 10 points (12,2 centimètres de diamètre) à 18 mètres, et peut être utilisée pour identifier des mauvaises flèches ou des bonnes flèches à 70 mètres. Parmi les deux mauvaises flèches qu'incluait l'étude, une avait une plume qui manquait, et la raison de la catégorisation en mauvaise flèche de la deuxième n'a pas été fournie.

Dans le travail réalisé pendant cette thèse, une machine de tir créée par Jérôme Trouillet¹⁴ et appartenant à la Fédération Française de Tir à l'Arc a été utilisée. Le mécanisme de fonctionnement de cette machine sera présenté dans la section II.4.2.3. Les entraîneurs s'en servent de façon analogue à l'usage qui est présenté dans OHARA et al. 2020, mais aussi pour ajuster des réglages sur les arcs, avec l'avantage de retirer le biais humain qui existe pour la méthode de tri décrite dans la section I.2.2.3. Cet emploi reste empirique avec une méthode d'essai-erreur selon leur expertise, mais également plus chronophage que le tri par un archer même et par conséquent usité avec parcimonie avant les grandes compétitions principalement.

4.3 Bilan

En complément de la complexité de réglage du matériel, le tir à l'arc est soumis à la variabilité humaine. Dans l'optique d'un processus de sélection de flèches montées, il est

14. <https://atelier-ecap.monsite-orange.fr/index.html> (Accès octobre 2022)

possible d'enlever le bruit humain en utilisant une machine de tir. Cependant, ce procédé empirique est long et ne répond pas totalement au souhait des entraîneurs d'avoir des critères objectifs de sélection des futs en amont du montage des flèches.

5 Conclusion

Le tir à l'arc est une discipline dans laquelle précision et répétabilité sont les deux composantes que les archers recherchent afin de planter flèche après flèche dans le mille à une distance de 70 mètres. La performance dans ce sport est multifactorielle. Elle dépend à la fois du matériel utilisé, de la technique de l'archer et des conditions extérieures. Au cours de cette thèse, nous nous sommes intéressés à la fois aux composantes matérielles et humaines de cette discipline en intégrant les problématiques des entraîneurs et des archers de l'équipe de France.

Concernant le matériel, les procédés de fabrication complexes des composants formant les arcs et les flèches ne permettent pas de combler totalement les attentes des entraîneurs et des archers. Deux axes mériteraient d'être approfondis : le choix des branches pour la partie arc, et la sélection des futs ainsi que l'influence du montage pour la partie flèche. Ces deux points seront abordés dans le chapitre II.

En complément du matériel, la précision et la répétabilité dépend également de l'archer. La caractérisation des déterminants de la performance pendant la phase de visée et pendant la phase de tir ont été traitées sans s'intéresser à un mécanisme d'anticipation existant dans la théorie du contrôle postural. L'investigation des stratégies d'équilibre pendant ces deux phases semble nécessaire et sera présentée dans le chapitre III.

Chapitre II

Matériel

1 Introduction

Le tir à l'arc est un sport multi-paramètres où le matériel prend une place non négligeable dans la performance à haut-niveau et sa maîtrise permet d'éviter qu'il ne soit source d'erreurs (Figure I.19). Cela passe par une maîtrise et une connaissance parfaite du matériel qu'utilisent les archers et une recherche constante et souvent empirique d'une combinaison d'éléments, de réglages qui leur conviendraient. Les améliorations apportées à leur dispositif sont spécifiques à chaque archer, en fonction de leur morphologie, de leur technique et parfois inspirées par d'autres grands champions en tir à l'arc.

Parmi les composants d'un arc que les archers sont amenés à tester et à changer figurent les branches d'arc. Le choix de cet élément est essentiel car c'est grâce à ses propriétés mécaniques que les flèches peuvent être projetées vers la cible (section I.2.1.1). Ces flèches justement, dont le nombre tiré par un archer de haut niveau au cours d'une année se compte par dizaine de milliers, ont un processus de fabrication inhérent à leur composition qui ne permet pas d'assurer l'exacte similitude entre elles. Devant la multitude de paramètres qui influent sur sa trajectoire (section I.2.2), il semble important, en amont du montage, de pouvoir améliorer le processus de sélection des futs qui permettraient d'obtenir un meilleur groupement en cible.

La caractérisation du matériel utilisé par les archers devient alors une nécessité afin de pouvoir fournir des critères objectifs pour orienter les choix des entraîneurs vers un matériel optimisé, dans l'optique de l'amélioration de la performance. Cette étape passe par l'utilisation de bancs de mesures d'arc et de mesure de futs de flèches permettant de mesurer, contrôler et comparer les caractéristiques du matériel. Une fois ces mesures réalisées, des tirs seront effectués à l'aide d'une machine de tir afin d'établir les paramètres les plus importants à considérer dans l'optique d'une performance optimisée.

2 Caractérisation des arcs

2.1 Introduction

Les principaux fabricants de poignées et de branches pour le tir à l'arc sont américains (Hoyt) et coréens (Win&Win, Samick Sports). À eux trois, ils détiennent 75% du marché mondial et ont équipé la quasi-totalité des médaillés olympiques depuis la réintroduction du tir à l'arc aux Jeux Olympiques en 1972 (J. W. PARK et al. 2016). C'est donc sans surprise que Hoyt et Win&Win équipent une grande partie des archers de haut niveau français. En plus de ces fabricants majeurs, deux autres marques sont représentées au Pôle France : Fivics (Corée) et Uukha (France). Une des contraintes imposées par les fournisseurs principaux afin de conserver leur marché est l'incompatibilité des branches d'une marque avec la poignée de la marque concurrente. En revanche, les branches produites par les plus petits fabricants que sont Fivics et Uukha peuvent être utilisées avec une poignée de la marque Win&Win.

Le matériel proposé dans le commerce est fourni avec une caractéristique de taille et de force mesurée à une allonge standardisée (section I.2.1.1). Mais l'énergie potentielle élastique emmagasinée lors de la phase d'armement est dépendante de l'allonge d'un archer et du profil de la force nécessaire pour atteindre cette allonge. Les archers du Pôle France ont alors légitimement des interrogations sur les caractéristiques mécaniques des branches avec lesquelles ils vont tirer. Entre autres, les questionnements qu'ils peuvent avoir portent sur la force qu'ils doivent déployer à l'allonge maximale, l'énergie potentielle élastique qui en résulte, la raideur des branches en fin d'allonge. En ce sens, une étude a été menée pour évaluer les différences entre les branches des fabricants représentés au sein des archers élités français.

2.2 Matériel et Méthodes

2.2.1 Banc de mesure d'arc

Afin de caractériser les branches d'arc, un banc de mesure automatisé a été conçu par le Centre d'Analyse d'Images et Performance Sportive. Cet appareil permet la mesure de la force de l'arc en fonction de l'allonge de la corde, en utilisant un capteur d'effort et un moteur commandé en position qui vient tendre la corde de l'arc au moyen d'un câble (Figure II.1).

Selon les normes de mesures (ARCHERY TRADE ASSOCIATION 2009), l'allonge standard a_s pour obtenir la force de l'arc par les fabricants est de 71,1 centimètres, à partir d'un point situé 4,4 centimètres (1 pouce $\frac{3}{4}$ ¹⁵) en avant du grip (Figure II.2 gauche). Cette norme est critiquable car elle ne prend pas en compte l'allonge à vide a_0 de l'arc. Cette longueur, aussi appelée 'band', représente la distance entre le grip et la corde lorsque l'arc est non armé (Figure II.2 centre), qui dépend du réglage effectué par les archers sur

15. 1 pouce = 2,54 cm

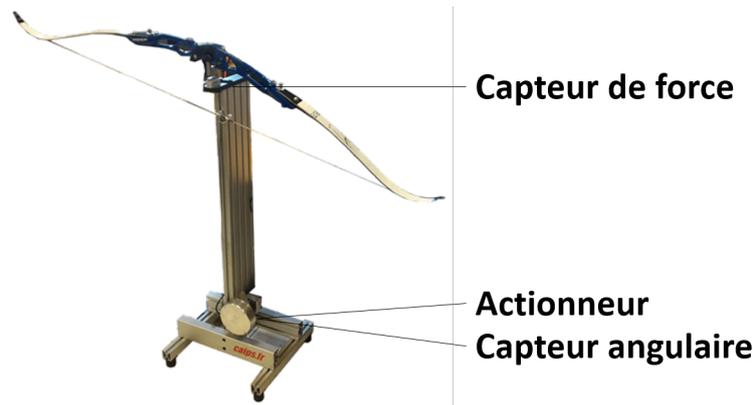


FIGURE II.1 – Banc de mesure d'arc

l'inclinaison des branches I.2.1.1. D'une poignée à une autre, ce réglage standard peut être également différent, ce qui rend les comparaisons de branches plus délicates.

La mesure qui est réalisée par le banc de mesure a donc été adaptée afin de prendre en compte l'évolution de la force de l'arc seulement dans une condition d'utilisation sous charge, c'est-à-dire entre l'allonge à vide a_0 et l'allonge maximale d'utilisation a_{max} spécifique à chaque archer. Le banc de mesure étant commandé en position, il est nécessaire de donner le point de départ pour l'automate, correspondant à l'allonge à vide, et le point où il s'arrête, qui est l'allonge maximale. L'allonge de l'archer a_T est calculé par la différence entre allonge maximale et allonge à vide (Figure II.2 droite).

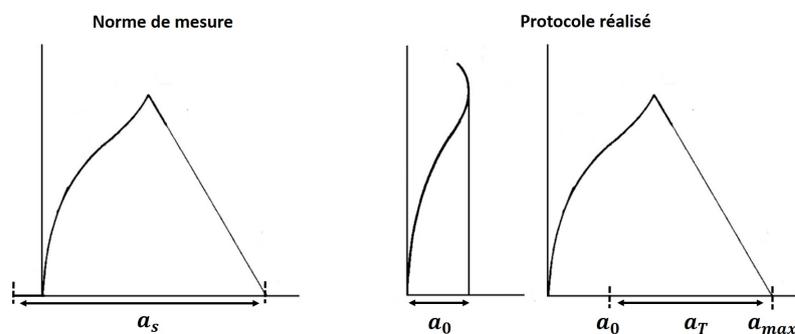


FIGURE II.2 – Différentes configurations d'un arc classique, adapté de KOOI 2019. À gauche, la norme de mesure (ARCHERY TRADE ASSOCIATION 2009) avec une allonge standard a_s de 71,1 centimètres à partir d'un point situé 4,4 centimètres en avant du grip. Au centre l'arc au repos, mesure de l'allonge à vide a_0 . À droite, arc à l'allonge maximale a_m de l'archer et allonge totale a_T .

Dans un premier temps, une fois l'arc positionné, le câble accroché sur la corde est tiré par incréments d'un millimètre, jusqu'à obtenir une valeur non nulle affichée sur le capteur de force. L'allonge à vide sera alors la valeur précédant cet instant-là. Ensuite, afin d'obtenir l'allonge maximale, une flèche appartenant à l'archer, découpée à son allonge, est positionnée sur l'arc. De façon sécurisée, la corde est tendue jusqu'à atteindre l'allonge de l'archer, exactement à la tombée du clicker (Figure II.2 droite). La position de départ et de fin de l'automate étant connue et spécifique à chaque archer, on procède dans un

second temps à une mesure de cinq cycles de chargement-déchargement de l'allonge à vide jusqu'à l'allonge maximale. Les calculs sont par la suite effectués à partir de la moyenne des cinq cycles de mesures.

2.2.2 Caractéristiques des branches d'arc

Les propriétés mécaniques de quatorze paires de branches utilisées par des archers du Pôle France (9 ♂, 5 ♀) de quatre marques M différentes (Hoyt, Win&Win, Fivics, Uukha) ont été obtenues avec le banc de mesure. Les branches mesurées possédaient deux tailles T différentes notées T1 pour celles de 173 centimètres (68 pouces¹⁶) et T2 pour celles de 178 centimètres (70 pouces), ainsi que 5 forces F notées F1 (178 newtons soit 40 lbf¹⁷), F2 (187 newtons, soit 42 lbf), F3 (205 newtons, soit 46 lbf), F4 (222 newtons, soit 50 lbf) et F5 (231 newtons, soit 52 lbf). Pour l'ensemble de ces branches, la valeur fournie par les fabricants pour la force F_c est mesurée à une allonge standardisée (section I.2.1.1).

Les caractéristiques de chacune des branches, leur montage et l'allonge dans leur condition d'utilisation sont répertoriées dans la Table II.1. Pour les mesures sur le banc d'arc, deux poignées d'arc standardisées (Hoyt et Win&Win), chacune équipée d'un clicker, ainsi que deux cordes standardisées (T1 et T2) ont été utilisées. La mesure s'effectuera par conséquent sur un arc formé par les branches des archers, associées à la poignée compatible et à la corde de la taille adéquate.

M	F	T	♂/♀	a_T (mm)	a_{max} (mm)	M	F	T	♂/♀	a_T (mm)	a_{max} (mm)		
1	HOYT	F2	T2	♂	501	721	8	W&W	F4	T1	♂	467	699
2	W&W	F4	T1	♂	493	720	9	HOYT	F3	T2	♂	523	742
3	W&W	F4	T2	♂	522	749	10	FIVICS	F3	T1	♀	450	682
4	W&W	F1	T1	♀	449	664	11	HOYT	F5	T2	♂	524	737
5	W&W	F1	T1	♀	462	695	12	W&W	F3	T2	♂	547	748
6	HOYT	F1	T2	♀	580	690	13	FIVICS	F4	T2	♂	557	752
7	HOYT	F4	T2	♂	467	801	14	UUKHA	F1	T1	♀	461	683

TABLE II.1 – Caractéristiques des quatorze paires de branches mesurées. M : marque, F : forces, T : taille des branches, a_T : allonge totale, a_{max} : allonge maximale

2.2.3 Paramètres recherchés

Plusieurs paramètres caractérisant les branches sont obtenus. La force de l'arc $F(a)$ est non constante et évolue fonction de l'allonge a . En se plaçant dans le cas d'une force conservative sans perte liée aux frottements, le travail de l'arc équivaut à l'énergie potentielle élastique emmagasinée $E_p(a)$, soit :

$$E_p(a) = \int_{a_0}^a F(a) da \quad (\text{II.1})$$

Pour une allonge donnée, l'efficacité des branches $\eta(a)$ est calculée par la formule suivante :

16. 1 pouce = 2,54 cm

17. 1 lbf = 4,45 N

$$\eta(a) = \frac{E_p(a)}{F(a)} \quad (\text{II.2})$$

Dans les conditions d'utilisation des branches, $F(a_{max})$, $E_p(a_{max})$ et $\eta(a_{max})$ caractérisent respectivement la force, l'énergie potentielle élastique et l'efficacité des branches à l'allonge maximale a_{max} des archers.

L'allonge totale des archers étant différente pour chaque branche, à des fins de comparaison, une allonge minimale $a_{min} = 440$ mm commune à l'ensemble des branches toutes tailles confondues a été choisie (Table II.1). Ainsi, $F(a_{min})$, $E_p(a_{min})$ et $\eta(a_{min})$ correspondent respectivement à la force, l'énergie potentielle élastique et l'efficacité des branches à cette allonge minimale.

Pour caractériser la raideur en début d'allonge, les 250 derniers millimètres de l'allonge total sont considérés, discrétisés en 5 intervalles de 50 millimètres chacun, notées I_1 à I_5 . Pour l'ensemble des branches, ces cinq intervalles représentent plus ou moins la première moitié de leur cycle d'allonge (Table II.1). Pour caractériser la raideur en fin d'allonge, ce sont les 250 derniers millimètres qui sont considérés, sur 5 intervalles de 50 millimètres chacun, notées I_6 à I_{10} . Sur chaque intervalle, la raideur $r(I_i)$ est alors donnée par :

$$r(I_i) = \frac{F(a_f) - F(a_d)}{a_f - a_d} \quad (\text{II.3})$$

avec a_d l'allonge de début sur l'intervalle I_i , a_f l'allonge de fin sur ce même intervalle, $F(a_d)$ la force mesurée à l'allonge a_d et $F(a_f)$ la force mesurée à l'allonge a_f .

2.3 Résultats

2.3.1 Force à allonge maximale

Le premier constat que l'on peut établir porte sur les différentes valeurs de $F(a_{max})$ au sein d'un même groupe de force, ainsi que l'écart entre la force qu'indique le fabricant sur les branches F_c par rapport à $F(a_{max})$ de chaque archer. Ceci est attendu, car pour un arc classique la force nécessaire pour tendre la corde est dépendante de l'allonge, or cette dernière est spécifique à chaque archer.

	F_c (N)	$F(a_{max})$ (N)		$F_{\%dif}$	
F1	177,9	178,6±5,2	14,4 [174,0 184,4]	0,4±2,9	5,8 [-2,2 3,6]
F2	186,8	195,1		4,4	
F3	204,6	206,4±1,5	3,1 [204,9 208,0]	-1,0±1,6	3,7 [-2,3 1,4]
F4	222,4	220,1±3,5	8,4 [217,2 225,6]	0,9±0,8	1,5 [0,2 1,7]
F5	231,3	229,6		-0,7	

TABLE II.2 – Différences des forces à allonge maximale $F(a_{max})$ et forces commercialisées F_c . Moyenne ± écart-type, étendue [minimum maximum] si plusieurs arcs.

Dans la Table II.2, sont référencées les valeurs des forces obtenues avec le banc de mesure des branches pour les cinq groupes de forces, avec $F_{\%dif}$ le pourcentage de différence entre la force indiquée par le fabricant et la force mesurée à l'allonge de l'archer. Pour l'ensemble des branches, la force mesurée est proche de celle annoncée par les fabricants ($-0,2 \pm 2,2\%$). Par rapport aux valeurs fabricants, parmi les groupes comportant plusieurs arcs, la plus grande hétérogénéité se trouve dans le groupe avec la force la plus faible F1.

Les profils de forces des branches mesurées en fonction de l'allonge sont représentés sur la Figure II.3. Pour l'ensemble des branches, l'allure globale des courbes de forces est similaire, monotone croissant jusqu'à l'allonge maximale de l'archer, avec une augmentation rapide de la force au début du cycle d'allonge jusqu'à environ un tiers du cycle, suivi d'un comportement quasi linéaire jusqu'à l'allonge totale. Les valeurs de forces mesurées pour les archers français varient entre 174,0 et 229,3 newtons, avec une moyenne pour les hommes de $215,4 \pm 10,8$ newtons et pour les femmes de $184 \pm 13,2$ newtons.

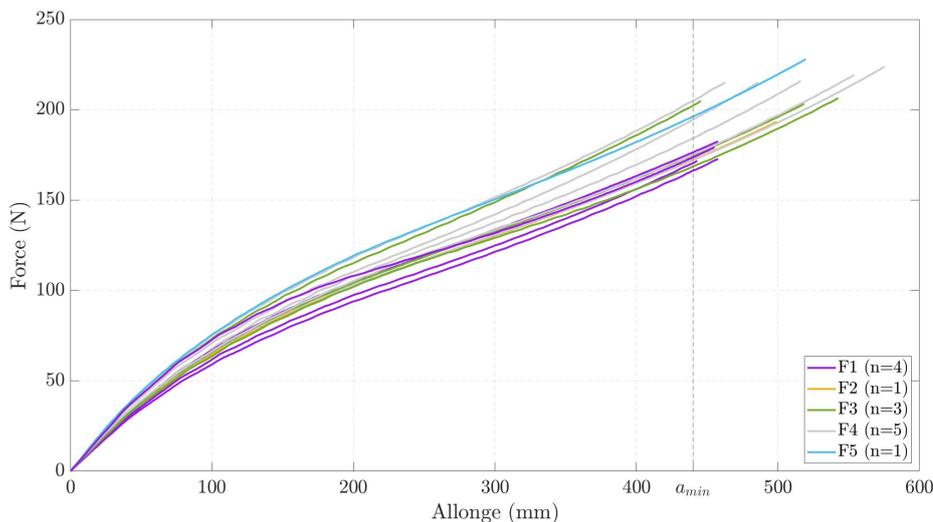


FIGURE II.3 – Profil de forces des branches en fonction de l'allonge. Le trait pointillé vertical représente l'allonge minimale a_{min}

2.3.2 Énergie potentielle élastique

Les branches sont commercialisées en fonction de leur force et de leur taille, néanmoins, il s'agit plutôt de l'énergie potentielle accumulée dans les branches qui permet de prédire la vitesse théorique d'éjection de la flèche. L'évolution de cette énergie sur le cycle d'allonge est présentée sur la Figure II.4. L'allure des courbes est semblable pour toutes les branches, augmentation relativement faible jusqu'au tiers du cycle, puis une accumulation d'énergie de plus en plus grande. Les valeurs mesurées pour les archers français varient entre 44,5 et 72,3 joules, avec une moyenne pour les hommes de $63,7 \pm 5,6$ joules et pour les femmes de $48,6 \pm 3,5$ joules. En supposant une conversion totale de l'énergie potentielle en énergie cinétique, la vitesse d'éjection théorique d'une flèche de masse m

s'écrit $v_i = \sqrt{\frac{2E_p}{m}}$. Pour une flèche moyenne de 27 grammes, les vitesses obtenues se situent entre 57,4 et 73,2 m/s pour un temps de vol compris autour d'une seconde seulement pour traverser le pas de tir olympique de 70 mètres.

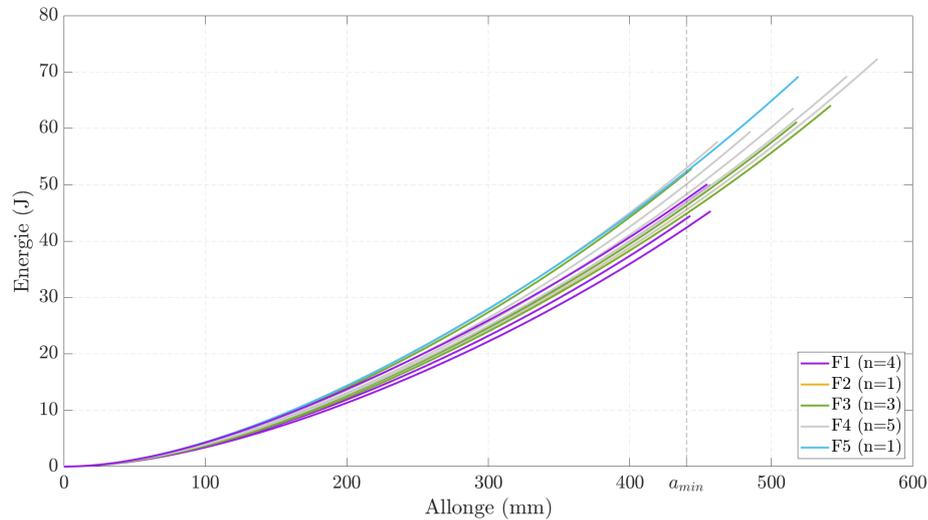


FIGURE II.4 – Profil de l'énergie potentielle des branches en fonction de l'allonge. Le trait pointillé vertical représente l'allonge minimale a_{min}

Sur la Figure II.5 est représentée l'énergie potentielle élastique à l'allonge maximale des branches mesurées en fonction de la force de l'arc (gauche) et de l'allonge totale (droite). La couleur des points correspond aux cinq forces d'arc (F1 à F5), le contour correspond aux deux tailles d'arc (T1 et T2), la forme correspond aux quatre différentes marques. Le même code couleur sera appliqué sur la Figure II.6 et II.9.

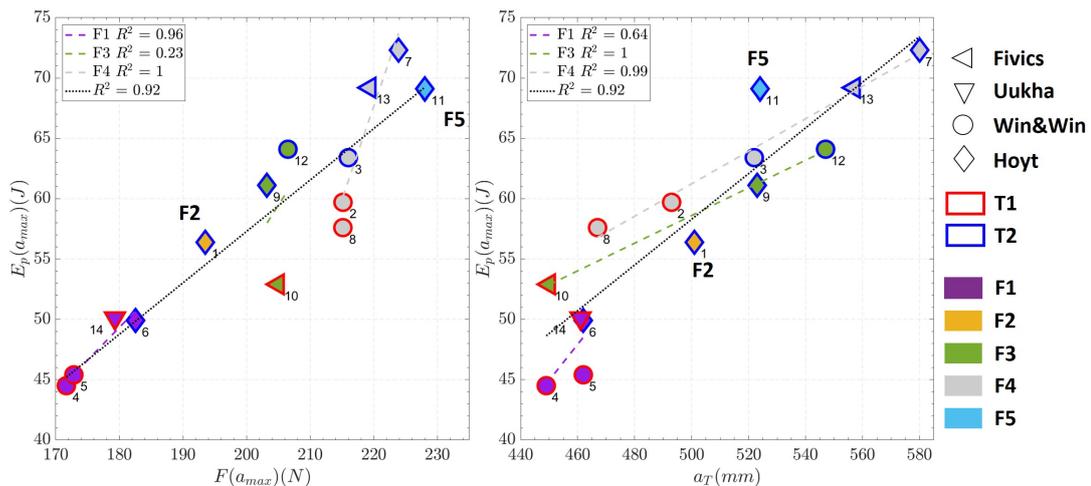


FIGURE II.5 – Énergie potentielle des branches $E_p(a_{max})$ en fonction de la force d'arc $F(a_{max})$ et de l'allonge totale a_T

D'une façon générale et attendue, en prenant l'ensemble des branches, la force à l'allonge maximale $F(a_{max})$ est corrélée à l'énergie potentielle élastique qui en résulte

$E_p(a_{max})$ ($R^2 = 0,92$), relation que l'on retrouve également au sein des groupes F1 ($R^2 = 0,96$) et F4 ($R^2 = 1$) qui ont un plus gros écart-type de force, contrairement à F3 ($R^2 = 0,23$) où la corrélation est plus faible. De même, en prenant l'ensemble des branches, l'allonge totale a_T est corrélée à l'énergie $E_p(a_{max})$ ($R^2 = 0,92$), relation forte que l'on obtient également au sein des branches avec plus de forces F3 ($R^2 = 1$) et F4 ($R^2 = 0,99$), comparé à F1 où la corrélation est plus faible ($R^2 = 0,64$). De plus, pour les arcs de plus petite taille, l'allonge totale est plus faible, ce qui contribue à une énergie potentielle significativement moins élevée (Table II.3). Les coefficients de corrélations mentionnés ici, ou plus tard dans cette partie, sont plutôt donnés à titre indicatif pour pointer une tendance à cause du faible nombre de branches dans chaque groupe.

La corrélation qui semble la plus pertinente à considérer est celle concernant l'allonge totale de l'archer. En effet, un archer peut changer la force de l'arc en passant sur une branche du groupe de force au-dessus, mais cela nécessite de changer son matériel. Pour augmenter artificiellement l'allonge totale, l'archer peut jouer sur l'allonge à vide de l'arc pour gagner quelques millimètres et par conséquent augmenter l'énergie potentielle élastique stockée. Ainsi, pour le groupe de branches F3 et F4, on peut noter une certaine homogénéité toute taille et toute marque de branches confondues avec une relation linéaire quasi parfaite entre l'énergie et l'allonge totale.

	T1		T2		<i>p</i>
$F(a_{max})$ (N)	193,2±20,8	43,4[171,7 215,1]	209,1±15,7	45,5[182,5 228,0]	0,3
$E_p(a_{max})$ (J)	51,7±6,2	15,2[44,5 59,7]	63,2±7,4	22,4[49,9 72,3]	0,01*
$\eta(a_{max})$ (J/N)	0,26±0,01	0,02[0,26 0,28]	0,3±0,02	0,05[0,27 0,32]	0,01*
a_T (mm)	464±16	44[449 493]	527±36	118[462 580]	0,01*
$F(a_{min})$ (N)	185,8±17,3	38,9[166,7 205,5]	177,9±8,8	27,6[169,1 196,7]	0,56
$E_p(a_{min})$ (J)	48,4±4,3	10,6[42,6 53,2]	47,3±2,4	7,5[45,1 52,6]	0,78
$\eta(a_{min})$ (J/N)	0,26±0,01	0,01[0,26 0,27]	0,27±0,0	0,01[0,26 0,27]	0,11
$r(I_{10})$ (N/mm)	0,39±0,04	0,10[0,35 0,45]	0,39±0,03	0,09[0,34 0,43]	0,88

TABLE II.3 – Comparaison des caractéristiques des branches entre les deux tailles existantes : force d'arc $F(a_{max})$, énergie potentielle $E_p(a_{max})$, efficacité $\eta(a_{max})$, allonge totale a_T , raideur finale $r(I_{10})$ entre arc T1 et T2. Moyenne±écart-type, étendue [minimum maximum]. Test t de Student à deux échantillons non appariés, * $p < 0,05$

En prenant les branches numéros 6 et 14 du groupe F1 (Figure II.5), on peut tout d'abord constater que les branches sont utilisées quasiment à la même allonge (462 et 461 mm respectivement), mais qu'à énergie potentielle stockée presque égale (49,9 et 50,1 joules respectivement) l'arc numéro 14 a besoin d'une force maximale moins élevée (184 et 182 newtons respectivement). Une flèche plus rapide en sortie d'arc permet de limiter les erreurs qui seraient liées au lâcher de corde (MADDALENA 2020) et une meilleure performance (SPRATFORD et al. 2017). De plus, sachant que les fluctuations de visée évoluent avec le carré de la force que doit déployer l'archer pour bander l'arc (MADDALENA 2020), il semble alors important de pouvoir sélectionner les branches en fonction de leur efficacité pour maximiser l'énergie potentielle élastique stockée à une force donnée.

2.3.3 Efficience

L'efficience des branches représente l'énergie produite par unité de force. Sur la Figure II.6 est représentée l'efficience des branches mesurées en fonction de la force de l'arc (gauche) et de l'allonge totale (droite).

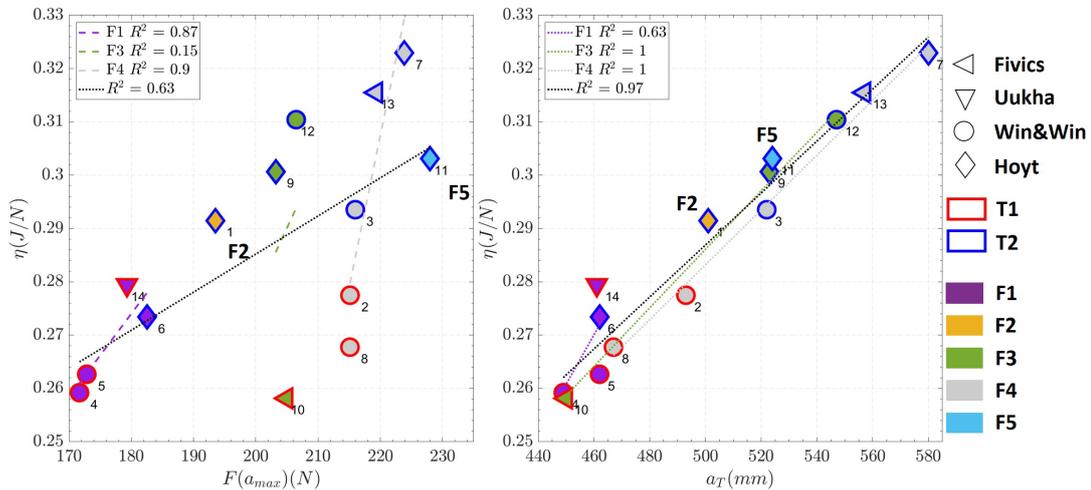


FIGURE II.6 – Efficience des branches $\eta(a_{max})$ en fonction de la force d'arc $F(a_{max})$ et de l'allonge totale a_T pour quatorze paires de branches de tailles, raideurs et marques différentes

En prenant l'ensemble des branches, la force à l'allonge maximale est corrélée modérément à l'efficience η ($R^2 = 0,63$). D'une façon analogue avec l'énergie, cette relation se retrouve également au sein des groupes F1 ($R^2 = 0,87$) et F4 ($R^2 = 0,90$) qui ont un plus gros écart-type (Table II.2), contrairement à F3 ($R^2 = 0,15$) où la corrélation est plus faible. Pour l'allonge, en prenant l'ensemble des branches, a_T est corrélée à $\eta(a_{max})$ ($R^2 = 0,97$), relation forte que l'on obtient également au sein des branches avec plus de forces F3 ($R^2 = 1$) et F4 ($R^2 = 1$), comparé à F1 où la corrélation est plus faible ($R^2 = 0,63$).

En comparant les deux tailles de branches, on constate que les arcs plus petits sont significativement moins efficaces (Table II.3). L'allonge des archers, plus que la force d'arc, est le paramètre important pour utiliser de façon efficace les branches, toutes tailles et raideurs confondues. Ainsi, les archers ayant une grande envergure se retrouvent avantagés car ils peuvent mieux exploiter les propriétés mécaniques de leur branche et obtiendront une énergie supérieure à force d'arc égale. Au contraire, les archers ayant une courte allonge seront condamnés à produire moins d'énergie par unité de force. Pour augmenter l'efficience des branches tirées, il faudrait donc augmenter l'allonge de l'archer. En gardant la même allonge maximale, pour augmenter artificiellement l'allonge totale qui permet d'emmagasiner une énergie potentielle, il faudrait alors diminuer l'allonge à vide. Ce réglage peut être envisageable en veillant à garder un arc équilibré (section I.2.1.1). Une deuxième solution serait de tirer avec un arc de plus grande taille avec la même allonge, ce qui nécessiterait d'adapter la technique de tir pour s'adapter à un matériel plus grand, plus lourd et plus encombrant.

2.3.4 Comparaison à allonge minimale

Pour l'ensemble des branches, les trois paramètres permettant de les caractériser et présentés précédemment sont évalués à une allonge commune a_{min} , compilés sur la Figure II.7. À cette allonge de 440 millimètres, on peut déjà remarquer qu'au sein même d'un groupe de force et pour des branches de même taille, que la force nécessaire peut être très différente, avec une étendue de plus de 10 newtons pour branches 2 et 8 par exemple. Ceci reflète les différents profils de force existants et entrevus sur la Figure II.3. Pour les groupes F1 F3 et F4, la force est sans surprise corrélée à l'énergie qui en résulte, cependant on peut observer des différences au niveau de l'efficacité. En fixant le paramètre d'allonge, les branches de plus grande taille ne sont pas utilisées au maximum de leurs capacités (Table II.3) et ces résultats sont plus représentatifs pour les branches de petite taille. Pour une allonge donnée, un archer devrait chercher à maximiser l'efficacité. Ainsi, la paire de branche la plus efficace à l'allonge minimale est la paire numéro 14 ($\eta = 0,274$) alors que la moins efficace est la paire numéro 5 ($\eta = 0,256$) qui appartient au même groupe de force F1.

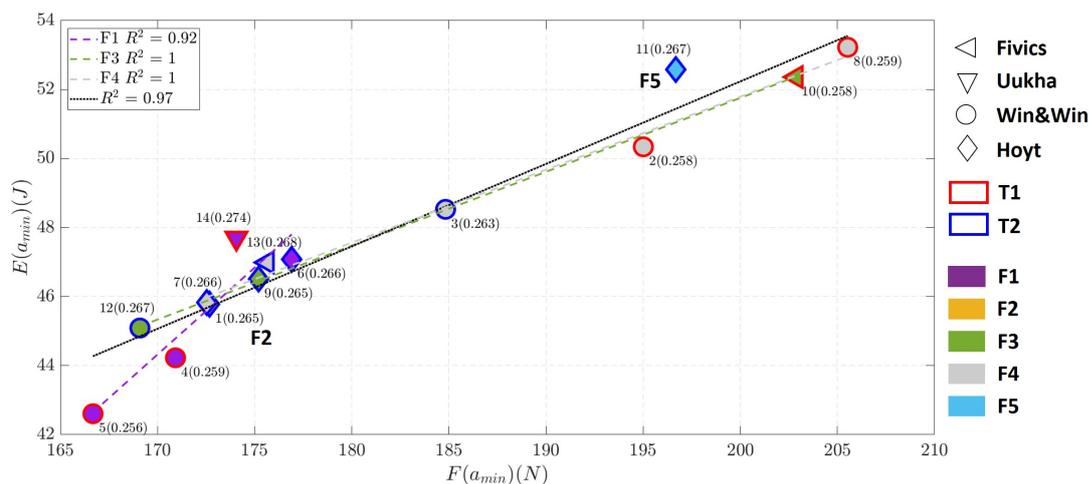


FIGURE II.7 – Énergie potentielle des branches à l'allonge minimale $E_p(a_{min})$ en fonction de la force à cette allonge $F(a_{min})$. Entre parenthèses, l'efficacité η .

2.3.5 Raideur

La raideur est calculée pour toutes les branches. Pour l'ensemble, celle-ci est maximale en début d'allonge et diminue jusqu'à atteindre un minimum situé en milieu d'allonge avant d'augmenter pendant la deuxième moitié (Figure II.8). La meilleure efficacité des branches 14 est expliquée par son profil de force et de raideur particulier de cette paire par rapport aux autres. Sur cette figure, à droite, on constate qu'elle possède une raideur supérieure sur les trois premiers intervalles de l'allonge par rapport aux autres branches du groupe F1. Cette plus grande raideur en début d'allonge nécessite plus de force et permet de stocker plus d'énergie potentielle élastique. Ce type de profil de branche, unique parmi toutes les branches mesurées, représente un avantage par rapport aux autres profils

mécaniques, permettant à allonge égale d’avoir plus d’énergie potentielle stockée et donc en théorie une vitesse initiale de la flèche plus élevée.

Par la suite, on étudie la raideur sur l’intervalle final $r(I_{10})$ qui intéresse particulièrement les entraîneurs et les archers. Selon eux, le dernier intervalle du cycle d’allonge est le plus important, car il conditionne une bonne phase de visée. Des branches plus raides sur cet intervalle nécessiteraient en conséquence relativement plus de force juste avant de lâcher la corde, ce qui augmenterait les fluctuations de visée et nuirait à la performance (MADDALENA 2020). Des branches idéales seraient celles qui « sont les plus souples sur la fin », autrement dit celles qui ont la raideur la moins élevée sur les derniers centimètres d’allonge. On peut noter que la branche 14 qui est la plus efficiente, fait partie des branches les moins raides sur le dernier intervalle. Il n’est pas évident de savoir si d’autres branches de la marque Uukha présenteraient ce même profil de force singulier, et il faudrait donc en mesurer d’autres de la même marque pour le savoir. Contrairement aux flèches dont disposent les archers en grand nombre, le prix d’une paire de branche qui peut aller jusqu’à plus de 900 euros ^{18 19} limite forcément le nombre que possède un archer et il n’est pas rare de voir certains faire plusieurs saisons avec la même paire.

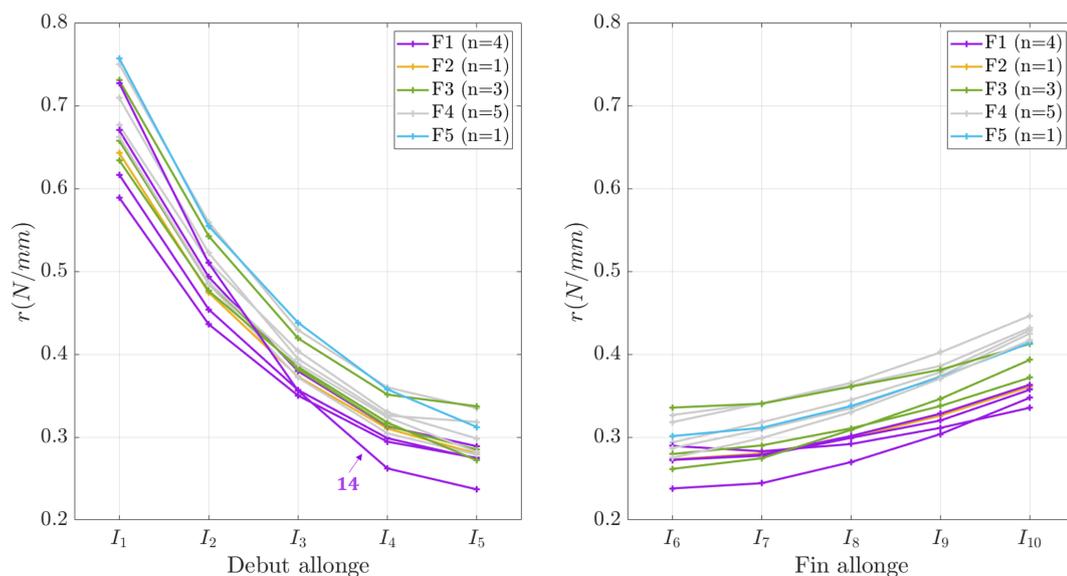


FIGURE II.8 – Profil de raideur des branches en fonction de l’intervalle d’allonge. Chaque intervalle correspond à 50 millimètres d’allonge.

Sur la Figure II.9, on représente la raideur sur l’intervalle final en fonction de la force de l’arc et de l’allonge totale. Les branches les plus raides sur les derniers centimètres d’allonge sont de façon générale celles qui nécessitent le plus de force à l’allonge maximale ($R^2 = 0,86$), plutôt que celles dont l’allonge est élevée ($R^2 = 0,44$). Au sein des différentes tailles de branches, c’est également la force nécessaire à l’allonge maxi-

Accès octobre 2022

18. https://www.francearcherie.com/hoyt-branches-formula-carbon-velos-xml-889_891_907-17608.html

19. https://www.francearcherie.com/uukha-branches-sx-xml-889_891_907-19939.html

male qui est le plus liée à la raideur finale plutôt que la quantité d’allonge. Ceci explique qu’entre les deux tailles existantes, aucune différence n’a été notée sur la raideur finale (Table II.3). En revanche, les comportements au sein des groupes de forces sont différents. Pour le groupe F1 et F4, ce sont les branches utilisées avec le plus de force qui sont les moins raides en fin d’allonge, alors que pour le groupe F3 c’est l’inverse qui se produit.

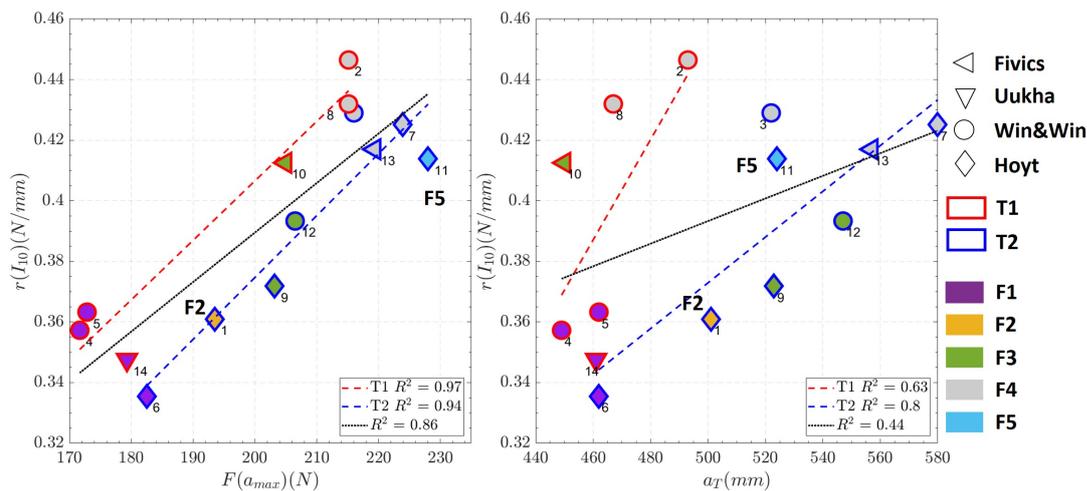


FIGURE II.9 – Raideur des branches sur l’intervalle finale (I_{10}) fonction de la force d’arc $F(a_{max})$ et de l’allonge totale a_T

2.4 Bilan

En termes de comparaison d’une marque à l’autre, le faible nombre de branches par marque mesurées dans chacune des catégories de forces rend une généralisation et les comparaisons difficiles. Les caractéristiques des branches des groupes F3 et F4 se comportent de façon linéaire par rapport à l’allonge de l’archer, quelle que soit leur marque ou leur taille, indiquant une certaine similarité entre elles dans leur condition d’utilisation. Il a été observé que l’énergie des branches semble être plus dépendante de l’allonge de l’archer plutôt que de la raideur des branches. Par conséquent, il semblerait plus avantageux d’avoir un réglage d’allonge à vide le plus petit possible afin d’augmenter l’allonge de l’archer.

Par ailleurs, il a été observé pour les branches du groupe les plus faibles une différence dans le profil de raideur d’une paire de branches de la marque Uukha qui lui permet être plus efficace que les branches d’autres fabricants. Cette différence se traduirait par une vitesse théorique de flèche en sortie d’arc plus élevée à force d’arc égale, procurant un avantage par rapport aux autres branches (MADDALENA 2020).

3 Caractérisation des futs

3.1 Introduction

Après avoir étudié les différentes branches utilisées au sein des archers élités français, nous nous sommes intéressés à leurs flèches qui sont l'autre versant du matériel qui sont source d'erreurs (J. L. PARK 2014).

De nombreuses études se sont intéressées à l'influence des propriétés mécaniques des flèches sur la dispersion en cible. Pour les futs, le diamètre (J. L. PARK 2011b), la masse (J. L. PARK 2021a), la rectitude (J. L. PARK, AITCHISON et al. 2018) ont une influence sur la localisation finale de la flèche en cible, de même que la forme et la taille de l'empenage modifie les propriétés aérodynamiques des flèches (MIYAZAKI, MATSUMOTO et al. 2017; MADDALENA 2020; ORTIZ, SERINO et al. 2020).

Quand on considère l'entièreté de la gamme de futs vendus dans le commerce par Easton, on constate qu'ils respectent bien les préconisations de ZANEVSKYY 2001 concernant la relation entre leur raideur et leur masse (section I.7). Au sein d'un fagot de fut appartenant à un même groupe de raideur, le fabricant fournit des tolérances en masse (J. L. PARK 2021a) qui ne sont pas toujours respectées (KUCH et al. 2019).

Le processus complexe de fabrication des futs rend nécessaire le contrôle de leurs caractéristiques après achat pour avoir l'assurance que les archers de l'Équipe de France tirent des flèches de bonnes qualités.

Dans un premier temps sera présenté le banc de mesure qui permet d'acquérir les paramètres physiques des futs de flèches. Ensuite, un modèle balistique est proposé afin de simuler l'effet en cible des variabilités évaluées sur l'ensemble des futs mesurés pour le compte de la Fédération Française de Tir à l'arc. Les critères de tris issus du modèle balistiques seront confrontés à des critères de tris proposés dans la littérature (J. L. PARK 2021a).

3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Banc de mesure des futs

Un banc de mesure de fut (Figure II.10) a été conçu par le Centre d'Analyse d'Images et Performance Sportive pour l'obtention des principales caractéristiques mécaniques des futs de flèches selon les normes définies par ARCHERY TRADE ASSOCIATION 2009 : le diamètre (I.2.2.1.a) et la rectitude (I.2.2.1.b) à l'aide d'un capteur optique précis d'une résolution de 0,002 millimètre (Keyence LS-7030R, Osaka, Japon), la raideur (section I.2.2.1.c) calculée après les mesures d'un capteur de force (HBM S2M/10N, Darmstadt, Allemagne) avec une résolution de 0,2 Newton, et la masse (section I.2.2.1.d) à l'aide d'une balance de précision de 0,001 gramme (A&D FZ-200i, Tokyo, Japon).

Cependant, cette norme ne permet pas de caractériser la raideur variable sur le périmètre d'un fut I.2.2.1.c, source de dispersion latérale et verticale (Figure I.19). Afin

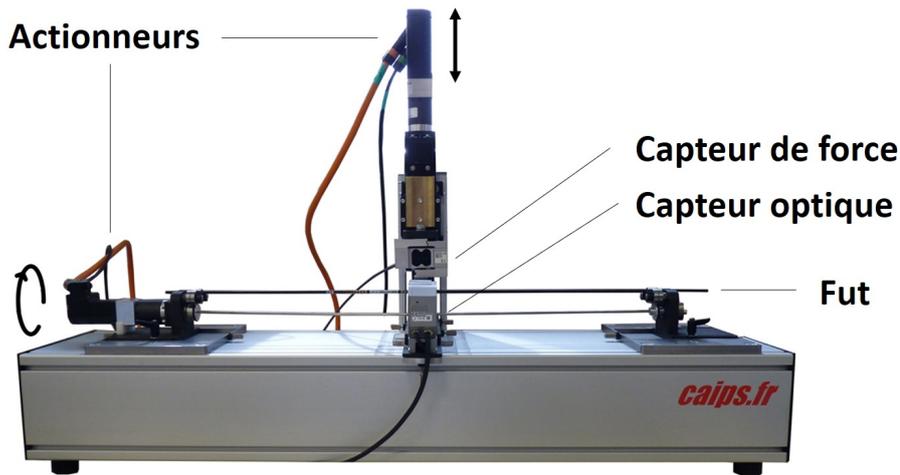


FIGURE II.10 – Banc de mesure des futs avec ses différents composants (sans la balance)

d'y parvenir, il est donc nécessaire d'aller plus loin que cette norme en mesurant sur l'ensemble du périmètre du fut. Deux actionneurs (Figure II.10) permettent une automatisation de ces mesures. Une fois le fut centré sur les taquets, cette dernière, qui est commandée en position, descend à deux positions différentes (x_1 , x_2), appliquant une force F_1 et F_2 en ces points respectivement, puis remonte à sa position de référence. Ensuite, l'actionneur latéral permet la rotation des taquets sur lesquels est positionné le fut, et par conséquent la rotation du fut autour de son axe longitudinal. À chaque point de mesure j , le capteur optique enregistre également le diamètre d_j du fut.

3.2.2 Caractérisation d'un fut

La raideur k_j est alors calculée de la façon suivante :

$$k_j = \frac{|F_{1j} - F_{2j}|}{|x_{1j} - x_{2j}|} \quad (\text{II.4})$$

et pour obtenir le spine s_j , utilisé par les fabricants de futs, exprimé en millipouces :

$$s_j = \frac{P_e}{k_j} \quad (\text{II.5})$$

suivi de la conversion en millipouces²⁰. L'actionneur latéral permet seulement de faire pivoter les taquets sur lesquels reposent le fut, mais ne permettent pas de contrôler directement la rotation de celui-ci. Pour cette raison, la commande envoyée à l'automate est programmée pour que les futs effectuent au moins une rotation sur eux-mêmes. Cette condition est vérifiée visuellement. Pour cela, l'actionneur a parcouru 16 millimètres et en prenant une mesure tous les millimètres d'incrément, soit 16 points de mesures sur l'ensemble du périmètre d'un fut. On note alors s_{mean} la moyenne du spine calculée sur l'ensemble des points de mesures s_j , s_{std} l'écart-type du spine, d_f la moyenne du diamètre, r la rectitude qui représente l'étendue du diamètre ($\max(d_j) - \min(d_j)$) et m_f la masse du fut.

20. 1 pouce = 2,54 cm

3.2.3 Futs

Un total de 1788 futs ont été mesurés sur le banc. Ils ont pour vocation à être distribué aux archers de l'équipe de France de tir à l'arc au fur et à mesure de leur besoin, que ce soit pour l'entraînement ou pour la compétition. La répartition selon leur catégorie de raideur (ou de spine, section I.2.2.1.c) est par conséquent représentative des calibres tirés par les archers français, dont le détail est répertorié dans la Table II.4.

s	325	350	380	410	450	500	550	600
n	192	156	192	408	312	192	252	84

TABLE II.4 – Nombre de futs n par catégorie de spine s

3.2.4 Critères de tri

Les futs mesurés sont confrontés aux exigences qualités fournies par le fabricant sur la rectitude, censée être inférieure à 0,025 millimètres (section I.2.2.1.b) et sur la masse dont l'écart par douzaine est censé être inférieur à 0,032 gramme (section I.2.2.1.d). Puis les critères de tris proposés par J. L. PARK 2021a sont appliqués, où il est conseillé de regrouper les futs dont l'écart de raideur n'excède pas 1% et l'écart de masse n'excède pas 0,032 gramme. Au sein d'un groupe de spine, on appelle n_{sOK} le nombre maximum de futs respectant la condition de raideur, n_{mOK} le maximum de ceux qui respectent la condition de masse et enfin n_{OK} les futs qui respectent les deux conditions en même temps.

Avant de présenter les résultats issus de la machine pour caractériser les futs, un modèle balistique est introduit et permettra de simuler l'effet des variations des paramètres mesurés du fut sur leur dispersion verticale en cible.

3.2.5 Modélisation balistique

Un modèle simplifié de balistique en deux dimensions est utilisé (Figure II.11), où une flèche est soumise uniquement à son poids (Équation I.4) et à la traînée (Équation I.5) pendant sa phase aérienne. En appliquant le principe fondamental de la dynamique, l'accélération de la flèche peut être exprimée de la façon suivante :

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{1}{2m_T}C_D\rho A_T v^2 \dot{x} \\ \ddot{y} = -g - \frac{1}{2m_T}C_D\rho A_T v^2 \dot{y} \\ v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

dont les conditions initiales sont $x(0) = 0$, $y(0) = y_0$, $\dot{x}(0) = v_i \cos \alpha_0$, $\dot{y}(0) = v_i \sin \alpha_0$, dépendantes de la hauteur y_0 , vitesse v_i et angle α_0 d'éjection initial de la flèche.

En se plaçant dans un cas où toute l'énergie potentielle élastique de l'arc est transmise à la flèche, on a $v_i = \sqrt{\frac{2E_p}{m}}$.

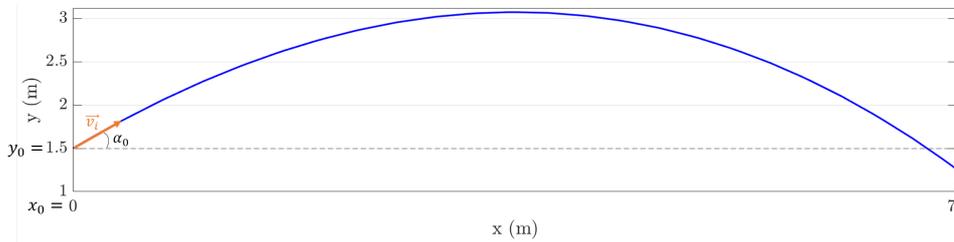


FIGURE II.11 – Schéma balistique

Ce modèle permet d'évaluer la dispersion verticale des futs en utilisant leur masse m_f obtenue par la balance et le diamètre moyen d_f obtenus par le capteur optique. Pour simuler la masse totale de la flèche m_T (Équation I.4), une masse arbitraire fixe de 0,008 kg représentant la pointe, l'empennage et l'encoche est ajoutée à la masse du fut mesuré. Le diamètre moyen mesuré permet de faire varier la section du fut A_f (section I.2.2.5). Trois plumes de taille 0,02 m de hauteur et 0,003 m d'épaisseur forment l'empennage, qui a donc pour section $A_e = 1,8 \cdot 10^{-5} m^2$, additionné à la section du fut pour obtenir la section totale de la flèche A_T . Les autres valeurs des constantes qui ont été utilisées pour la simulation sont les suivantes : $g = 9,80665 m \cdot s^{-2}$, $y_0 = 1,5 m$, $C_D = 2$, $\rho = 1,204 kg \cdot m^{-3}$.

Pour chacune des catégories de spine existante, une énergie d'arc et un angle de tir α ont été associés arbitrairement (Table II.5). Pour attribuer les valeurs, la plage d'énergie potentielle mesurée dans la section II.2.3.2 a été prise comme référence. Les futs les plus raides (325) sont tirés avec une énergie de 73 joules, puis celle-ci diminue par incrément de 4 joules par catégorie, jusqu'à 45 joules pour les futs les plus souples (600). Le dernier paramètre à déterminer est l'angle initial de tir. Celui-ci est fixé, avec une précision de $0,05^\circ$, de sorte que le plus grand nombre de flèches d'une catégorie soit autour de 1,3 mètre de hauteur sur l'axe vertical y à une distance de 70 mètres, représentant le centre de la cible pour un tir olympique (section I.1.1.1). Une fois les simulations achevées, la dispersion du groupe de futs est évaluée à travers leur hauteur en cible. Les critères suivants de sélection sont proposés, une dispersion en cible inférieure à 6,1 centimètres soit la taille du « X », et inférieure à 12,2 centimètres, soit la taille du « 10 » (Figure I.1). Au sein d'un groupe de spine, on appelle n_{10OK} le nombre maximum de futs respectant la condition pour être dans le « 10 », et n_{XOK} le maximum de ceux qui respectent la condition pour être dans le « X ». Ce système d'équations différentielles est résolu à l'aide du solveur ode45 de Matlab (R2021b, The MathWorks, Natick, États-Unis).

3.3 Résultats

3.3.1 Caractéristiques des futs

Le récapitulatif des caractéristiques mécaniques des futs par catégorie de spine et mesurées par le banc est présenté dans la Table II.6. L'écart interquartile permet d'évaluer

s (mil)	325	350	380	410	450	500	550	600
E_p (J)	73	69	65	61	57	53	49	45
α_0 (°)	3,85	3,95	4,10	4,30	4,45	4,65	4,75	4,95

TABLE II.5 – Paramètres d'énergie de l'arc E_p et angle initial α_0 de la flèche utilisés pour la simulation

l'homogénéité des valeurs mesurées au sein d'une même catégorie de fut. Pour le spine, la variation du spine et la rectitude des futs cet écart interquartile semble croissant avec les catégories de spine, alors que pour le diamètre et la masse, on ne retrouve pas cette relation. Une explication sur ce phénomène pourrait résider dans le processus industriel de fabrication de ces futs qui facilite la production des futs plus raides par rapport à des futs plus souples.

s (mil)	s_{mean} (mil)	s_{std} (mil)	r (mm)	d (mm)	m_f (g)
325	327,8(4,0)	0,3(0,3)	0,007(0,002)	5,627(0,035)	19,69(0,13)
350	350,4(4,3)	0,3(0,2)	0,007(0,003)	5,538(0,041)	18,74(0,36)
380	382,7(4,2)	0,3(0,3)	0,006(0,003)	5,421(0,026)	17,96(0,46)
410	409,7(6,8)	0,4(0,3)	0,006(0,003)	5,352(0,056)	17,71(0,32)
450	447,4(4,6)	0,4(0,3)	0,006(0,002)	5,241(0,014)	16,82(0,07)
500	499,9(7,9)	0,9(0,7)	0,006(0,004)	5,192(0,015)	15,86(0,11)
550	549,7(6,8)	0,7(0,7)	0,006(0,005)	5,083(0,029)	14,62(0,18)
600	608,6(12,1)	1,2(1,0)	0,004(0,010)	5,013(0,040)	13,55(0,16)

TABLE II.6 – Caractéristiques des futs mesurés : s catégorie de spine, s_{mean} spine moyen, s_{std} écart-type du spine, r rectitude, d diamètre moyen, m_f masse du fut. Médiane(écart interquartile).

Les futs ont tous effectué une sur-rotation, ce qui a une incidence sur les calculs de moyenne ou d'écart-types intra-fut. La rotation complète d'un fut s'effectuait entre la 15^e et la 16^e mesure effectuée. Par conséquent, on peut estimer l'erreur de mesure sur le dernier pas de rotation à $\frac{1}{16}$, moyenné par le nombre de mesures, soit au maximum $\pm 0,39\%$. Cependant, on fait l'hypothèse que pour l'ensemble des futs, ces erreurs se compensent. Pour minimiser l'erreur intra-fut, un plus grand nombre de rotations par fut serait possible, mais plus chronophage. En effet, la mesure d'une rotation complète d'un fut prend environ trois minutes sur l'automate, doubler le nombre de rotations permet certes de diviser l'erreur intra-fut de moitié, mais aurait pris également deux fois plus de temps.

3.3.1.a Diamètre et rectitude

Le diamètre extérieur du fut décroît avec les catégories de spine (Figure II.12 droite), et est bien corrélé fortement avec la raideur d'un fut comme on pouvait s'y attendre, car les fabricants jouent sur le diamètre pour en modifier la raideur (Équation I.1 et I.2).

Il semblerait cependant qu'une limite minimale existe dans leur procédé de fabrication, aucun fut n'ayant été mesuré en dessous de 5,000 millimètres de diamètre.

La tolérance de rectitude indiquée par le fabricant est de 0,025 millimètre (section I.2.2.1.b), et on constate qu'en moyenne, par catégorie de spine, les futs mesurés sont bien tous inférieurs à ce critère. Sur les 1788 futs, 7 seulement sont au-dessus du seuil de qualité, soit 0,4%, dont 1 pour le spine 325, 3 pour le spine 410, 1 pour le spine 450 et 2 pour le spine 550. Le spine mesuré est relativement proche de ce qui est indiqué par le constructeur, avec pour les valeurs médianes $0,3 \pm 0,6\%$ d'écart.

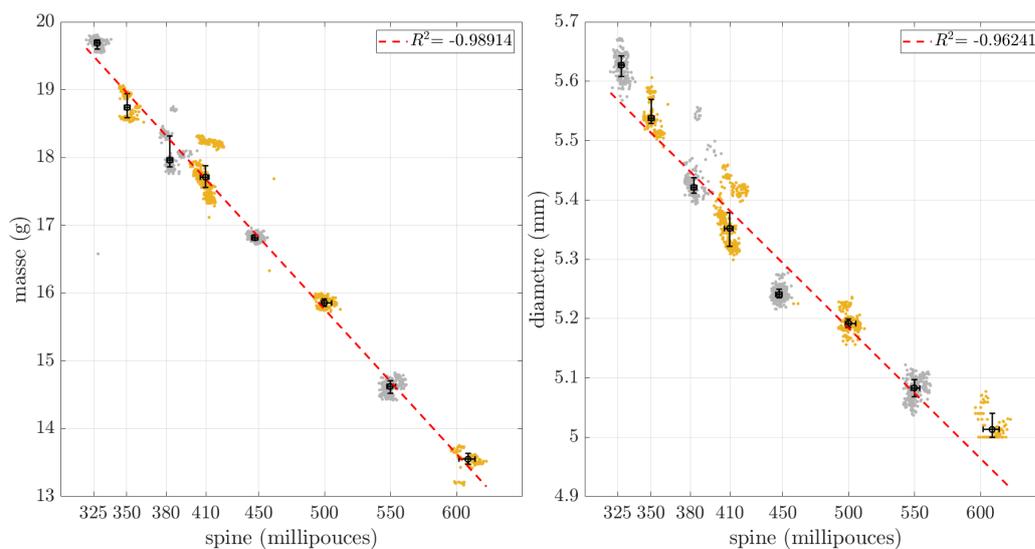


FIGURE II.12 – Relation entre le spine (raideur) d'un fut et sa masse ainsi que son diamètre pour l'ensemble de futs mesurés. La croix est centrée sur la médiane de chaque paramètre pour chacune des catégories, et les barres d'erreur représentent les quartiles.

3.3.1.b Masse et raideur

Il est également possible de vérifier expérimentalement la relation entre la masse et le spine d'un fut (section I.2.2.1.d). La Figure II.12 de gauche, représentant la masse des futs en fonction du spine, est en accord avec ce qui est indiqué par le fabricant (Figure I.7), avec un coefficient de corrélation quasiment identique en comparant avec les données techniques. Cependant, on peut voir sur ce même graphe des clusters de masses différentes pour des catégories de spine. Le fabricant assure que par douzaine de flèches, l'écart-type de la masse des futs ne dépasse pas 0,032 gramme. Ce critère n'est pas vérifié au sein d'une douzaine de futs 350, 410 et 600, ainsi que dans deux douzaines de futs 500, pour un total de 5 flèches non conformes, soit 0,3%. On peut également voir sur les deux graphiques (Figure II.12) que les deux futs non conformes en masse pour le spine 500 n'ont pas du tout le spine indiqué par le fabricant, ni le bon diamètre, probablement dû à un défaut de fabrication.

Concernant la variation de la raideur sur le périmètre d'un fut (Table II.6), celle-ci semble homogène de la catégorie de spine 325 jusqu'à la catégorie 450, avant de dou-

bler en valeur absolue pour les trois dernières catégories. Cependant, l'influence de ce paramètre sur la balistique n'est pas connu et aucun critère de tri n'a été défini dans la littérature.

Le spine des futs est relativement proche de celui indiqué par le fabricant. En moyenne pour l'ensemble des catégories, l'écart est de $0,7 \pm 0,9\%$. En appliquant uniquement le critère de sélection de raideur proposé par (J. L. PARK 2021a) ce sont en moyenne $45 \pm 6\%$ des futs qui seraient exclus de cette sélection. Ce nombre est à mettre en perspective du tri effectué par la société allemande pour le compte de la Fédération Française de Tir à l'Arc (section I.2.2.1.c) où 75% des futs étaient désignés non conformes avec un critère de raideur. En appliquant le critère de tri selon la masse, ce ne sont plus que $20 \pm 5\%$ des futs qui seraient conservés. Enfin, en appliquant strictement la recommandation de J. L. PARK 2021a, seuls $8 \pm 3\%$ des futs en moyennes seraient dignes d'être utilisés en compétition internationale (Table II.7).

s (mil)	325	350	380	410	450	500	550	600
n	192	156	192	408	312	192	252	84
n_{sOK}	84(44)	73(47)	92(48)	140(34)	156(50)	89(46)	126(50)	32(38)
n_{mOK}	38(20)	34(22)	28(15)	60(15)	90(29)	46(24)	34(13)	17(20)
n_{OK}	19(10)	17(11)	12(6)	10(2)	35(11)	19(10)	10(4)	6(7)

TABLE II.7 – Nombre maximum de futs au sein d'un lot après application des critères de tris, n nombre de futs dans une catégorie de spine s , n_{sOK} le nombre de futs respectant le critère du spine, n_{mOK} le nombre de futs respectant le critère de masse, n_{OK} le nombre de futs respectant les deux critères proposé par (J. L. PARK 2021a). Entre parenthèse, le pourcentage par rapport à n .

Lors des compétitions, chaque archer utilise un minimum de 12 flèches lors des phases qualificatives. Pour équiper chaque archer avec des flèches correctement triées au sens de J. L. PARK 2021a, il faudrait en moyenne trier 167 futs, soit 14 douzaines (168 futs) de futs pour en extraire une qui respecte les exigences de haut niveau. Dans le commerce, une douzaine est vendue au prix catalogue environ 500 euros²¹, soit 7000 euros pour les 14 douzaines, à multiplier par le nombre d'archers. Ceci représente un coût non négligeable pour une Fédération sportive et justifie par conséquent l'utilité d'étudier l'importance de chacun des paramètres d'un fut et d'une flèche pour en améliorer le processus de sélection.

3.3.2 Dispersion verticale en cible

Avec les masses et les diamètres mesurés pour chacun des futs, il est possible d'évaluer la dispersion verticale en cible par catégorie de spine à la distance olympique en usant du modèle balistique simplifié. L'ensemble des trajectoires simulées se trouve dans l'annexe

21. <https://www.goldarchery.fr/tube-carbone/406377-easton-x10.html> (Accès juillet 2022)

C.1. Pour faciliter la visualisation des écarts pour l'ensemble des catégories de spine, la dispersion du groupe est ramenée autour de la médiane des hauteurs en cible II.13.

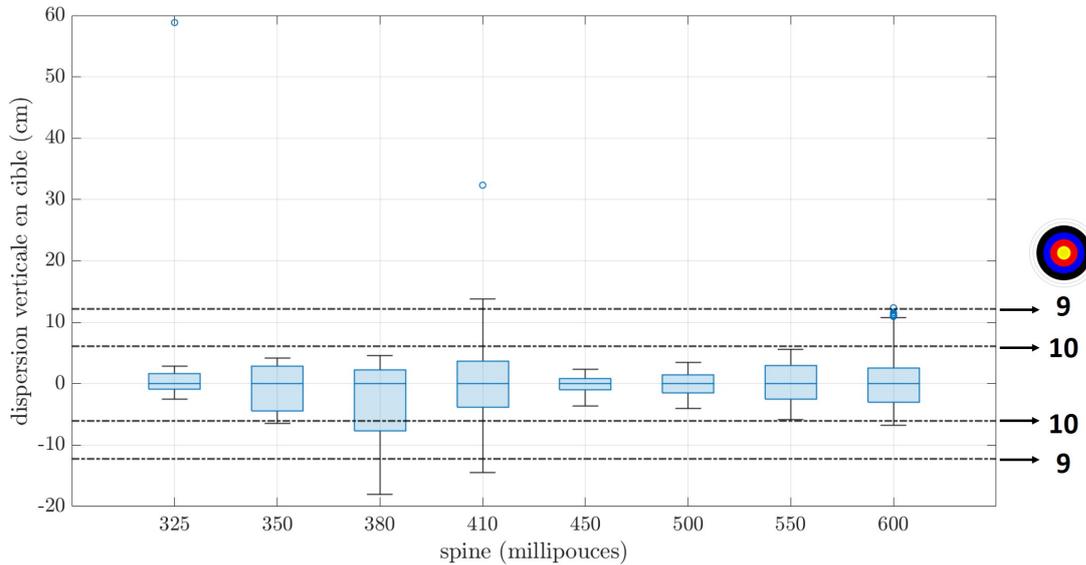


FIGURE II.13 – Dispersion verticale théorique pour l'ensemble des catégories de spine

Si on exclut les valeurs aberrantes qui sont détectées sur la masse, l'étendue de chaque groupe est en moyenne de $13,7 \pm 8,4$ centimètres, soit au-dessus du diamètre d'un « 10 » qui est de 12,1 centimètres. On peut constater cependant que la dispersion totale reste assez variable selon les groupes de spine. Pour les catégories de spine 380, 410 et 600 seulement, cette étendue était supérieure à 12,1 centimètres avec 22,6, 28,3 et 17,5 centimètres respectivement, tandis que pour les autres catégories, l'étendue était inférieure. L'écart interquartile est en moyenne de $5,4 \pm 2,8$ centimètres ce qui est très correct en face de 6,1 centimètres de la zone du « X » pour au moins la moitié des flèches d'un groupe. Seuls les catégories de spine 350, 380 et 410 cette fois-ci ont un écart interquartile supérieur au « X », avec 7,3, 9,9 et 7,5 centimètres respectivement.

Le nombre de futs maximum par catégorie de spine qui respectent les conditions de dispersion verticale proposées sont listés dans la Table II.8. En moyenne, $93 \pm 11\%$ des futs tiennent dans le diamètre « 10 », et $72 \pm 21\%$ dans le diamètre du « X ». Malgré le critère plus restrictif du « X », la proportion de futs conformes est largement supérieure à celle du tri selon J. L. PARK 2021a. Pour trois catégories de spine (325, 450 et 500) ce sont même plus de 90% des futs qui ont un écart vertical inférieur au « X ». La dispersion verticale est principalement causée par les variations de masse, cependant le modèle utilisé ne prend pas en compte l'effet du spine.

Les énergies potentielles ainsi que l'angle initial du tir, bien que réalistes, ont été fixés ici de façon arbitraire et ces conditions initiales ne sont pas entièrement représentatives des conditions réelles. Cette modélisation simplifiée permet néanmoins d'avoir une idée de l'ordre de grandeur de l'écart vertical qui résulterait du tir pour les futs qui ont été mesurés.

s	325	350	380	410	450	500	550	600
n	192	156	192	408	312	192	252	84
n_{10OK}	191(99)	156(100)	149(78)	300(74)	312(100)	192(100)	252(100)	78(93)
n_{XOK}	191(99)	85(54)	115(60)	199(49)	312(100)	176(92)	161(64)	52(62)

TABLE II.8 – Nombre maximum de futs au sein d’un lot après application des critères de tris, n nombre de futs dans une catégorie de spine s , n_{10OK} le nombre de fut respectant le critère du « 10 », n_{XOK} le nombre de fut respectant le critère du « X ». Entre parenthèse le pourcentage par rapport à n

3.4 Bilan

L’utilisation du banc de mesure de futs a permis de caractériser l’ensemble des futs qui vont être utilisés par les archers du Pôle France. Grâce à ces mesures, les rares flèches qui ont des défauts flagrants de masse, de raideur ou de rectitude peuvent être identifiées facilement et mises de côtés. De plus, en appliquant les critères de tris proposés dans la littérature, le très faible nombre de futs conformes justifie pleinement l’utilisation d’un tel banc afin d’améliorer le processus de sélection. Ce tri a été confronté à un modèle balistique simplifié permettant d’évaluer la dispersion verticale des flèches en cible, cependant cette modélisation ne permet pas d’expliquer la dispersion latérale des flèches en cible et reste donc insuffisante. Nous avons donc eu recours à une machine de tir pour pouvoir l’évaluer expérimentalement.

4 Influence des propriétés mécaniques des futs

4.1 Introduction

Selon les sources d’erreurs courantes au tir à l’arc (Figure I.19), la dispersion latérale causée par les flèches proviendrait de la variation de sa raideur. La modélisation proposée par J. L. PARK 2014 est basée sur des probabilités de répartitions de chacun des paramètres qui influencent le score d’une flèche, en leur attribuant un axe sur lequel ces paramètres agissent puis en définissant la relation entre ces sources d’erreurs et la distance de tir. Pour la raideur par exemple, cette influence serait linéaire (Figure I.19). En revanche, cette modélisation ne donne pas le poids de chacune des sources d’erreurs.

Pour avoir un aperçu de la dispersion horizontale, des modèles balistiques permettent d’évaluer l’écart latéral en cible (ORTIZ, SERINO et al. 2020; MADDALENA 2020) en prenant en compte l’effet du vent ou de la rotation de la flèche en vol par exemple. Cependant, aucun de ces modèles n’intègre la raideur de la flèche ou la variation de la raideur dans le calcul de la trajectoire aérienne. Si la raideur d’une flèche n’est pas correctement reliée à la force de l’arc, lors de sa phase de balistique interne elle pourrait cogner la poignée et compromettre son vol, ou même casser par flambage dans le pire des cas.

En complément des propriétés mécaniques qui caractérisent un fut ou une flèche, le montage de l’empennage pourrait également avoir une influence sur la dispersion latérale ou verticale des flèches, possiblement en fonction du positionnement des plumes par

rapport aux extremums de raideur I.2.2.3. L'objectif alors est de pouvoir établir parmi l'ensemble de ces paramètres leur importance dans la dispersion verticale et horizontale en cible. Pour cela une machine de tir est utilisée, permettant ainsi de ne pas être influencé par le bruit humain.

4.2 Matériel et méthodes

4.2.1 Caractérisations des futs

Pour commencer, les caractéristiques de 60 futs de la catégorie de spine 325 ont été obtenus à l'aide du banc de mesure présenté dans la section II.1. Ces futs étaient numérotés de 1 à 60. La position initiale de référence du fut sur les taquets du banc était standardisée par rapport au marquage appliqué sur le fut par le fabricant, de sorte à avoir la même orientation initiale pour l'ensemble des tubes. Au moins quatre rotations, contrôlées visuellement, ont été effectuées par les futs. Pour cela, l'actionneur latéral a parcouru 64 millimètres (16 millimètres par tour) et 32 points de mesures sont réalisés, soit un tous les deux millimètres. Pour s'affranchir de l'erreur intra-fut liée à la sur-rotation, une nouvelle méthode pour la caractérisation de la raideur est proposée. La section du fut sur laquelle la raideur est mesurée est considérée comme circulaire, l'évolution de cette caractéristique devrait évoluer de manière sinusoïdale autour du périmètre et peut donc s'écrire sous la forme :

$$y(x) = y_m + A \sin(2\pi f x + \phi) \quad (\text{II.7})$$

où x représente les points de mesures, et y_m la valeur moyenne, A l'amplitude, f la fréquence, ϕ le déphasage. L'estimation initiale de l'offset est simplement la valeur moyenne du spine mesurée sur l'ensemble des points. Ensuite, une transformée de Fourier sur les valeurs mesurées permet d'obtenir les trois autres paramètres dans le domaine fréquentiel.

Le contrôle visuel pour qu'un fut fasse un tour sur lui-même sert pour fixer les bornes de détection de la fréquence du signal. Cette fréquence correspond à une grandeur physique analogue au nombre d'ondes. Le fut effectue une rotation entre le 7^e et le 8^e point de mesure, pour une période comprise entre 14 et 16 millimètres parcourus par l'actionneur. La fréquence de rotation du fut devrait donc se trouver entre $\frac{1}{16}$ et $\frac{1}{14}$. Dans l'hypothèse où un fut possède une symétrie de raideur avec un axe qui est plus raide et un axe moins raide, la fréquence du signal du spine devrait être deux fois plus élevée que sa fréquence de rotation. On aurait donc les bornes $\frac{1}{8} < f < \frac{1}{7}$. En procédant de cette manière, on est certain que le pic de densité spectrale de puissance à l'intérieur des bornes donne une amplitude A et une fréquence f plausibles (Annexe C.2). Enfin, l'angle de phase à cette fréquence donne le déphasage du signal. Les coefficients estimés sont ensuite affinés avec une régression non-linéaire au sens des moindres carrés, permettant de minimiser l'écart quadratique moyen (MSE_s) entre les données de raideurs mesurées et le modèle basé sur l'équation II.7. Finalement, cette erreur pourrait être un témoin pour caractériser si une flèche se comporte différemment des autres au niveau de sa raideur.

Sur la Figure (II.14) sont représentés le signal du spine obtenu après calcul sur les données brutes de l'automate (bleu), la première estimation du modèle avec les coefficients

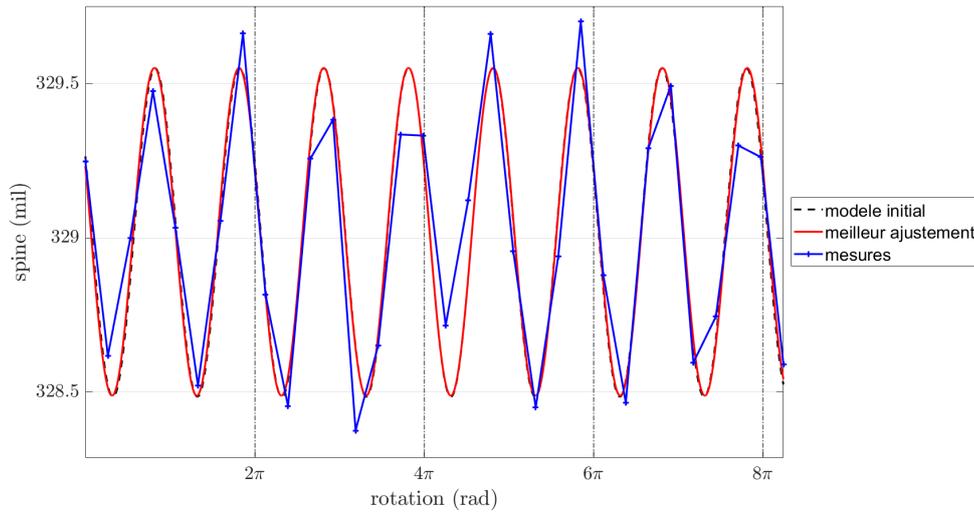


FIGURE II.14 – Variation du spine et modèle sinusoïdal

obtenus avec la transformée de Fourier (pointillés noirs), puis l'optimisation du modèle (rouge), quasiment superposé, car très similaire au modèle initial dans le cas présent. Pour le signal périodique du spine modélisé, on note y_s le spine moyen, A_s l'amplitude, f_s la fréquence, ϕ_s le déphasage. La fréquence du signal permet aussi d'établir une correspondance entre la distance parcourue par l'actionneur linéaire et la rotation du fut autour de son axe longitudinal.

À travers la Figure (II.14), la symétrie de raideur pour un fut apparaît et on observe quatre extremums par rotation complète. La localisation du minimum s_{min} et du maximum s_{max} sont calculés avec :

$$\begin{cases} s_{max} = \left(\frac{\pi}{2} + 2\pi n - \phi_s\right) \frac{1}{2\pi f_s} & , n \in \mathbb{Z} \\ s_{min} = \left(\frac{3\pi}{2} + 2\pi n - \phi_s\right) \frac{1}{2\pi f_s} & , n \in \mathbb{Z} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Ces extremums peuvent se trouver n'importe où autour du fut. On définit alors α_{min} et α_{max} la position angulaire des extremums de raideur celles qui sont comprises entre $\left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$ par rapport à la position de référence du fut (Figure II.15).

Le diamètre d'un fut devrait également suivre une modélisation sinusoïdale, cependant les variations sur le diamètre se sont révélées trop aléatoires d'un fut à l'autre et il n'a pas été possible de caractériser l'ensemble des flèches avec une fréquence sinusoïdale de façon assez robuste. Sur la Figure C.3 en annexe, deux futs différents sont représentés avec les mesures de diamètre et la modélisation sinusoïdale qui en découle. Le meilleur ajustement pour ces deux futs donne des fréquences de diamètre totalement différentes avec un facteur deux d'écart et ce même en bornant la recherche de ces dernières. C'est pourquoi le diamètre moyen d ainsi que la rectitude r sont calculés directement à partir des données du capteur optique. La masse du fut m_f quant à elle est toujours obtenue avec une balance.

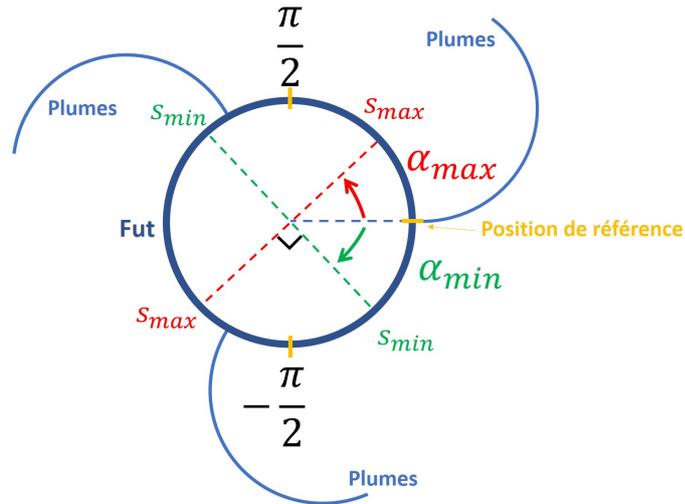


FIGURE II.15 – Section d'une flèche et localisations des extremums de raideur α_{min} et α_{max}

4.2.2 Flèches

Les 60 futs mesurés sont utilisés pour composer des flèches (Figure II.16). Les futs sont d'abord découpés à une allonge spécifique correspondant à celle d'un archer, en utilisant un coupe-tube PCOCUT (Decut, Guangdong, Chine). Puis, ils sont assemblés avec des pointes X10 (Easton, Salt Lake City, États-Unis) identiques à celle présentée sur la Figure I.8, un ensemble de trois plumes vrillées Spin Wing Vanes (Detroit, États-Unis), et des encoches Pin Nock (Beiter, Dauchingen, Allemagne). Une empenneuse Tri-Liner (Beiter, Dauchingen, Allemagne) a permis de répartir équitablement les trois plumes autour du fut. Une des plumes était alignée par rapport à la position de référence du fut et les deux autres plumes placées en fonction de celle-ci (Figure II.15). L'orientation de l'encoche était identique pour l'ensemble des flèches. Le montage a été réalisé par un archer expérimenté, travaillant au Pôle France pour la Fédération Française de Tir à l'arc.

Les flèches sont pesées au fur et à mesure de leur assemblage et du montage de sorte à avoir la masse de tous les éléments qui la composent en utilisant la même balance que le banc de mesure des futs. Chacune des parties constitutives des flèches ont été sélectionnées aléatoirement avant leur assemblage. On note m_{fc} la masse du fut coupé, m_e la masse de l'empenne, composé des trois plumes, m_n la masse de l'encoche, m_p la masse de la pointe, m_c la masse de la résine utilisée pour assembler la pointe et enfin m_T la masse totale de la flèche entièrement montée. La position de référence du fut, utilisée à la fois lors de la mesure sur le banc et lors du montage des plumes permet d'avoir une indication sur l'influence du positionnement de l'empenne autour du fut par rapport aux extremums de raideur.

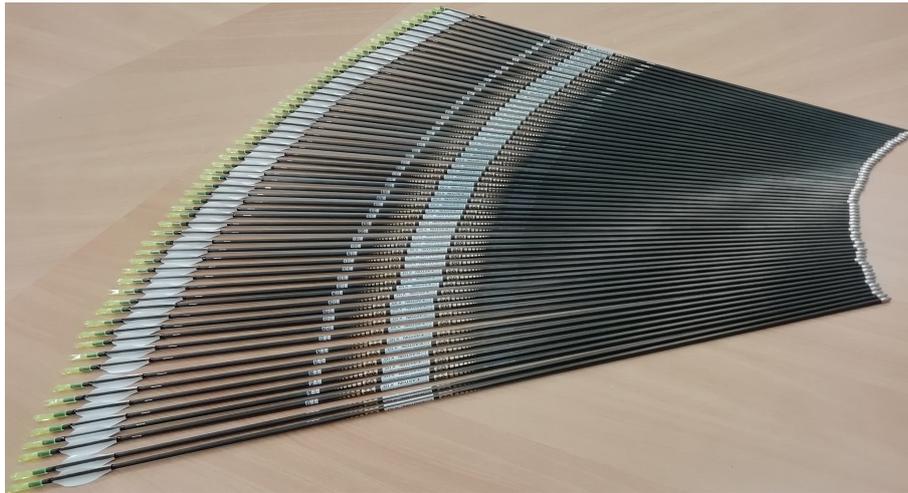


FIGURE II.16 – Flèches montées

4.2.3 Machine de tir

Une fois assemblées, les flèches sont tirées avec une machine capable de produire des tirs de façon répétable en enlevant la variabilité humaine (section I.4.2). Ces flèches ont été adaptées à l'allonge d'un archer, et donc vont de pair avec son arc. Celui utilisé sur la machine de tir est une reproduction exacte de l'arc dont se sert l'archer quotidiennement. Cet arc a été réglé par l'archer lui-même, avant d'être installé sur la machine de tir de manière à pouvoir reproduire un tir qui se rapproche de ce dernier. Les branches montées sur cet arc sont indiquées à 231 newtons (52 lbf) par le fabricant.

La machine de tir a été conçue par Jérôme Trouillet pour le compte de la Fédération Française de Tir à l'Arc. Ce sont les entraîneurs nationaux qui l'utilisent principalement pour le tri de flèches montées et le réglage des arcs des archers du Pôle France. Trois parties composent ce dispositif visible sur la Figure II.17 (gauche). Tout d'abord, le bâti, qui est ancré au sol pour assurer une stabilisation lors du tir ainsi qu'un positionnement initial de la machine répétable. En complément, deux lests de 20 kilos chacun sont positionnés de part et d'autres. À l'avant, l'arc est positionné de façon à avoir un seul mouvement possible, qui est la bascule vers l'avant suivant le départ de la flèche, de sorte à pouvoir imiter le mouvement naturel de l'arc après un tir réalisé par un humain (section I.3.1). Une « main » mécanique, composée de trois doigts rigides, permet la reproduction du lâcher méditerranéen (Figure II.17 droite) afin d'obtenir la déviation latérale de la flèche lors de sa sortie d'arc (section I.2.3.1). L'armement de l'arc est effectué en reculant la « main » à l'aide d'un système de câbles, jusqu'à atteindre l'allonge désirée matérialisée des butées réglables, assurant ainsi une allonge répétable.

La machine de tir était localisée dans une halle couverte, éliminant l'influence du vent sur la phase aérienne de la flèche. La cible était composée de feuille de papier millimétré, située à une distance de 70 mètres de la machine, soit la distance olympique. L'ensemble des flèches sont tirées au cours d'une session par volée de dix flèches, regroupées par dizaine en fonction de leur numérotation. L'ordre de tir réalisé était croissant par dizaine, mais au sein de chaque volée, les flèches étaient sélectionnées aléatoirement et le numéro des flèches tirées était inconnu de l'expérimentateur. Pour chaque flèche, les coordonnées

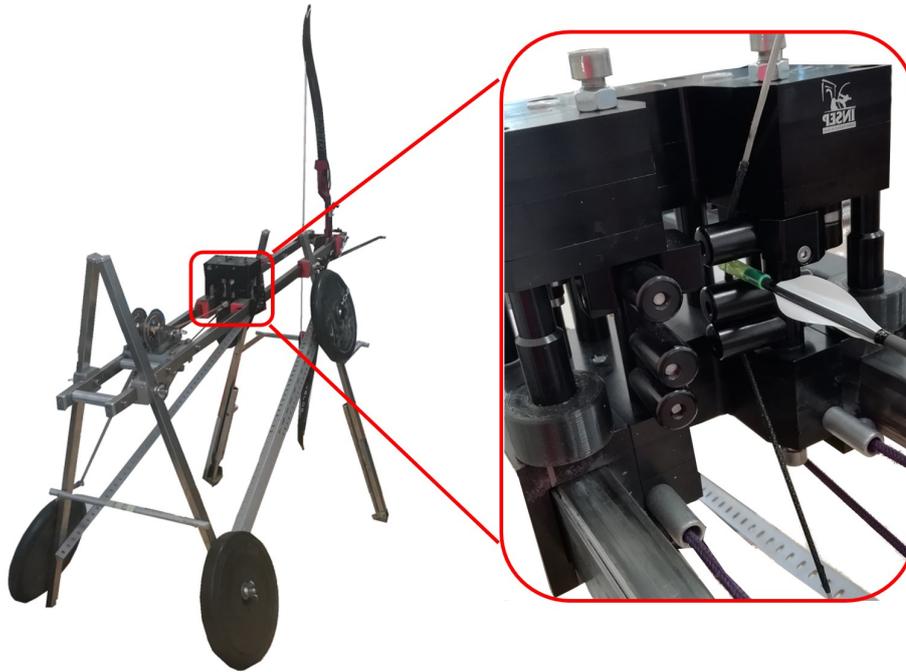


FIGURE II.17 – Gauche : machine à tirer avec un arc monté dessus. Droite : agrandissement sur la « main » mécanique (vue de face, orientation inversée par rapport à la machine)

(x, y) du centre de la flèche étaient notées. Au total, cinq sessions de tirs sur différentes journées ont été programmées, soit 300 tirs réalisés. La position de la cible était marquée au sol afin de pouvoir la repositionner de manière répétable à chaque début de session à la distance de 70 mètres. Cependant, malgré les précautions prises pour positionner la feuille de papier millimétré à la même place, de légères variations ont été constatées. On fait alors l'hypothèse que la position moyenne du groupement de flèches est identique d'une session à l'autre. Ainsi, pour chaque session, l'origine du repère est la position moyenne du groupement de flèches, ce qui permet la superposition de toutes les sessions de tirs par rapport à ce point. On note alors x_{moy} et y_{moy} la moyenne des positions de chaque fut dans ce repère après les cinq tirs.

4.2.4 Statistiques

Pour connaître les relations qui lient les caractéristiques des flèches entre elles, ainsi que leur influence sur leur position verticale et horizontale en cible après les tirs, une corrélation de Pearson est appliquée sur chacun des paramètres deux à deux. Parmi ces paramètres, on retrouve ceux qui représentent la raideur (y_s, A_s, f_s, ϕ_s), la symétrie de raideur (MSE_s), la rectitude (r), le diamètre (d), le montage ($\alpha_{min}, \alpha_{max}$), la masse (m_T, m_f, m_p), et sa position finale en cible (x_{moy}, y_{moy}).

En définitive, ce qui semble primordial pour un archer concernant les flèches qu'il sélectionne est leur similitude. Cependant, les paramètres qui les caractérisent, en plus d'être nombreux, sont pour la plupart interdépendants, ce qui rend difficile leur lecture pour fournir un critère de sélection de futs aux entraîneurs et aux archers. Il faudrait alors

trouver quelles combinaisons de paramètres sont les plus pertinentes pour le tri sélectif, en identifiant celles qui permettent d'obtenir le meilleur groupement en cible.

Pour cela, on introduit deux notions de distances en séparant les paramètres propres aux flèches et au montage, de ceux liés aux positions en cible après les tirs. Tout d'abord on note $d_{cible}(i, j)$ la distance euclidienne en cible entre deux flèches i et j de coordonnées respectivement (x_i, y_i) et (x_j, y_j) :

$$d_{cible}(i, j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (\text{II.9})$$

avec n le nombre de flèches total, $i \leq n$, $j \leq n$ et $i \neq j$. Pour 60 flèches, il existe entre paires $\binom{60}{2}$ associations possibles, soit 1770 combinaisons en tout.

Pour les propriétés liées aux flèches, le nombre de combinaisons possibles de paramètres au total n_{combi} est donné par :

$$n_{combi} = \sum_{p_f=1}^{n_p} \binom{n_p}{p_f} \quad (\text{II.10})$$

où p_f représente une des propriétés sus-mentionnées, et n_p le nombre total de paramètres. Pour les 12 paramètres sélectionnés, il y a 4106 combinaisons existantes, notées C . De la même manière que la distance en cible, pour chaque combinaison C entre deux flèches i et j , on peut définir une distance mécanique $d_{meca}(i, j, C)$:

$$d_{meca}(i, j, C) = \sqrt{\sum_{k=1}^{n_k} (p_{k,i} - p_{k,j})^2} \quad (\text{II.11})$$

avec n_k le nombre de paramètres de la combinaison C , $p_{k,i}$ le paramètre k appartenant à la liste C pour la flèche i et $p_{k,j}$ le paramètre k appartenant à la liste C pour la flèche j , $i \leq n$, $j \leq n$ et $i \neq j$

L'objectif alors est de comparer la distance en cible normalisée avec la distance mécanique normalisée de toutes les combinaisons de paramètres afin d'identifier celles qui expliquent le mieux la proximité des flèches en cible les unes par rapport aux autres. Pour cela, on calcule la racine de l'erreur quadratique moyenne entre les deux distances qu'il faudrait minimiser.

4.3 Résultats

4.3.1 Caractéristiques des futs

Les caractéristiques des futs sont présentées dans la Table II.9. Les 60 futs étaient inclus dans ceux mesurés auparavant (section II.3.2.3) donc leurs propriétés de rectitude, diamètre et masse sont sensiblement les mêmes que ce qui est présenté dans la Table II.6 pour la catégorie de spine 325. L'écart-type sur les masses est toutefois plus faible. Concernant les paramètres du spine obtenus après la modélisation, on constate que la moyenne du spine correspond. Le très faible écart-type sur la fréquence du signal est un témoin que les futs ont bien tous effectué un nombre de rotations très similaire. Comme

la position initiale du fut sur le banc était standardisée par rapport à l'étiquetage des futs, on peut considérer que la valeur moyenne du déphasage ainsi que sa grande variabilité indiquent que l'étiquetage du fut est apposé de façon aléatoire, indépendamment de la variation de raideur. L'erreur quadratique moyenne est également faible devant la valeur du spine, en prenant la racine de cette quantité, l'erreur est inférieure à 0,05% des mesures, ce qui témoigne d'une bonne correspondance entre le modèle (Équation II.7) et les données issues du banc. La méthode proposée pour caractériser le spine des flèches est par conséquent validée.

y_s (mil)	A_s (mil)	f_s (rad/m)	ϕ_s (rad)	MSE_s	r (mm)	d (mm)	m_f (g)
326,4±2,8	0,5±0,4	0,134±0,001	3,3±1,8	0,018±0,007	0,007±0,002	5,616±0,022	19,68±0,06

TABLE II.9 – Paramètres des futs, y_s le spine moyen, A_s son amplitude, f_s sa fréquence, ϕ_s son déphasage, MSE_s l'erreur quadratique moyenne entre le modèle et les mesures du spine, r la rectitude, d le diamètre et m_f la masse du fut.

4.3.2 Caractéristiques des flèches montées

Dans la Table II.10 sont listés les masses obtenues lors de pesées effectuées pendant le montage. La découpe du fut brut pour correspondre à l'allonge de l'archer a raboté celui-ci de $1,006\pm 0,007$ grammes. Cette étape de coupe n'occasionne pas une grande variabilité sur la masse de la flèche par rapport à celle issue de la fabrication, environ huit fois plus faible ($0,06$ pour m_f). Le plastique qui compose les encoches et les plumes permet un procédé de fabrication répétable qui n'introduit pas non plus de variabilité de masse importante sur le montage final, environ dix fois plus faible en additionnant ces deux variabilités. En revanche, la masse des pointes est plus variable, mesurée à près de la moitié de celle des futs et l'écart-type correspond exactement à la variation qui est suggérée par J. L. PARK 2021a. La variabilité de masse introduite par l'ajout de colle lors de l'assemblage de la pointe est similaire à celle des plumes ou de l'encoche. Finalement, comme les pointes et les futs coupés ont été associés aléatoirement, on obtient la même variabilité de masse sur les flèches montées.

	m_{fc}	m_n	m_e	m_p	m_c	m_T
(g)	18,672±0,056	0,547±0,001	0,243±0,004	7,775±0,032	0,012±0,002	27,249±0,057
(% m_T)	68,53±0,11	2,01±0,01	0,89±0,01	28,53±0,11	0,04±0,01	100±0

TABLE II.10 – Masses des composants d'une flèche. m_{fc} : masse du fut coupé à l'allonge de l'archer, m_n : masse de l'encoche, m_e : masse de l'empennage, m_p : masse de la pointe, m_c : masse de la colle, m_T : masse de la flèche montée.

En appliquant le critère de sélection en fonction du spine et/ou de la masse (section II.3.2.4), appliqué sur le spine moyen issu de la modélisation y_s et sur la masse des flèches montées m_T , sur les 60 flèches, 30 respectent le critère de spine, 18 le critère de masse et seulement 3 le critère associant les deux paramètres. Il aurait été possible de réduire

la variation de masse des flèches montées en associant la plus lourde avec la pointe la moins lourde et ainsi de suite. En procédant ainsi, l'écart-type de la masse des flèches montées aurait été de 0,027 gramme, soit en dessous de l'étendue de masse définie par J. L. PARK 2021a. Dans ce cas, 43 flèches respectent le critère de masse, toujours 30 pour le critère de spine, et 13 qui respectent le critère le plus exclusif associant les deux paramètres, soit 22% du lot. L'association des pointes plus lourdes avec les futs plus légers permettrait de réduire considérablement la quantité nécessaire de futs à mesurer pour extraire une douzaine de flèches de compétition pour un archer, à 5 douzaines seulement contre les 10 douzaines estimées auparavant dans cette catégorie de spine (Table II.7). Ce procédé d'assemblage semble très facile à mettre en œuvre, en faisant néanmoins attention à l'équilibre de la flèche montée et à la position du centre de masse (I.2.2.4). Il permettrait de faire gagner du temps pour les mesures sur le banc de futs et surtout représente une économie conséquente sur le budget alloué pour le matériel ou d'avoir plus de flèches de compétition pour un même budget.

4.3.3 Machine de tir

Lors des sessions de tirs, une des flèches a malheureusement manqué la cible et a été inutilisable par la suite. Ce raté n'est pas dû à un manque de précision de la machine, bien au contraire. Après la première session de tir, justement à cause de cette précision, l'encoche de cette flèche s'est retrouvée endommagée car une des flèches tirées après l'a probablement percutée avant de se planter dans la cible. Un tel évènement est plutôt rare sur des tirs à 70 mètres et sur le moment ce potentiel impact entre les deux flèches n'a pas été identifié. Même après récupération des flèches plantées sur la cible, aucune vérification n'avait été faite sur les encoches. L'encoche dont la structure s'est retrouvée fragilisée n'a pas supporté le tir qui a suivi. Par conséquent, un contrôle systématique des encoches suite aux tirs a été réalisé pour les sessions qui ont suivi cet incident. Les résultats sont donc présentés sur les 59 flèches restantes.

Sur la Figure II.18 sont représentées les positions moyennes (x_{moy} , y_{moy}) des flèches après les cinq sessions de tirs. Les positions des flèches pour chacune des sessions sont présentées en Annexe C.4, L'ensemble des flèches peuvent tenir dans un cercle de diamètre 12,2 centimètres représentant la zone du « 10 ». En pointillé noir, on représente un cercle du diamètre de la zone du « X » (6,1 centimètres) qui englobe le maximum de flèches possible, en prenant en compte les cas dits 'cordons' où une flèche est à cheval dessus. Sur les 59 flèches, 50 tiennent dans un tel cercle, soit 85%. Par rapport à la machine présentée dans OHARA et al. 2020, avec 10 flèches sur 10 dans un cercle de 12,2 centimètres de diamètre à 18 mètres, celle utilisée présentement est aussi précise mais à 70 mètres. Pour toutes les flèches, l'écart-type de leur position intra-session par rapport au centre du groupement était de $2,2 \pm 1,1$ centimètres sur l'axe horizontal et de $2,0 \pm 1,0$ centimètres sur l'axe vertical, ce qui témoigne d'une variabilité similaire de la machine sur les deux axes. Sur l'axe vertical au moins, cette dispersion pourrait être causée par une vitesse d'éjection variable de la machine (K. B. LIN et al. 2009).

Il est intéressant de comparer la dispersion verticale du paquet de flèches après les tirs avec celle de la modélisation balistique sur ces mêmes flèches avec leur masse après montage et leur diamètre moyen mesuré. Excepté ces deux paramètres, les données d'entrées

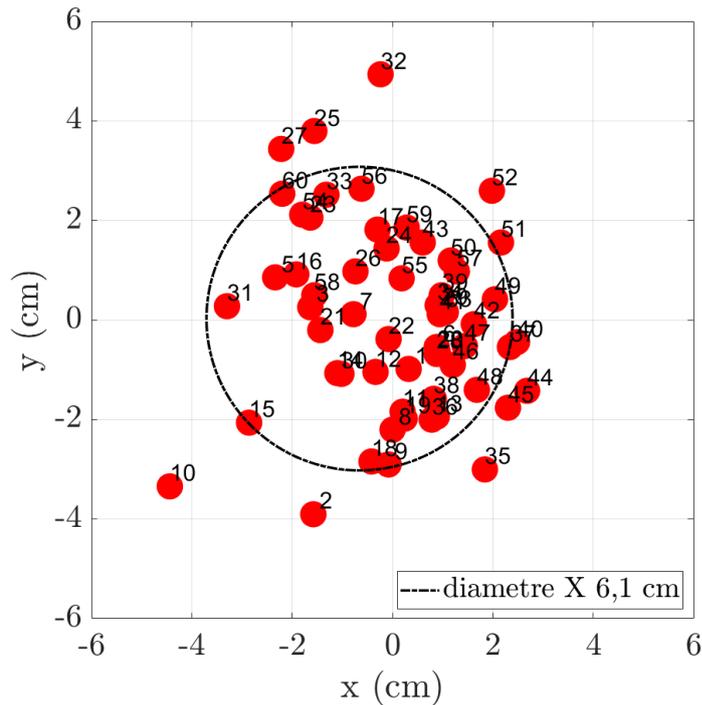


FIGURE II.18 – Localisation moyenne des flèches en cible

du modèle balistique sont les mêmes que celles présentées dans la section II.3.2.5 pour la catégorie de spine 325 car l'énergie potentielle des branches de l'arc et l'angle de tir n'ont pas été mesurés. Par conséquent, la simulation n'est pas totalement représentative des conditions réelles de tirs sur la machine, et donnée à titre d'indication.

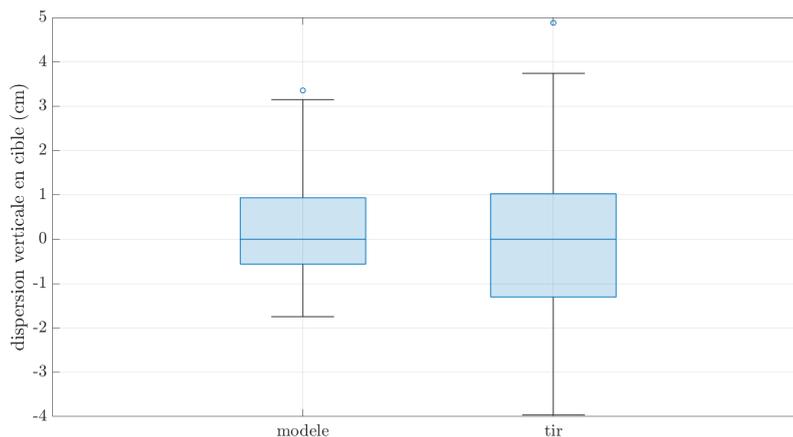


FIGURE II.19 – Comparaison de la dispersion verticale à 70 mètres entre le modèle balistique et les tirs sur machine.

Sur la Figure II.19, les dispersions pour le modèle et les tirs sont centrées sur la médiane de chaque groupe. Pour les 59 flèches, le modèle fournit une estimation de l'étendue verticale à 5,1 centimètres entre la flèche la plus haute et la moins haute, tandis que pour

les tirs réalisés cette étendue verticale est à 8,8 centimètres. Sur cet axe, 5 flèches sont en dehors de la zone du « X », alors que toutes seraient dedans sur la simulation. Cependant, dans le modèle utilisé, la variabilité verticale des flèches dépend uniquement de leur masse et de leur diamètre et les autres propriétés des flèches montées ne sont pas considérées. Il faut également ajouter la variabilité qui est induite par la machine de tir, qui produit toutefois une meilleure performance que ne le ferait un humain. En considérant l'entièreté des 295 tirs comptabilisés pendant l'ensemble des sessions (Annexe C.4), le score aurait été de 2929/2950 soit 9,93 points par flèche en moyenne. Le record du monde à 70 mètres en arc classique sur 72 flèches est à 702/720 soit 9,75 points par flèche (Brady Ellison, États-Unis) et sur 144 flèches à 1391/1440 points, soit 9,66 points par flèche (Kim Woojin, Corée du Sud)²².

4.3.4 Statistiques

Les corrélations par paires de paramètres sont présentés sous forme de corrélogramme (Figure II.20), et les coefficients exacts sont inclus dans une Figure annexe C.5. Le lien entre le spine d'un fut avec sa masse, ainsi que son diamètre représenté sur la Figure II.12 pour l'ensemble des futs mesurés est également présent au sein d'une catégorie de spine, avec une corrélation plus modérée causé par une plus faible dispersion des données ($R = -0,37$ et $R = -0,52$ respectivement). Comme la masse d'un fut représente 70% de la masse totale d'une flèche montée, il est logique d'avoir la même corrélation négative qui se retrouve entre la masse totale de la flèche et le spine ($R = -0,50$). L'amplitude du signal de spine semble modérément corrélée à la valeur moyenne du signal ($R = 0,26$), ce qui tend à montrer que les flèches les plus raides (spine faible) en moyenne sont aussi celles qui auront la moins grande variation de raideur. Ces corrélations soulignent l'interdépendance de chacun de ces paramètres permettant de caractériser un fut. Sur les autres paramètres liés à la raideur, ni la fréquence ni le déphasage ne sont corrélés à d'autres propriétés.

Parmi les paramètres qui influencent de façon significative la position verticale de la flèche en cible, on retrouve ceux liés à la masse, avec $R = -0,36$ pour la masse totale, ce qui correspond bien au comportement attendu, des flèches plus lourdes seront plutôt en bas d'un groupement de flèches par rapport à des flèches moins lourdes. Aucun autre paramètre n'a atteint le seuil de significativité sur l'axe vertical, le seul qui s'en rapproche est l'amplitude du spine ($p = 0,07$), qui pourrait avoir un effet opposé à la masse ($R = 0,23$), plus la raideur est variable au sein d'une flèche, plus elle aura tendance à se retrouver en haut d'un groupement. Sur l'axe horizontal, le seul paramètre à atteindre le seuil de significativité est le diamètre ($R = -0,28$). En revanche, ni le spine moyen, ni son amplitude (comme suggéré par J. L. PARK 2014), ni la symétrie de raideur, ni le montage, ne semblent avoir une influence sur la position des flèches en cible, aussi bien horizontalement que verticalement. La présence du diamètre comme paramètre peut s'expliquer par l'interaction que subit la flèche lors de sa phase d'éjection avec le clicker. Un diamètre de fut plus élevé va comprimer légèrement plus le ressort, et par conséquent augmenter la force de rappel de celui-ci. Ainsi, la flèche sera déviée vers la gauche pour

22. <https://worldarchery.sport/fr/records-du-monde?category=Recurve%20Men> (Accès septembre 2022)

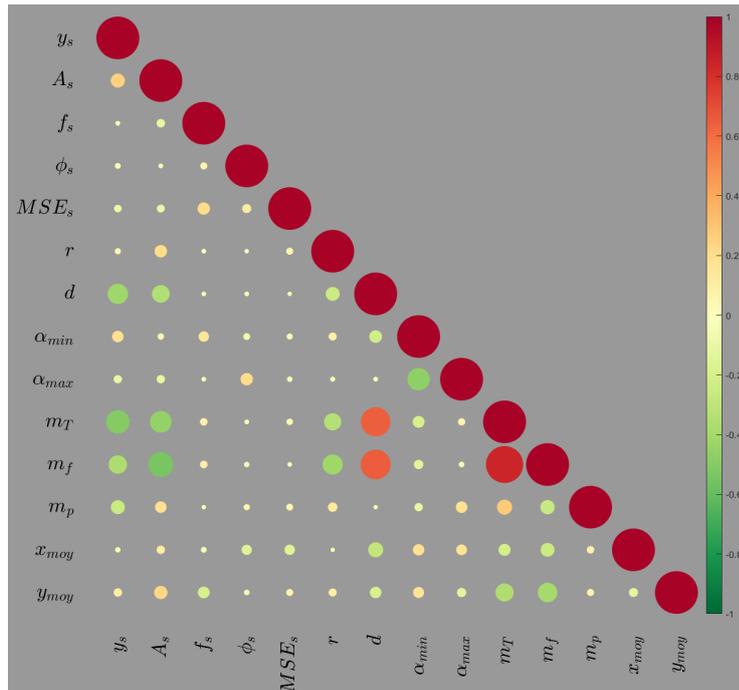


FIGURE II.20 – Corrélations par paires de paramètres, y_s le spine moyen, A_s son amplitude, f_s sa fréquence, ϕ_s son déphasage, MSE_s l'erreur quadratique moyenne entre le modèle et les mesures du spine, r la rectitude, d le diamètre, m_T , m_f , m_p la masse de la flèche montée, du fut et de la pointe, α_{min} et α_{max} la position angulaire des extremums de raideurs, x_{moy} , y_{moy} , la position moyenne horizontale et verticale des flèches en cible.

un arc de droitier, et inversement vers la droite pour une flèche avec un diamètre moins élevé, ce que l'on retrouve bien sur les corrélogrammes (Figure II.20 et Annexe C.5).

L'absence de l'influence du spine semble surprenante compte tenu de l'importance de l'interaction arc-flèche dans la balistique interne (section I.2.3). Une hypothèse à cette absence pourrait être sa distribution normale visible sur la Figure C.5, qui lorsqu'elle est combinée à un bon réglage d'arc et une répétabilité de la machine dans le lâcher, permet d'en restreindre la dispersion latérale. L'absence d'une influence quelconque du montage et du positionnement angulaire de l'empennage par rapport aux extremums de raideur sur la dispersion en cible nous questionne également au vu des présomptions des entraîneurs et des archers. Il se pourrait alors que la répétabilité de la machine de tir dans le lâcher de corde permette d'en réduire les effets, car une partie de la dispersion latérale des flèches en cible provient des ces erreurs dans les tirs humains (MADDALENA 2020).

Après avoir mis en évidence l'importance de la masse de la flèche vis-à-vis des autres paramètres sur leur position verticale, et celle du diamètre sur leur position horizontale, on cherche maintenant à trouver les combinaisons de paramètres qui peuvent le mieux expliquer la proximité entre deux flèches en cibles. La Figure (C.5) en annexe montre la racine de l'écart quadratique moyen pour l'ensemble des combinaisons de paramètres, organisés par ordre croissant. Arbitrairement, un seuil a été fixé à 1% de l'ensemble des

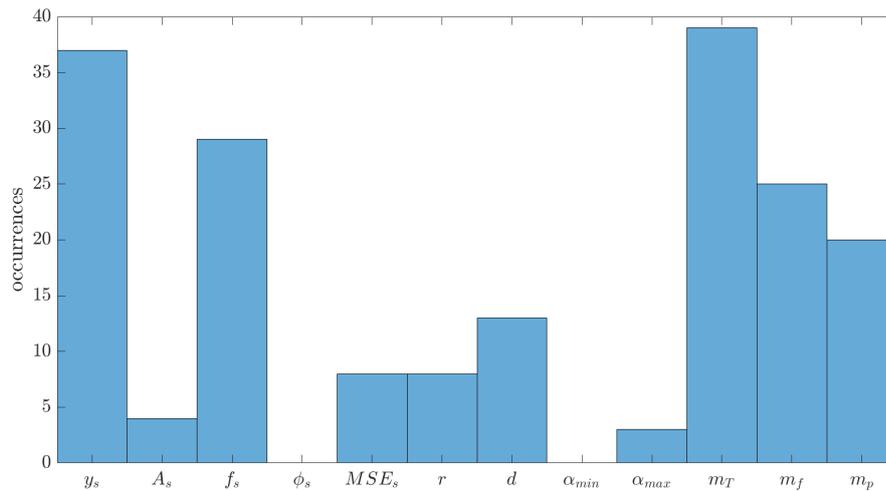


FIGURE II.21 – Occurrences des paramètres pour les combinaisons ayant la plus faible RMSE entre la distance mécanique et distance en cible. y_s le spine moyen, A_s son amplitude, f_s sa fréquence, ϕ_s son déphasage, MSE_s l’erreur quadratique moyenne entre le modèle et les mesures du spine, r la rectitude, d le diamètre, m_T , m_f , m_p la masse de la flèche montée, du fut et de la pointe, α_{min} et α_{max} la position angulaire des extremums de raideurs.

combinaisons possibles et le nombre d’occurrences des paramètres présents parmi les 41 meilleures combinaisons sont présentées sur la Figure II.21.

Il apparaît alors que deux flèches qui ont une distance proche l’une de l’autre en cible, seraient celles qui ont une similarité de raideur (90% d’occurrences parmi les 41 combinaisons), de fréquence de raideur (71%) et de masse (95%). Par ailleurs, ces trois paramètres composent aussi la combinaison avec l’écart minimal entre ces deux distances. Suivent d’autres paramètres liés à la masse du fut (61%), celle de la pointe (49%), et dans une moindre mesure le diamètre (32%), la rectitude (20%), la symétrie de raideur (20%). La présence de la masse et du spine (ou de la raideur) confirme les critères des tris donnés par (J. L. PARK 2021a) sur la masse et les écarts de raideurs entre les flèches, tandis que la présence du paramètre de fréquence suggère que le schéma de variation de la raideur autour du fut pourrait avoir une certaine influence. Si une majorité des futs suivent une variation de raideur de type sinusoïdal, il faudrait donc prendre en compte ce paramètre de fréquence. Cependant, si une majorité de futs ne suivent pas une sinusoïde, il faudrait alors déterminer un autre modèle pour pouvoir caractériser cette variation et sélectionner des futs similaires.

En complément, il faudrait également sélectionner les flèches en fonction de la fréquence de la raideur. Sur la Figure C.5 présentée en annexe, on peut apercevoir que la distribution des fréquences qui ont été détectées par le modèle suit une loi normale. Les flèches qui ont une fréquence très éloignée du mode principal témoignent d’une dissimilarité quant au comportement de l’évolution de la raideur autour de l’axe longitudinal et seraient donc à éliminer du tri de flèche après mesure sur le banc. En considérant un seuil à trois écarts-types par rapport à la moyenne des fréquences mesurées, deux flèches seraient

exclus. Un exemple d'une telle flèche est présenté sur la Figure II.22. Il est clairement visible que cette flèche possède un profil de raideur différent du modèle qui a été introduit, causé probablement par un défaut pendant le processus de fabrication lors de la pose des couches de carbone. Par ailleurs, cette fréquence est celle qui est le plus corrélée à l'erreur quadratique moyenne entre le modèle sinusoïdal et les valeurs mesurées MSE_s ($R = 0,21$), mais non significativement ($p = 0,09$). Les deux flèches anormales au niveau de la fréquence de raideur sont également celles qui avaient le plus grand écart-type horizontal et vertical ce qui témoigne d'un comportement erratique lors d'un tir.

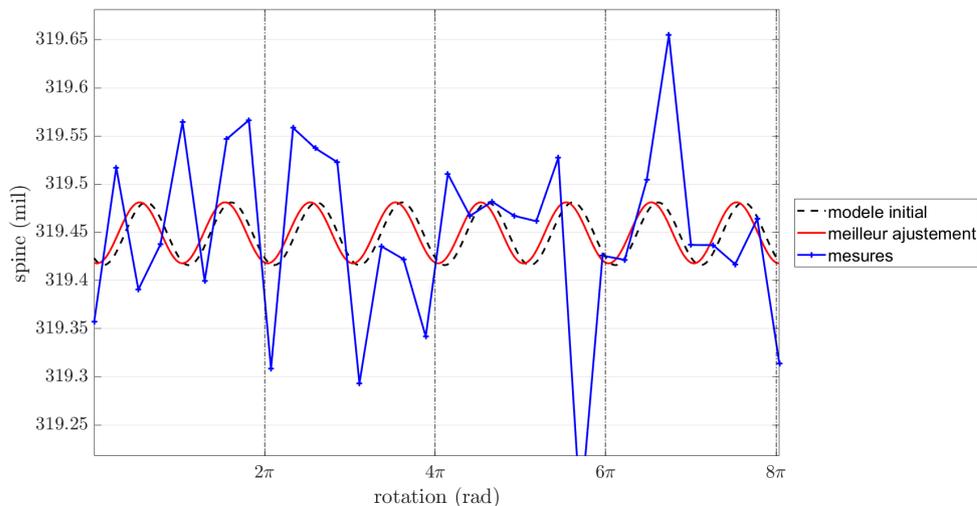


FIGURE II.22 – Variation du spine et modèle sinusoïdal pour un fut à fréquence sortant de la normalité.

4.4 Limites

Dans cette partie expérimentale, les résultats obtenus l'ont été pour un arc unique, utilisé à une seule valeur d'énergie potentielle élastique, pour des flèches appartenant à une seule catégorie de spine découpées à une allonge spécifique. Le poids de chacun des paramètres sur la dispersion horizontale et verticale des flèches en cible pourrait différer avec d'autres conditions initiales de matériel. De plus, sur la machine de tir, la « main » mécanique reproduit un mouvement latéral de la corde comme pour un tir effectué par un humain. Cependant, le matériau utilisé pour composer les « doigts » est rigide et par conséquent n'a pas le même coefficient de friction que des doigts humains qui ont un comportement plutôt visco-élastique.

Parmi toutes les catégories de spine et toutes les flèches testées (Table II.4), la catégorie de spine 325 n'était pas celle qui avait la plus grande dispersion verticale d'après le modèle balistique simple (Figure II.13). Il est possible qu'en piochant des lots dans des catégories de spine où la variabilité était plus élevée sur les caractéristiques des futs, les écarts en cible auraient été amplifiés, ce qui aurait facilité l'analyse des résultats. Cependant, le choix de la catégorie de spine pour les tirs a été contraint, car une étude comparative entre un tri des flèches effectué par la machine de tir et un tri effectué par

un archer devait être réalisée. Malheureusement, l'archer qui était associé à l'expérimentation a abandonné son projet olympique et n'a pas pu effectuer les tirs de son côté. Le matériel qui a été utilisé ayant été adapté spécifiquement pour cet archer, la comparaison n'a pas pu être réalisée. Il n'a donc pas été possible de vérifier si les flèches identifiées comme « bonnes » par un archer sont celles qui disposent d'une distance mécanique les plus faibles sur les paramètres proposés.

De plus, la mesure qui est réalisée sur les futs ne se fait que sur un endroit autour duquel les caractéristiques sont établies et représentent l'entièreté du fut. La localisation de la mesure a été choisie pour coller aux normes de caractérisation de la raideur (ARCHERY TRADE ASSOCIATION 2009). Mais un fut est en réalité légèrement biconique, ce qui induit un diamètre qui évolue sur la longueur du fut. Par conséquent, même si le centrage du fut sur les taquets était effectué avec minutie à l'aide d'une règle millimétrée, la position initiale du fut sur le banc de mesure peut avoir une incidence à la fois sur la raideur et sur le diamètre qui ont été obtenus.

5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude du matériel utilisé par les archers avec pour fil conducteur la réponse aux questionnements des entraîneurs et des archers.

Concernant les branches d'arc, l'utilisation du banc d'arc a permis d'établir les profils de force et de raideur des branches utilisées par les archers du Pôle France. Dans l'optique de la performance, l'objectif pour un archer est d'obtenir la plus grande énergie potentielle élastique possible afin d'avoir une plus grande vitesse théorique de la flèche en sortie d'arc. En particulier, une paire semblait procurer un avantage en étant plus efficace en présentant un profil mécanique singulier. Cependant, étant la seule représentante du fabricant Uukha à être mesurée, il n'a pas été possible de déterminer si toutes celles produites par ce fabricant possèdent ce même avantage. Pour les autres branches, aucune n'a semblé posséder un avantage quelconque par rapport aux branches de caractéristiques similaires.

Au sujet des futs de flèches, leur caractérisation à l'aide du banc de mesure dédié est une étape essentielle dans l'amélioration du processus de sélection en amont du montage, permettant dans un premier temps retirer les quelques flèches non conformes aux dires du fabricant. Une modélisation sinusoïdale a été proposée pour caractériser l'évolution du spine (ou raideur) d'un fut autour de son axe longitudinal.

Le poids des propriétés mécaniques d'un fut, d'une flèche et du montage ont été évaluées à l'aide d'une machine de tir, permettant de s'affranchir de la variabilité humaine. Seuls les paramètres de masse ont eu une influence significative sur la dispersion verticale, tandis que le diamètre a eu une influence sur la dispersion horizontale. Contrairement à ce qui est proposé dans le modèle de J. L. PARK 2014, ni la raideur, ni sa variation n'ont eu une corrélation significative sur la dispersion sur un des deux axes. Il semblerait éga-

lement que le montage de l'empennage n'a pas un poids important dans la dispersion des flèches.

Les tirs effectués par la machine ont permis d'établir trois paramètres à considérer en priorité pour la sélection de futs. Ces trois paramètres sont le spine (ou la raideur), sa fréquence, autrement dit le schéma de variation de la raideur autour du fut et la masse totale de la flèche. Le tri de futs en prenant en compte principalement la proximité de ces paramètres permettrait d'améliorer le groupement en cible.

Chapitre III

Archer

1 Introduction

Une fois que le matériel est optimisé, on peut s'intéresser à la composante humaine de la discipline apportant une variabilité certaine dans la performance, que ce soit dû à la biomécanique ou à la psychologie de l'archer. Afin de réaliser un retour objectif sur la performance d'un athlète, il est nécessaire de s'appuyer sur des outils de mesures dédiés. En ce sens, la mise en place d'une station d'expertise pouvant fonctionner en routine d'entraînement est un des objectifs de la Fédération Française de Tir à l'Arc. Cette station doit fournir aux archers et aux entraîneurs un retour rapide sur la qualité du tir flèche après flèche avec des critères objectifs de performance (section I.3.3).

Pour commencer, une étude de faisabilité a été conduite au sein du laboratoire de biomécanique de l'Institut Pprime pour la mise en place d'une telle station d'expertise. Le retour expérimental, ainsi que le ressenti d'un archer expérimenté vis-à-vis du dispositif, a permis non seulement de pouvoir mieux ajuster le matériel utilisé dans la deuxième étude réalisée, mais également dans une optique d'utilisation d'une station d'expertise en routine. Cette première étude de faisabilité a été l'occasion de réaliser en même temps une étude de cas sur un archer expérimenté français, pour évaluer l'influence de la technique d'armement sur son équilibre postural et sur les activations musculaires des membres supérieurs pendant les derniers instants de la phase de visée, puis pendant la phase de tir.

La seconde étude qui suit porte spécifiquement sur les stratégies d'anticipation posturale chez des archers entraînés jeunes et plus âgés. La séquence de tir peut être simplifiée en deux phases bien distinctes (section I.3.1). La tâche réalisée pendant la phase de visée se rapproche d'une tâche de maintien de la posture debout classique, où un certain équilibre du système archer-arc est établi et la performance dans ce sport de précision a été reliée à une maîtrise fine de l'équilibre permettant de minimiser les oscillations pendant cette phase (section I.3.3.4). Cependant, cet équilibre est perturbé lorsque la corde est lâchée volontairement par l'archer. Après des années d'entraînement et des milliers de flèches, un archer devrait avoir intégré les conséquences mécaniques de la perturbation volontaire qu'il s'inflige et des ajustements posturaux anticipés devraient avoir lieu dans un souci de maintien de l'équilibre (section I.3.4.4). Il n'a pas été établi si de tels ajustements sont présents chez des archers entraînés et si la présence de telles stratégies

posturales peuvent être un critère discriminant entre des archers experts et des archers moins bons.

2 Pré-étude - étude de cas et de faisabilité

2.1 Introduction

L'objectif de cette pré-étude de cas est triple. Dans un premier temps, il s'agira d'étudier comment les trois techniques d'armement en amont du tir influent sur l'équilibre postural et sur les activations musculaires des membres supérieurs dans les derniers instants de la phase de visée, juste avant de lâcher la corde. Ensuite, cette expérimentation sert à vérifier l'éventuelle existence des ajustements posturaux anticipés qui se produiraient avant le lâcher. Enfin, cette expérimentation servira également d'étude de faisabilité pour la station d'expertise désirée par la Fédération Française de Tir à l'Arc, en agrégeant de nombreux systèmes de mesures et à obtenir un retour critique de la part d'un archer sur le dispositif proposé.

Pendant une séquence de tir (section I.3.1), après que l'archer se soit positionné autour de la ligne de tir, débute la phase d'armement lorsque l'arc commence à être mis faiblement en tension simultanément à l'abduction des deux bras qui maintiennent la poignée et la corde. Il existe principalement trois techniques pour amener l'arc à hauteur de visage, appelées « upper », « direct » et « lower » draw. La technique « upper draw » qui est la plus répandue en France, consiste à lever l'arc bien au-dessus du visage avec la main de corde à hauteur de front, puis de ramener la corde au point d'ancrage sur le visage avec un mouvement descendant (Figure III.1, volet supérieur). Tout le contraire de la technique « lower draw », privilégiée par les archers coréens par exemple, qui consiste à lever les bras moins haut, en dessous du menton, puis de remonter jusqu'au point d'ancrage avec le bras de corde (Figure III.1, volet inférieur). La technique « direct draw » est intermédiaire entre ces deux stratégies d'armement, avec un point d'ancrage atteint le plus horizontalement possible (Figure III.1, volet central). La technique « upper draw » est celle préconisée au niveau fédéral en France. Après discussion avec les entraîneurs et les archers, son intérêt est de se « poser sur le centre de la cible » en s'aidant de la gravité, plutôt que de devoir rectifier la hauteur de visée avec l'arc tendu et porté à bout de bras.

Lors de la phase d'armement, la mise en mouvement des membres corporels et de l'arc créent une perturbation de l'équilibre postural de l'archer et une activation des muscles du membre supérieur sollicités. Les différentes stratégies d'armement entraînent potentiellement des schémas d'activation musculaires différents et donc un équilibre postural modifié. Dans les derniers instants de la phase de visée, l'équilibre postural de l'archer peut être assimilé à une tâche de maintien de la posture debout tout en visant précisément une cible avec un arc armé. La performance au tir à l'arc a été liée pendant cette phase de visée à des oscillations posturales minimales (section I.3.3.4) et à des schémas activations musculaires spécifiques (section I.3.3.3). Le lâcher de la corde est une perturbation volontaire de l'équilibre postural du système archer-arc établi, créant un recul de l'arc induit par l'éjection de la flèche (section I.2.1.5). Ce recul crée principalement un déséquilibre

23. https://www.youtube.com/watch?v=Z-Z1q-1K4aY&ab_channel=NUSensei



FIGURE III.1 – Illustration des techniques d’armement²³, haut : « upper draw », milieu : « direct draw », bas : « lower draw ».

du système sur l’axe de tir dans la direction opposée à la cible, par conséquent l’archer devrait potentiellement avoir intégré les conséquences mécaniques de cette perturbation, en utilisant des ajustements posturaux anticipés dans la direction de la perturbation afin de préserver son équilibre (section I.3.4.4).

2.2 Matériel et Méthodes

2.2.1 Sujet

Un archer de niveau national français a accepté de participer à cette étude. Au moment de l’expérience, il s’était classé au cours de l’année 65^{ème} aux championnats de France de tir à l’arc en extérieur à 70 mètres avec un score de 612/720 points, et à la même position aux championnats de France en intérieur à 18 mètres avec un score 537/600 points. Ces scores correspondent à la catégorie archer expert dans la littérature (SIMSEK, CERRAH, ERTAN et al. 2018) La technique usuelle d’armement de cet archer est celle utilisée couramment en France, à savoir la technique « upper draw ».

2.2.2 Déroulé expérimental

L’étude s’est déroulée au sein d’une salle d’expérimentation de l’Institut Pprime. Le participant a utilisé son propre matériel pour tirer, un arc classique recurve équipé d’un viseur et d’un système de stabilisation complet. Suite à des contraintes spatiales imposées par la salle d’expérimentation et par le positionnement du matériel, la distance de tir a été fixée à 12 mètres. Cette distance est atteinte en plaçant la cible en dehors de la salle, obligeant l’archer à tirer à travers la fenêtre. Une telle configuration n’est pas censée être perturbante pour un archer expérimenté car de nombreux pas de tirs d’entraî-

nement, comme par exemple à l'Institut National du Sport et de l'Expertise, sont dans une configuration identique, archers à l'intérieur et cible à l'extérieur.

Positionné autour de la ligne de tir, matérialisée par la séparation entre les deux plateformes de forces, le participant avait un pied sur chacune des plateformes (Figure III.2). Il a d'abord procédé à un échauffement des membres supérieurs en autonomie, puis à trois flèches de réglage pour se familiariser avec la distance et le dispositif expérimental composé de plateformes de forces, électromyographie de surface et d'un accéléromètre. L'ensemble de ces systèmes de mesures ont été échantillonnés à 1000 Hz, synchronisés à l'aide d'un module Giganet de Vicon (Oxford, Royaume-Uni) et les données récupérées grâce au logiciel Nexus 1.8 de Vicon. Un total de 9 flèches ont été tirées, dont 3 par technique d'armement (« upper », « lower », « direct »), sur une cible standard de compétition en intérieur de 40 centimètres de diamètre (Figure I.1), avec pour consigne de faire le meilleur score possible sur chaque flèche.

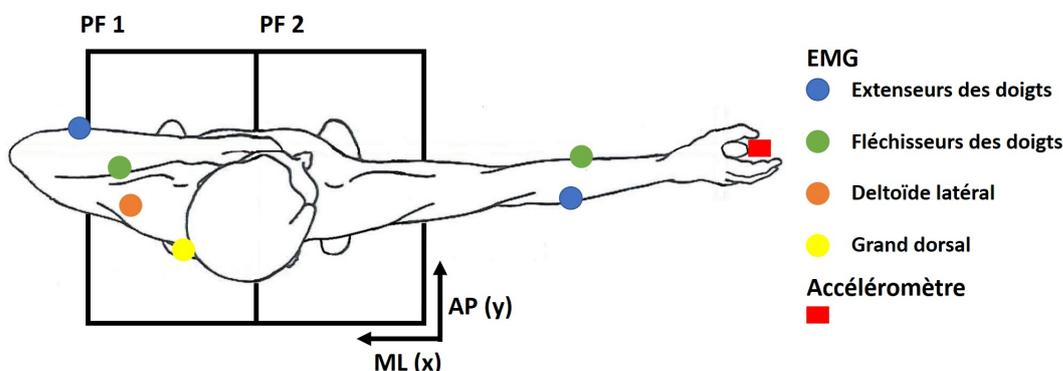


FIGURE III.2 – Schéma expérimental avec le matériel utilisé : 2 plateformes de forces, 6 boîtiers d'électromyographie de surface, un accéléromètre.

2.2.3 Équilibre postural

L'équilibre postural de l'archer est évalué via le déplacement de son centre de pression. Pour en obtenir la trajectoire pendant toute la durée du tir, deux plateformes de forces 6-axes mesurant les efforts de contact au sol en 3 dimensions (forces et moments) sont utilisées (Sensix 600x400x80, Poitiers, France). Celles-ci sont placées côte à côte de sorte que l'axe médio-latéral soit colinéaire à l'axe du tir et l'axe antéro-postérieur lui soit orthogonal. La fréquence d'échantillonnage était de 1000 hertz et les signaux bruts ont été filtrés avec un filtre de Butterworth passe-bas d'ordre 3 à une fréquence de coupure de 6 hertz (SPRATFORD et al. 2017). Sur un intervalle de temps, la trajectoire du centre de pression global est définie par sa composante médio-latérale $ML_0(t)$ et antéro-postérieure $AP_0(t)$. Elle est obtenue en exprimant les forces $F(F_x, F_y, F_z)$ et moments $M(M_x, M_y, M_z)$ mesurés par chacune des plateformes dans un même repère, pris au centre géométrique des deux plateformes de forces. Ainsi dans chacune des deux plateformes la relation suivante permet d'obtenir la trajectoire du centre de pression (x,y) :

$$\begin{cases} x = -\frac{M_y}{F_z} \\ y = \frac{M_x}{F_z} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Les paramètres d'équilibre postural étudiés sont calculés selon PRIETO et al. 1996. Sur un intervalle de temps donné, la position moyenne du centre de pression (\overline{ML} , \overline{AP}) est calculée par la moyenne arithmétique des positions successives du centre de pression sur l'axe médio-latéral et antéro-postérieur respectivement. Les séries temporelles de la trajectoire du centre de pression sont alors exprimées en fonction de cette position moyenne :

$$\begin{cases} ML(t) = ML_0(t) - \overline{ML} \\ AP(t) = AP_0(t) - \overline{AP} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Pour un axe donné, l'amplitude A est définie comme la valeur absolue de la différence entre le maximum et le minimum au sein de la série temporelle correspondante, $ML(t)$ ou $AP(t)$. À partir de l'équation III.2, on peut exprimer la distance résultante $RD(t)$ par rapport à la position moyenne du centre de pression, donné par :

$$RD(t) = \sqrt{AP(t)^2 + ML(t)^2} \quad (\text{III.3})$$

La distance moyenne d_{mean} à la position moyenne du centre de pression dans le plan Oxy est simplement la moyenne de la distance résultante $RD(t)$. Pour un axe donné, cette distance moyenne correspond à la moyenne des valeurs absolues de la série temporelle correspondante, $ML(t)$ ou $AP(t)$. La distance quadratique moyenne (d_{RMS}) à la position moyenne du centre de pression est calculée de façon analogue dans le plan Oxy , sur l'axe médio-latéral et antéro-postérieur, en prenant la moyenne quadratique de $RD(t)$, $ML(t)$ et $AP(t)$ respectivement. À partir des positions successives du centre de pression $ML(t)$ et $AP(t)$ il est possible d'obtenir la vitesse du centre de pression au cours du temps sur ces deux axes, ainsi que dans le plan Oxy . On appelle alors v_{mean} , v_{max} la vitesse moyenne et la vitesse maximale du centre de pression sur un intervalle donné. L'ellipse de confiance à 95% représente une ellipse qui englobe 95% de la trajectoire du centre de pression dans le plan Oxy . Pour obtenir l'aire de cette ellipse, on introduit la matrice de variance-covariance C pour les trajectoires du centre de pression médio-latéral et antéro-postérieur, en présupposant que leur distribution est normale :

$$C = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

avec

$$\begin{cases} C_{xy} = C_{yx} = \frac{1}{N-1} \sum AP(t)ML(t) \\ C_{xx} = \frac{1}{N-1} \sum ML(t)^2 \\ C_{yy} = \frac{1}{N-1} \sum AP(t)^2 \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

où N est le nombre d'éléments, C_{xy} et C_{yx} représente la covariance entre $AP(t)$ et $ML(t)$, C_{xx} et C_{yy} la variance sur l'axe médio-latéral et antéro-postérieur respectivement. Les vecteurs propres e_x , e_y de cette matrice donnent les directions des demi axes de l'ellipse, dont la taille est donnée par :

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sqrt{\frac{\lambda_1}{N-1}} \\ \sigma_2 = \sqrt{\frac{\lambda_2}{N-1}} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

où λ_1 et λ_2 représentent les valeurs propres de la matrice C . Il s'agit alors de résoudre :

$$\frac{x^2}{\sigma_1^2} + \frac{y^2}{\sigma_2^2} = s \quad (\text{III.7})$$

où s doit être choisi pour englober 95% des données à l'aide des tables de probabilités χ^2 ²⁴. Il vient alors que les demi-axes de l'ellipse sont données par $\sigma_1\sqrt{5,991}$ et $\sigma_2\sqrt{5,991}$, donc l'aire de l'ellipse $A_{95\%}$ est obtenue avec :

$$A_{95\%} = 5,991\pi\sigma_1\sigma_2 \quad (\text{III.8})$$

2.2.4 Activations musculaires

Les activations musculaires ont été mesurées de façon non-invasive par l'utilisation de l'électromyographie de surface sans fil (Delsys Trigno, Natick, États-Unis), échantillonnées à 1000 hertz. Les muscles mesurés ont été les suivants : extenseurs (*ed*) et fléchisseurs (*fd*) des doigts des deux avant-bras, deltoïde latéral (*delt*) et grand dorsal (*dors*) du côté bras de corde. Après réalisation de mouvements fonctionnels afin d'identifier la localisation des muscles par palpation, la peau du sujet a été rasée, puis abrasée et préparée en utilisant une solution hydroalcoolique pour améliorer la conductivité du signal. Un protocole de contraction maximale volontaire de chacun des muscles étudiés a été réalisé sur une durée de 10 secondes. Les données mesurées sont par la suite traitées (Figure III.3) selon les recommandations de KONRAD 2005. En premier lieu, un filtre de Butterworth passe-bande d'ordre 2, avec fréquence de coupure basse à 10 hertz et une fréquence de coupure haute à 500 hertz est appliqué. Le signal est ensuite redressé, puis exprimé selon la moyenne quadratique sur une période de 100 millisecondes dont on conserve uniquement l'enveloppe. Enfin, les données sont normalisées par rapport à la contraction maximale volontaire du muscle correspondant afin d'être exprimées en fonction de celle-ci (%MVC). Les variables calculées sont la moyenne et le pic maximal des activations musculaires.

2.2.5 Détection temporelle

2.2.5.a Instants du tir

La détection des instants importants du tir qui sont la tombée du clicker (CFT) et le lâcher de la corde (SRT) s'est faite à l'aide d'un accéléromètre analogique (Analog Devices

24. <https://people.richland.edu/james/lecture/m170/tbl-chi.html>

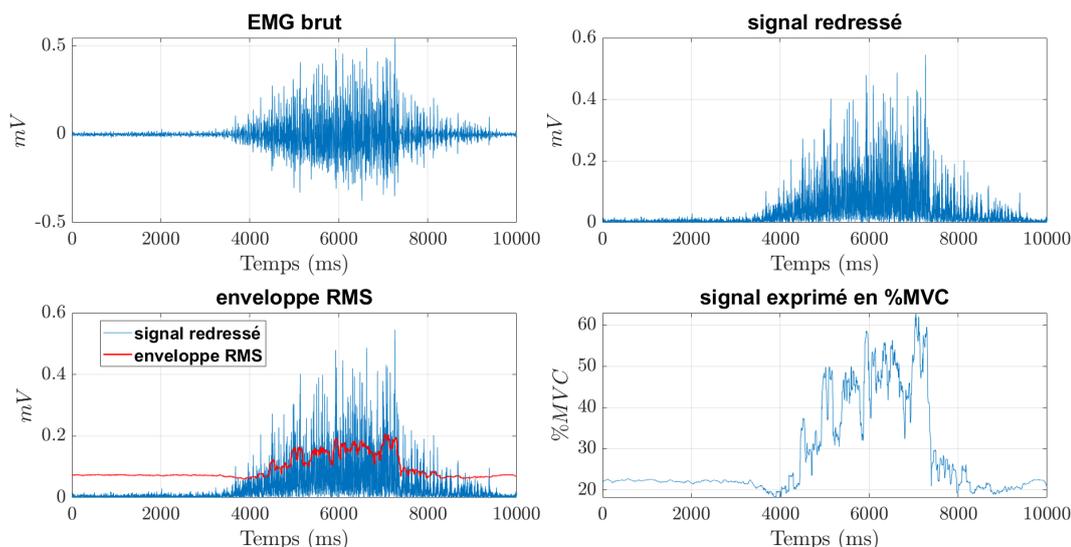


FIGURE III.3

ADXL354, Wilmington, États-Unis), également échantillonné à 1000 hertz. Ce dernier était monté sur la poignée de l'arc I.3.3.2, sur le côté opposé au clicker. Un seuil arbitraire entre deux points de mesures consécutifs a été fixé pour détecter ces deux instants, de $\pm 0,6$ g pour le clicker et de $\pm 0,4$ g pour le lâcher de la corde (Figure III.4).

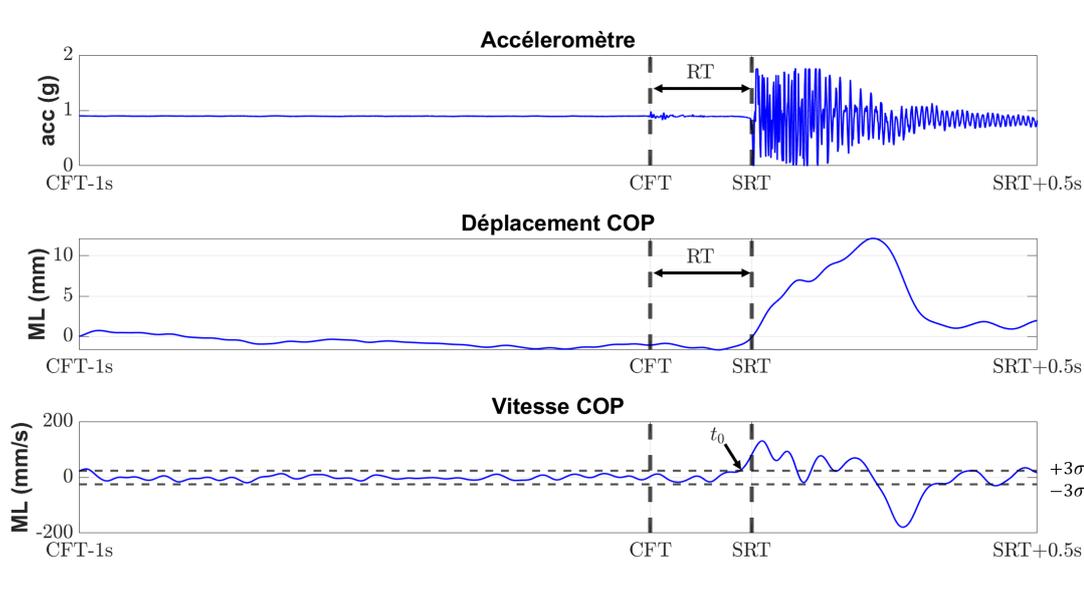


FIGURE III.4 – Détection des instants clés du tir avec l'accéléromètre, CFT : tombée du clicker, SRT : lâcher de la corde, RT : temps de réaction. t_0 : initiation du recul médio-latéral

La tombée du clicker sert de référence temporelle pour les essais, elle permet de définir deux phases du tir, celle où l'archer vise et doit rester le plus stable possible, puis la phase de tir à partir du lâcher de la corde. Les deux instants permettent de calculer le temps de réaction (TR) à la tombée du clicker, qui est simplement $TR = SRT - CFT$. La période qui caractérise la phase de visée est définie comme allant de la seconde qui précède la

tombée du clicker au lâcher de la corde. Ce temps d'une seconde précédant le clicker a été utilisé dans certaines études (SPRATFORD et al. 2017) et correspond à un temps minimum commun que les archers passent pour viser. La phase de tir analysée quant à elle comporte la demi-seconde qui suit le lâcher de la corde (SPRATFORD et al. 2017), durée suffisante pour caractériser le recul de l'archer après que la flèche soit éjectée. Les paramètres d'équilibre postural et les activations musculaires sont calculés pour ces deux phases. Étant donné le faible nombre d'essais, aucun test statistique ne sera utilisé, et l'analyse des résultats sera uniquement descriptive.

2.2.5.b Ajustement postural anticipé

Pour tous les essais, un recul du centre de pression sur l'axe médio-latéral et dans la direction opposée à la cible, est observé autour du lâcher de la corde (Figure III.4). Pour calculer le moment où le sujet commence à reculer sur cet axe, noté t_0 , un seuil arbitraire est fixé par rapport à la vitesse moyenne du déplacement médio-latéral de l'archer pendant la phase de visée. Ce moment correspond à l'instant à partir duquel la vitesse de déplacement devient supérieure à trois fois l'écart-type de la vitesse moyenne de l'archer pendant la phase de visée. On considère alors qu'un ajustement postural anticipé se produit lorsque t_0 précède le lâcher de la corde.

2.3 Résultats

Les données des muscles extenseurs et fléchisseurs des doigts du bras d'arc n'ont pas pu être exploitées. Le capteur positionné sur l'extenseur des doigts obstruait la trajectoire de la corde après le lâcher et a donc été retiré. Ensuite, pour les fléchisseurs des doigts, l'électrode était probablement mal positionnée et/ou le protocole de contraction maximale volontaire mal réalisé car après traitement du signal de ce muscle, les valeurs normalisées oscillaient entre 1% et 500% avec une faible répétabilité inter-essais. Par conséquent, les données de ces deux muscles ne seront pas étudiées.

2.3.1 Temps de réaction

Le score de chacune des flèches tirées a été maximal, indépendamment de la technique utilisée. Cette performance n'est pas étonnante car la cible est positionnée plus proche de ce que l'archer a l'habitude d'affronter. Le temps de réaction pour l'ensemble des essais était de 209 ± 105 millisecondes, avec un temps et une variabilité supérieure observée pour la technique « direct draw » (304 ± 149 millisecondes) comparé aux techniques « upper draw » (161 ± 34 millisecondes) et « lower draw » (163 ± 22 millisecondes). Cette différence peut être expliquée par la technique non usuelle utilisée par cet archer, qui perturbe sa séquence de tir. On note cependant que la technique « lower draw » qui n'est pas non plus sa technique de préférence donne un temps de réaction similaire à la technique « upper draw ». Pour ces deux techniques, les temps de réactions sont dans les valeurs typiquement mesurées au tir à l'arc (SPRATFORD et al. 2017).

2.3.2 Trajectoire du centre de pression

La Figure III.5 permet d'avoir une représentation visuelle de la trajectoire typique que suit le centre de pression d'un archer pendant les deux phases définies précédemment, de la seconde précédant la tombée du clicker jusqu'à la demi-seconde après le lâcher de corde. En bleu est représenté la phase de visée, pendant laquelle le clicker tombe, suivie de la phase de tir en vert, débutant au lâcher de la corde. Lors de la phase de visée, l'archer établit un certain équilibre postural en oscillant autour d'un point d'équilibre, les amplitudes des oscillations posturales sont plus petites. Cet équilibre est perturbé aux environs du lâcher de la corde, matérialisé par le changement de couleur de la courbe sur le graphique, on observe bien un recul du centre de pression sur l'axe médio-latéral et dans la direction opposée au tir. L'allure de cette trace est similaire à ce qui a été mesuré par SIMSEK, CERRAH, ERTAN et al. 2019 pour des archers d'un niveau moyen et confirmé.

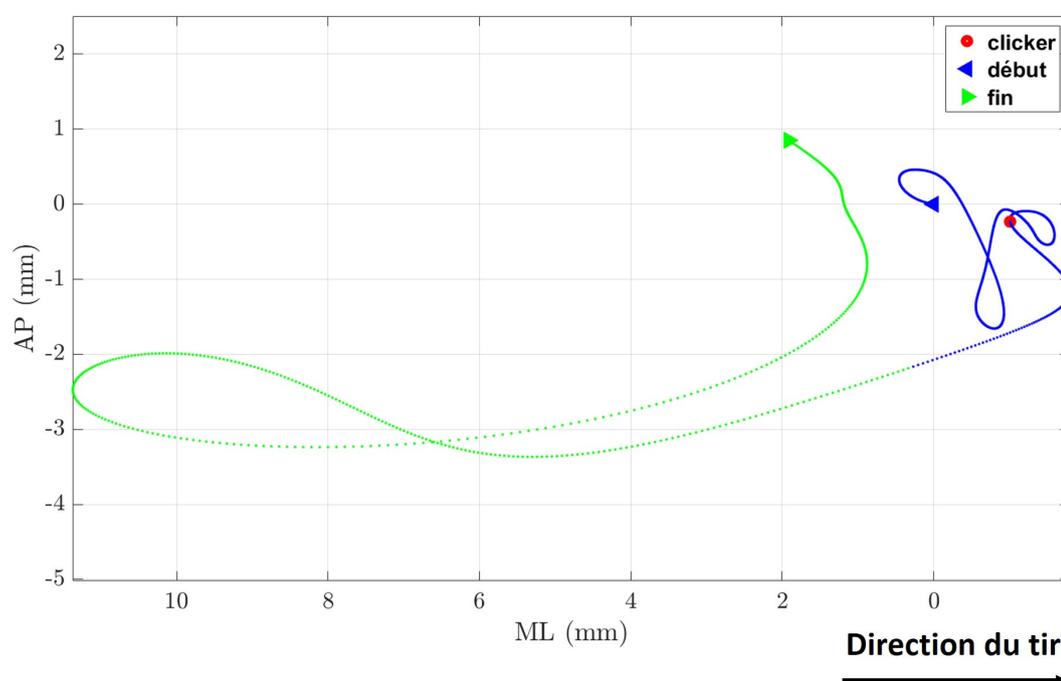


FIGURE III.5 – Trajectoire du centre de pression pendant la phase de visée (bleu) puis pendant la phase de tir (vert). L'origine du graphique représente le début de la trace (triangle bleu), pris une seconde avant la tombée du clicker (rond rouge), et la fin une demi-seconde après le lâcher de la corde (triangle vert).

2.3.3 Ajustement postural anticipé

Sur les neuf tirs réalisés, le début du recul médio-latéral est survenu sept fois avant la perturbation, soit 78% des essais. Les tirs effectués selon la technique « lower » ont tous été anticipés, alors qu'un essai parmi les techniques, « upper » et « direct » ont vu le recul du centre de pression débuter après le lâcher de la corde, 37 et 58 millisecondes après l'évènement respectivement. Pour les sept tirs où un ajustement anticipé a eu lieu, ceux-ci sont intervenus en moyenne 47 ± 18 millisecondes avant le lâcher de la corde, perturbation volontaire de l'équilibre postural.

Pour les essais où le recul médio-latéral du centre de pression a eu lieu après la perturbation, la latence entre ces deux instants reste très faible, dans le même intervalle de temps de ce qui a été évalué pour des réflexes posturaux spinaux, autour 40 de millisecondes (JACOBS et al. 2007 ; ACKERMANN et al. 1991). Sur aussi peu d'essais, il n'est pas possible de préjuger de la nature d'une telle stratégie, si elle relève d'une commande pré-programmée similaire à un ajustement postural anticipé plus une variabilité temporelle, ou d'un réflexe d'équilibre postural.

Les ajustements anticipés qui ont été observés, arrivent plus tard que dans ce qui a été rapporté dans des conditions où la perturbation est prévisible, qui ont été mesurées entre 100 et 150 millisecondes avant celle-ci par KRISHNAN et al. 2012. Cette différence temporelle avec celle qu'on a mesurée, peut potentiellement provenir de la méthode de détection de la perturbation et du seuil arbitraire qui a été fixé. Avec les données provenant de l'accéléromètre, on peut uniquement émettre l'hypothèse que le lâcher de corde se produit au moment où ce seuil est franchi, sans vraiment avoir de garantie sur l'instant exact. Cependant, cette légère imprécision dans la détection du moment du lâcher ne joue que sur 1 à 5 millisecondes au maximum et n'est pas suffisante pour expliquer la différence avec les 100 millisecondes attendues. Une explication complémentaire pourrait provenir de la distance de tir de seulement 12 mètres et de l'adaptation de la longueur d'allonge d'arc qu'a faite l'archer. En effet, la force nécessaire pour envoyer une flèche à 12 mètres n'est pas la même que pour une distance de 70 mètres. Une telle différence modifie la conséquence mécanique du lâcher de corde car le recul ne sera plus le même que celui auquel l'archer est habitué, que ce soit en tir à l'intérieur à 18 mètres ou à l'extérieur à 70 mètres. Par conséquent, la prévisibilité de la perturbation est remise en question, l'archer s'attend à un recul de l'arc, mais il n'en connaît a priori pas l'amplitude et peut seulement l'estimer via son expérience. Cette modification entraîne potentiellement un délai dans la commande motrice qui expliquerait cette différence temporelle.

Si on considère le système archer-arc comme étant un solide rigide (section I.3.4.2), en prenant une vitesse de recul v de l'arc mesurée à 0,26 mm/s (MEYER 2015) et un temps de balistique interne t de 16 millisecondes (KOOI et SPARENBERG 1997 ; ZANEVSKYY 2012), la distance de recul d du centre de masse du système serait autour de 4 millimètres ($d = vt$). L'amplitude du recul médio-latéral de l'archer pendant la phase de tir se situait entre 11,9 et 14,4 millimètres en moyenne (Table III.1). L'anticipation quand elle a lieu, se produit bien dans la direction opposée au tir et avec une amplitude entre deux et trois fois plus grande que celle de la perturbation. Il y aurait donc deux stratégies posturales chez cet archer tout du moins, une stratégie que l'on peut qualifier de « early », où l'archer produit un ajustement postural avant le lâcher de la corde, et une stratégie postérieure à cette perturbation que l'on peut qualifier de « late ».

2.3.4 Indicateurs posturaux et musculaires

		phase de visée			phase de tir		
		upper	direct	lower	upper	direct	lower
ML	d_{mean} (mm)	0,4±0,2	0,7±0,3	0,5±0,1	5,3±0,9	5,2±0,6	5,6±0,3
	d_{rms} (mm)	0,5±0,2	0,9±0,3	0,6±0,2	4,6±0,8	4,8±0,3	4,0±0,8
	v_{mean} (mm/s)	4,2±1,2	5,7±0,8	4,6±1,0	42,4±9,1	34,5±5,3	30,0±10,8
	v_{max} (mm/s)	9,4±1,5	14,5±2,7	14,0±4,7	108,6±61,1	143,9±29,4	96,0±35,6
	A (mm)	1,8±0,5	3,0±0,8	2,1±0,5	14,4±2,4	15,1±0,4	11,9±2,8
AP	d_{mean} (mm)	0,7±0,5	1,1±0,5	0,8±0,4	2,6±2,4	1±0,6	2,9±1,4
	d_{rms} (mm)	0,9±0,6	1,3±0,6	1,0±0,5	1,5±0,5	0,8±0,3	1,3±0,4
	v_{mean} (mm/s)	5,8±2,1	8,9±3,9	6,6±1,7	13,2±1,2	10,9±1,3	15,3±1,0
	v_{max} (mm/s)	15,8±6,9	17,6±2,7	15,5±4,1	34,2±2,7	30±16,6	39,8±0,8
	A (mm)	3,1±1,8	4,4±2,2	3,5±1,5	4,7±1,6	3,1±0,8	4,3±1,3
Oxy	d_{mean} (mm)	0,9±0,5	1,5±0,4	1±0,4	6,5±1,8	5,6±0,5	6,2±0,3
	d_{rms} (mm)	1,0±0,6	1,6±0,5	1,2±0,5	7,7±1,4	6,8±0,5	7,0±0,2
	v_{mean} (mm/s)	7,7±2,5	11,7±3,4	8,8±1,0	46,5±8,9	37,9±4,6	36,0±10,5
	v_{max} (mm/s)	18,8±4,9	28,4±12,8	21,2±1,5	122,3±54,2	145,8±28,6	101,3±30,5
	$A_{95\%}$ (mm ²)	7,3±5,9	18,3±8,7	8,6±3,3	102,4±45,9	66,2±15,3	93,3±46,4
EMG	ed_{mean} (%MVC)	26,8±2,7	20,9±4,0	23,5±2,1	36,5±6,6	34,7±2,7	37,8±4,8
	ed_{max} (%MVC)	48,0±19,0	49,8±10,1	42,7±13,2	81,3±25,4	75,3±14,3	95,0±27,3
	fd_{mean} (%MVC)	10,6±0,2	10,5±0,4	11,4±0,8	12,4±2,2	11,7±1,4	9,6±2,2
	fd_{max} (%MVC)	14,0±2,7	13,9±1,6	14,9±2,7	24,6±8,1	21,3±1,9	17,8±4,5
	$delt_{mean}$ (%MVC)	12,2±0,9	13,4±0,7	13,2±0,5	15,7±1,4	15,6±1,3	15,5±1,7
	$delt_{max}$ (%MVC)	14,9±2,0	15,6±0,6	15,0±1,1	20,7±2,5	21,5±2,6	23,3±4,1
	$dors_{mean}$ (%MVC)	62,0±2,6	58,5±7,6	68,3±1,0	23,1±9,2	22,0±2,9	27,8±3,5
	$dors_{max}$ (%MVC)	75,2±3,4	73,1±11,9	80,9±1,7	45,5±39,1	41,8±19,8	40,0±6,9

TABLE III.1 – Indicateurs posturaux et musculaires pendant les phases de visée et de tir. Moyenne ± écart-type

Les indicateurs d'équilibre postural et d'activation musculaire sont présentés dans la Table III.1, pour les deux phases étudiées. La différence entre les techniques d'armement utilisées semble se trouver sur l'axe médio-latéral, qui est l'axe du tir, avec une distance moyenne et quadratique près de deux fois plus importante pour la technique « direct draw » dans la phase de visée. Sur l'axe antéro-postérieur, on peut noter une vitesse de déplacement du centre de pression et une vitesse maximale légèrement plus importante pour la technique « direct draw ». Ces augmentations se répercutent sur l'aire de l'ellipse à 95% qui est du coup deux fois plus grande avec la technique « direct draw ». Entre les techniques plus courantes qui sont « upper draw » et « lower draw », excepté une vitesse maximale plus importante pour la technique usuelle de l'archer (« upper draw »), les indicateurs mesurés sont sensiblement similaires. Le déplacement du centre de pression réalisé par l'archer sont comparables à des valeurs mesurées précédemment pendant la phase de visée (SIMSEK, CERRAH, ERTAN et al. 2019 ; SARRO et al. 2020) et pendant la phase de tir (KEAST et al. 1990) pour des archers expérimentés.

Par ailleurs, pendant la phase de visée toutes techniques confondues, en comparaison aux valeurs de maintien d'une posture debout standard, yeux ouverts sur surface plane, chez des sujets en bonne santé mesurée par PRIETO et al. 1996, les oscillations posturales sont plus faibles mais leur vitesse plus élevée. Ceci pourrait s'expliquer par une augmentation des raideurs des muscles posturaux des membres inférieurs et du tronc pour limiter les amplitudes des oscillations. Ce résultat suggère, chez ce sujet, une amélioration du contrôle postural suite à une pratique régulière du tir à l'arc.

Concernant les mesures d'électromyographie de surface, la Figure III.6 présente le schéma d'activation musculaire côté bras de corde de chacune des techniques d'armement, moyenné sur les trois essais effectués. Une seconde avant le clicker, l'allonge maximale est déjà presque atteinte, donc les niveaux de sollicitation du muscle deltoïde et dorsal sont proches de leur valeur maximale pendant la tâche de visée. Pour cet archer, les valeurs d'activation du deltoïde sont en deçà de ce qui a été rapporté dans la littérature (SIMSEK, CERRAH, ERTAN et al. 2018 ; KOLAYIŞ et al. 2016), où les activations des muscles deltoïdes postérieur et latéral sont comprises entre 20% et 80% de la contraction maximale volontaire avant le clicker, tous niveaux d'archers confondus, avant de connaître une diminution visible pendant la phase de tir. Cette disparité par rapport à nos mesures proviennent soit d'une stratégie musculaire différente présentée par notre sujet, soit d'un mauvais placement de l'électrode de notre part sur le deltoïde au début de l'expérimentation. Le muscle dorsal est sollicité en moyenne autour de 60% de la contraction volontaire et représente également celui qui à la plus grande variabilité entre les techniques. Dans la phase de tir, on constate bien que ce muscle est moins sollicité, suite au lâcher de la corde.

Sur la Figure III.6, comme ce qui a été mesuré dans la littérature (SIMSEK, CERRAH, ERTAN et al. 2018), on peut constater un pic d'activation des extenseurs des doigts du bras de corde autour du lâcher de la corde, dont l'intensité et la durée sont similaires aux archers classés de niveau moyen et débutant (~80% MVC) de contraction maximale volontaire. Leur activation pendant la phase de visée se situe entre les activations rapportées pour des archers experts (~15% MVC) et moyens (~30% MVC). Pour les fléchisseurs des doigts, le sujet présente une activation inférieure à ce qui est mesuré par SIMSEK,

CERRAH, ERTAN et al. 2018, où les archers moyens et experts utilisaient les fléchisseurs à hauteur de 35% de leur contraction maximal volontaire. Par contre, il avait été noté chez les archers moyens de l'étude une augmentation de l'activité des fléchisseurs dans la phase de tir, comme ce qui est observé chez notre sujet. Entre les différentes techniques, à part un pic d'activation supérieur en utilisant « lower draw », les valeurs mesurées semblent être assez similaires.

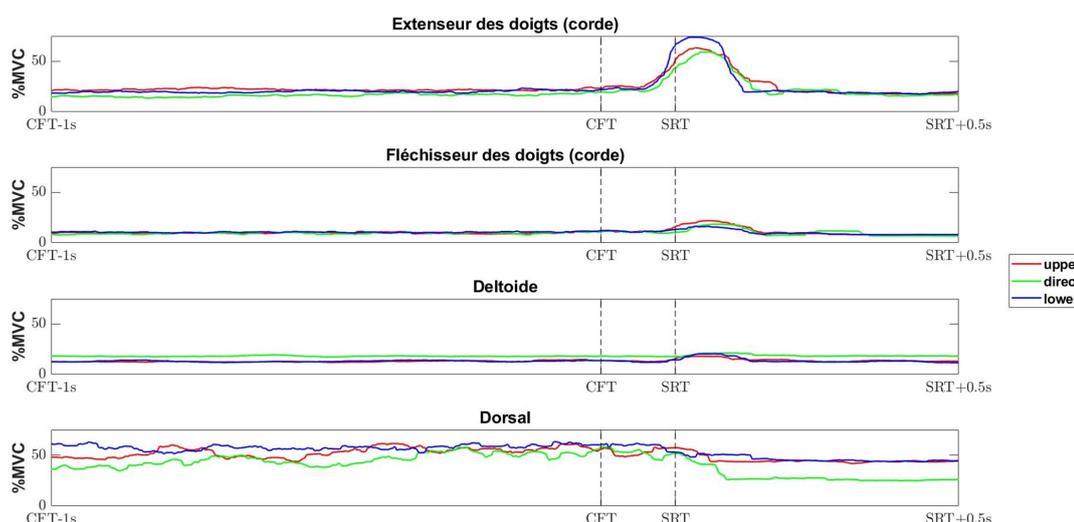


FIGURE III.6 – Schéma d'activation musculaire côté bras de corde. Les données comprises entre la tombée du clicker (CFT) et le lâcher de corde (SFT) sont normalisées par rapport au temps de réaction moyen de l'archer.

2.4 Bilan

Cette étude préliminaire est limitée par des contraintes expérimentales, faible nombre de sujets, faible nombre d'essais dans chaque condition, ainsi que la courte distance de tir. Pour autant, elle a permis de pouvoir mesurer un ensemble de données d'équilibre postural et d'activation musculaires chez un archer expérimenté, puis de les comparer à celles proposées dans la littérature. Le score réalisé par l'archer dans les championnats de France le classe plutôt dans la catégorie archer expert, et ses indicateurs posturaux sont comparables à ce qui a été mesuré chez d'autres archers de cette catégorie. Cependant, le schéma d'activation des muscles fléchisseurs des doigts de corde sont plutôt similaires à ce qui a été mesuré chez des archers d'un niveau moyen. Par conséquent, le lâcher de corde pourrait éventuellement être un axe de travail chez cet archer.

Entre les trois manières d'armer l'arc, la technique « direct draw » semble celle qui est à éviter pour cet archer car les oscillations posturales y sont supérieures aux deux autres pendant la phase de visée. D'un point de vue postural et musculaire, il ne semble pas y avoir un avantage particulier pour cet archer à changer sa technique d'armement habituelle. Pour pouvoir clairement évaluer l'influence des différentes techniques sur l'équilibre postural et les activations musculaires, il serait judicieux de reproduire cette expé-

rimentation avec deux groupes d'archer d'un niveau similaire en termes de score, mais ayant pour l'habitude d'utiliser une des deux techniques. Cependant, de telles expérimentations sont difficiles, voire impossibles à mettre en place car le recrutement de sujets utilisant la technique « lower draw » ne sont pas en France, mais à l'étranger et dans des pays concurrents de la discipline de surcroît.

Les neuf essais réalisés ont également permis de mettre en évidence une anticipation posturale de l'archer dans 78% des tirs réalisés, se produisant seulement autour de 50 millisecondes avant le lâcher de corde, dans la direction opposée au tir. Il y aurait donc deux stratégies posturales différentes qui interviennent avant ou après la perturbation volontaire, dont une qui est utilisée en majorité. Cependant, cette temporalité de l'instant du recul médio-latéral pourrait être affectée par la distance peu habituelle de tir réalisée au cours de cette expérience. Pour que la perturbation soit prévisible pour l'archer, il faudrait pouvoir mesurer le déplacement du centre de pression sur des tirs effectués à des distances à laquelle il a l'habitude de tirer. Ceci implique de sortir de conditions de laboratoire pour monter une expérience spécifique avec des tirs à 70 mètres. Cette étude est présentée dans la partie qui suit (section III.3).

Cette expérimentation a été l'occasion de mieux appréhender la mesure de variables d'intérêts lors d'un tir et mis en évidence certaines difficultés. Tout d'abord, les mesures réalisées par électromyographie de surface se sont révélées plus fastidieuses que prévu, entre le positionnement qui est problématique pour l'extenseur du bras de corde car obstruant la trajectoire de la corde, et les fléchisseurs de ce même bras dont les mesures ont été inexploitable. De plus, la mise en place de toute la chaîne de mesure est chronophage, entre la préparation de la peau du sujet et le protocole de contraction maximal volontaire qu'il faut réaliser à chaque fois. Ce temps d'utilisation n'est pas compatible avec une utilisation en routine pour des archers de haut niveau, malgré que les schémas d'activations musculaires peuvent être reliés à l'objectivation de la performance (section I.3.3.3).

Ensuite, l'accéléromètre analogique est certes peu encombrant, mais monté sur l'arc directement et relié par câble au module d'acquisition permettant la synchronisation des données ajoute tout de même une masse supplémentaire à l'arc que doit porter l'archer. Le sujet a mentionné ressentir que la masse de l'arc était différente de ce dont il a l'habitude, mais n'a pas jugé nécessaire de régler le positionnement des stabilisateurs ni leurs inclinaisons pour rééquilibrer son arc au vu de la courte distance de tir. Le retour expérimental a nourri la réflexion sur un dispositif de mesure plus adapté, moins perturbant pour l'archer et plus facile à utiliser.

3 Ajustements posturaux anticipés chez des archers entraînés

Des ajustements posturaux ont été mis en évidence sur une distance de tir de 12 mètres chez un archer expérimenté au cours de l'étude précédente, permettant de compenser le recul de l'arc causé par le départ de la flèche et un maintien de l'équilibre postural. Chez des sportifs de haut-niveau, les commandes motrices pour la réalisation de la tâche

sont optimisées afin de réaliser la meilleure performance possible (section I.3.4.5). Par conséquent, non seulement de tels ajustements anticipés existent, mais ils devraient aussi être reliés à la performance et donc au score des archers. Les stratégies posturales seraient donc différentes entre des archers de haut-niveau et des archers dans l'antichambre du haut niveau. De plus, celles des archers experts devraient être plus efficaces et utilisées plus souvent, ce qui marquerait la différence de niveau. Une grande partie des résultats et des analyses qui se trouvent dans les paragraphes qui suivent font l'objet d'un article qui a été soumis en septembre 2022, en cours de revue dans le *Journal of Sports Sciences*, dont l'abstract se trouve en Annexe B.

3.1 Matériel et Méthodes

3.1.1 Sujets

Pour vérifier ces hypothèses, treize archers français ont été recrutés pour participer à l'étude. Au moment de l'expérimentation, six étaient membres de l'équipe de France après avoir réussi les épreuves de sélection nationale et par conséquent forment le groupe « élite » (3 ♂, 3 ♀), notés de *E1* à *E6*. Les sept autres archers étaient pensionnaire du Pôle France Relève de Bordeaux et forment le groupe « relève » (4 ♂, 3 ♀), notés de *R1* à *R7*. Les caractéristiques des archers sont présentées dans la Table III.2. Parmi tous les archers, un appartenant au groupe « élite » et trois appartenant au groupe « relève » sont gauchers. Tous étaient en bonne condition physique et n'ont pas rapporté de blessures récentes.

Groupe	n	Age (ans)	Taille (cm)	Masse (kg)	Expérience (ans)
Élite	6	27,0 ± 4,7	174,3 ± 8,2	80,6 ± 27,2	16,0 ± 1,9
Relève	7	16,5 ± 4,9	167,8 ± 3,1	61,8 ± 3,1	8,0 ± 1,8

TABLE III.2 – Caractéristiques des archers. Moyenne ± écart-type

3.1.2 Déroulé expérimental

La récolte des données sur des archers tirant à la distance de tir olympique de 70 mètres nécessite de sortir du laboratoire. Pour étudier les deux populations d'archers, les expérimentations ont été réalisées lors de deux sessions distinctes ayant lieu dans deux endroits différents. Celles réalisées avec le groupe « élite » se sont déroulées au Centre de Ressources, d'Expertise et de Performance Sportive (CREPS) de Poitiers, tandis que celles réalisées avec le groupe « relève » se sont passées au CREPS de Bordeaux. Ces deux emplacements ont engendré des différences sur le pas de tir. Au CREPS de Poitiers, les archers « élite » ont tiré dans une halle de sport entièrement fermée, permettant ainsi de tirer dans des conditions non venteuses. Les archers « relève » ont tiré quant à eux sur leur lieu d'entraînement habituel, mais en configuration intérieur vers extérieur (Figure III.7). Le jour de l'expérimentation (18 Janvier 2022), les conditions extérieures étaient proches d'être idéales, avec un vent mesuré par la station météo locale inférieur à 2 km/h en moyenne le matin, inférieur à 3 km/h en moyenne l'après-midi et sans aucune rafale²⁵.

25. <https://www.wunderground.com/history/daily/LFBE/date/2022-1-18>

Selon l'entraîneur du Pôle France Relève, de telles conditions sont considérées comme non venteuses pour des archers et la performance ne devrait pas être influencée par ce paramètre.



FIGURE III.7 – Dispositif expérimental au Pôle France Relève (CREPS de Bordeaux)

Les participants ont utilisé chacun leur propre matériel pour tirer, un arc classique équipé d'un viseur et d'un système de stabilisation complet. Les cibles étaient positionnées conformément à la distance olympique (I.1.1.1), 70 mètres pour les deux groupes d'archers, avec des blasons de 122 centimètres de diamètre (Figure I.1). Comme sur l'étude précédente, deux plateformes de forces ont été utilisées, positionnées de part et d'autre de la ligne de tir et les participants tiraient avec un pied sur chacune des plateformes. Après un échauffement des muscles et des articulations des membres supérieurs et du dos pendant une quinzaine de minutes en autonomie, les archers ont effectué une dizaine de tirs d'échauffement et de réglages. Ensuite, chaque archer a procédé à un total 18 de tirs avec pour consigne de faire le meilleur score possible, en tirant comme ils ont l'habitude de faire. Le score de chaque flèche était noté. Une contrainte supplémentaire liée au matériel utilisé a nécessité que les archers aient dû avant chaque tir attendre le signal des expérimentateurs avant de s'installer sur le pas de tir, puis d'en sortir après avoir tiré chaque flèche. De telles conditions de tirs ne sont pas de nature à perturber les archers des deux groupes, car ils y sont confrontés en tir par équipe ou tir par équipe mixte. Dans ces deux épreuves, ils doivent se mettre rapidement en position pour tirer une seule flèche avant de laisser la place à leurs coéquipiers (section I.1.1.2).

3.1.3 Équilibre postural

De la même manière que sur l'étude précédente, pour obtenir la trajectoire du centre de pression avant et pendant le tir, deux plateformes de forces (600x500x50 mm, Kistler 9260AA6, Winterthur, Suisse), disposées côte à côte, échantillonnées à 1000 hertz, ont été

utilisées. Comme on peut le constater sur la Figure III.7, la nature des plateformes utilisées font qu'elles surélèvent l'archer sur le pas de tir de 50 millimètres. En conséquence, la position de la cible a également été réhaussée de la même hauteur. L'axe médiolatéral a été défini comme colinéaire avec l'axe du tir et l'axe antéropostérieur lui est orthogonal (Figure III.8). Les signaux bruts ont été récupérés en utilisant le logiciel Bioware (Kistler 2812A, version 5.3.2.9) et leur traitement ont été réalisés en utilisant la même méthode définie précédemment (section III.2.2.3). Les mêmes paramètres d'équilibre postural sont calculés sur le centre de pression global, selon les définitions de PRIETO et al. 1996.

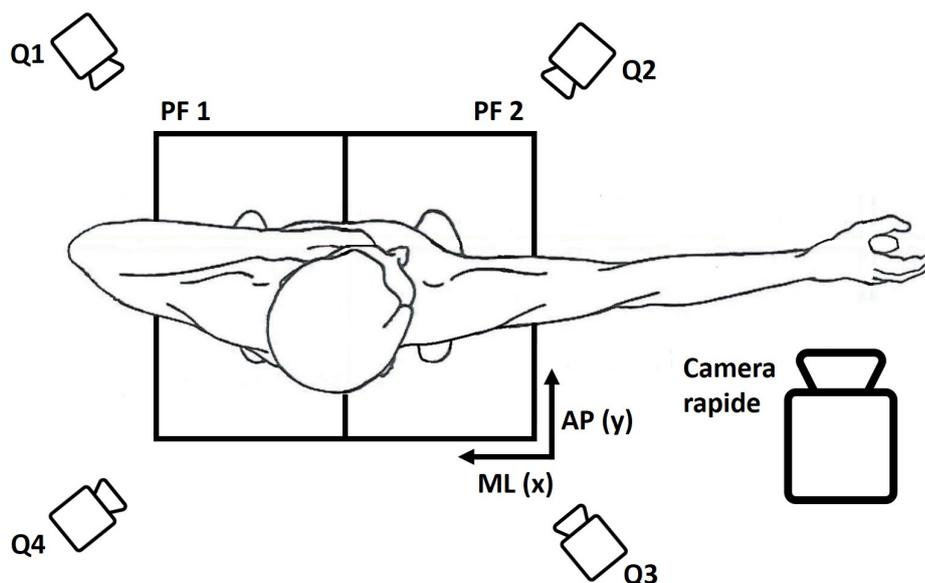


FIGURE III.8 – Schéma expérimental avec le matériel utilisé : 2 plateformes de forces, 1 caméra rapide, 4 caméras Qualysis.

3.1.4 Détection temporelle

3.1.4.a Instants du tir

Afin de détecter les deux instants qui nous intéressent pendant la séquence de tir, qui sont la tombée du clicker (CFT) et le lâcher de corde (SRT), ce n'est plus un accéléromètre qui est utilisé, mais une caméra rapide (Photron FASTCAM Mini UX100 type 800K-C-16G, Tokyo, Japon), positionnée sur le côté à environ deux mètres du clicker, filmant à 1000 images par seconde. De ce fait, il est possible de s'affranchir du câble qui reliait l'accéléromètre au boîtier de synchronisation, et la détection de ces instants se déroule en mesurant à distance afin de ne pas perturber le tir de l'archer.

Les instants clés sont ensuite récupérés en visionnant les vidéos sauvegardées. Trois instants sont présentés sur la Figure III.9. Juste avant la tombée du clicker, l'archer n'a pas encore atteint son allonge maximale, le clicker repose encore sur l'extrémité de la pointe de la flèche. Sur l'image d'après, une milliseconde s'est écoulée, le clicker touche la poignée de l'arc et produit le son distinctif auquel l'archer va réagir. Après un temps de réaction (TR) qui est variable selon les essais, la corde est lâchée (SRT). La première

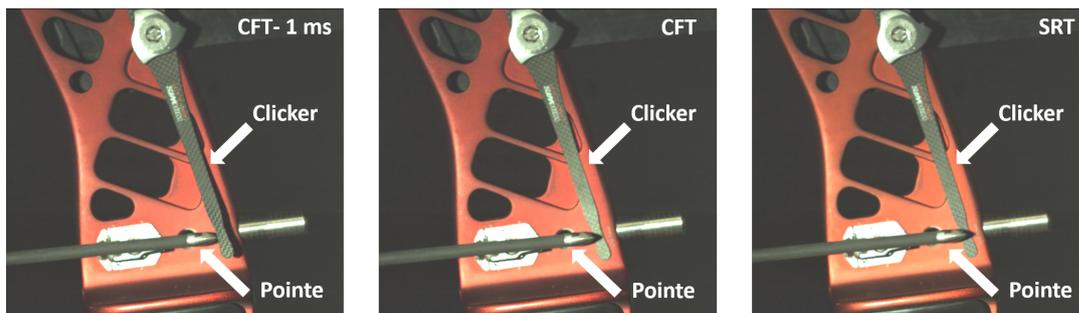


FIGURE III.9 – Gauche : avant la tombée du clicker, milieu : tombée du clicker (CFT), droite : le lâcher de la corde (SRT) caractérisée par le mouvement vers l’avant de la pointe de la flèche après un temps de réaction variable

image où la pointe de la flèche se déplace vers la cible est prise comme cet instant. Les phases de visée et de tir sont définies de la même manière que précédemment (section III.2.2.5.b), une seconde avant la tombée du clicker et après cet instant.

3.1.4.b Ajustement postural anticipé

La détection des ajustements posturaux anticipés est identique à ce qui a été présenté précédemment (section III.2.2.5.b), avec t_0 l’instant du recul médio-latéral du centre de pression calculé par rapport à l’instant de référence commun qui est la tombée du clicker. Les indicateurs posturaux sont calculés pendant la phase de visée et pendant la phase de tir, entre t_0 et la demi seconde qui suit cet instant. Suite aux deux stratégies observées chez le sujet lors de la pré-étude (section III.2.3.3), si le recul du centre de pression précède le lâcher de la corde, la stratégie utilisée est dite « early », alors que si elle survient après le lâcher de corde, elle est labellisée « late ». La proportion d’utilisation de ces deux stratégies a été quantifiée pour chacun des groupes.

3.1.5 Position des pieds

La contrainte de repositionnement que l’archer devait effectuer avant chaque tir a été l’occasion d’évaluer la répétabilité du placement de leurs pieds autour de la ligne de tir. Pour ceci, quatre caméras Qualysis (Göteborg, Suède) échantillonnées à 250 Hz ont été utilisées. La localisation du centre de pression au sein de la base de support de chaque pied, ainsi que le positionnement du pied sur les plateformes ont été obtenus grâce à 4 marqueurs passifs par plateforme positionnés dans chacun des coins et 6 marqueurs par chaussure, un sur la pointe, un sur le talon et deux de chaque côté au niveau des métatarses I et V (Figure III.10). Pour l’ensemble des archers, le même expérimentateur avait positionné les marqueurs sur leurs chaussures afin d’éviter toute variabilité inter-individuelle. La position moyenne d’un pied est alors calculée comme le barycentre du polygone formé par les marqueurs, puis est projeté dans le plan $0xy$. La répétabilité du positionnement est calculée par l’écart-type de la position moyenne de chaque pied sur l’axe médio-latéral (std_{ML}), antéro-postérieur (std_{AP}). Aucun archer n’a mentionné avoir été gêné par la présence de marqueurs scotchés sur leurs chaussures.

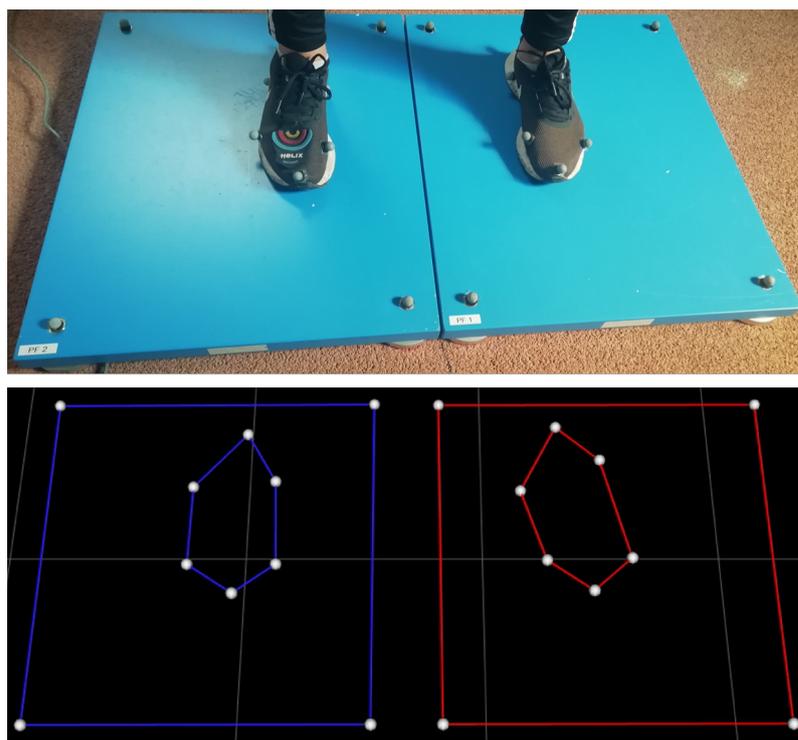


FIGURE III.10 – Positionnement des marqueurs passifs sur les plateformes et les chaussures et leur visualisation en 3D via le logiciel Mokka

La caméra master de Qualysis a été utilisée pour synchroniser l'ensemble des appareils de mesure, selon les branchements préconisés par le fabricant. Chaque enregistrement débutait en appuyant sur un trigger externe déclenché par un expérimentateur. Les données de la capture du mouvement sont traitées directement dans le logiciel Qualysis Track Manager (2019.1 build 4400). Par la suite, l'ensemble des traitements et des calculs sont réalisés avec des routines Matlab, dont un package statistique disponible en open-source²⁶.

3.1.6 Analyse statistique

Au total, 230 tirs ont pu être analysés, dont 107 pour les archers « élite » et 123 pour les archers « relève ». Les essais manquants (4 au total) sont dus à un problème technique lors de l'acquisition, impliquant soit la caméra rapide, soit les plateformes de forces. Dans un premier temps, la normalité des données récoltées est vérifiée à l'aide d'un test de Shapiro-Wilk. Suite à leur non-normalité, les indicateurs d'équilibre postural pendant la phase de visée des deux groupes d'archers sont comparés avec un test non paramétrique de Mann-Whitney. Un test de Kruskal-Wallis à deux facteurs (« élite » vs « relève » et « early » vs « late ») est utilisé pour comparer les temps de réaction et les instants du recul médio-latéral, avec des tests de Dunn-Sidak utilisés comme post hoc. La différence d'utilisation d'une des deux stratégies entre les groupes est évaluée à l'aide d'un test exact de Fischer. Les différences intra-individuelles des archers sur le positionnement

26. <https://spmltd.org/>

initial antéro-postérieur et médio-latéral entre les flèches scorant « 10 » points et celles inférieures à « 10 » sont évaluées avec un test de Mann-Whitney.

Pour la phase de tir, afin de comparer les caractéristiques spatiales du recul médio-latéral, on utilise la statistique paramétrique à une dimension (SPM1D) avec des tests-*t* paramétriques à deux échantillons indépendants (PATAKY, VANRENTERGHEM et al. 2015) : stratégies au sein d'un même groupe d'archer et groupes d'archer pour l'une des deux stratégies. Cette méthode statistique est utilisée pour comparer des séries temporelles et d'identifier les instants à partir desquels d'éventuelles différences significatives peuvent être observées entre ces séries (PATAKY, ROBINSON et al. 2016). Les archers vont éventuellement avoir une différence de répartition d'usage d'une stratégie ou d'une autre. Pour pallier cette variabilité, on pondère la contribution de chacun des individus à un groupe ou à une stratégie. Pour les comparaisons temporelles du déplacement du centre de pression, chaque archer est représenté par la moyenne des essais qu'il a réalisés dans l'une des deux stratégies.

Les scores réalisés par les archers étant des valeurs discrètes, ce sont des tests de Student qui sont utilisés pour comparer les performances générales entre chaque groupe puis entre chaque stratégie. Pour les comparaisons détaillées de scores réalisés par groupe et par stratégie, une analyse de variance à un facteur est utilisée, avec un test de Student comme *post hoc*. Concernant la répétabilité du positionnement une analyse de la variance à un facteur est utilisée pour déceler des différences entre les axes et les groupes d'archers, avec un test de Student comme *post hoc*. Pour l'ensemble des analyses statistiques, une valeur $p \leq 0,05$ est considérée comme indicatrice d'une différence significative entre les valeurs comparées.

3.2 Résultats

3.2.1 Phase de visée

La Table III.3 référence les indicateurs d'équilibre postural calculés pour les deux groupes d'archers. Sur l'axe médio-latéral, ou l'axe du tir, aucune différence n'a été observée entre les groupes « élite » et « relève ». Les seules différences ont été observées sur l'axe antéro-postérieur, orthogonal à l'axe du tir avec des oscillations posturales plus faibles chez les archers « élite » à la fois en termes de distance et vitesse de déplacement du centre de pression. Ces valeurs plus basses sur l'axe antéro-postérieur se répercutent dans le calcul des indicateurs planaires, qui sont également plus faibles chez les archers « élite », sauf pour la vitesse maximale du centre de pression.

Dans le cadre du maintien de la posture debout, la base de support est généralement plus petite chez les humains sur l'axe antéro-postérieur que médio-latéral (WINTER 1995). Les groupes musculaires posturaux qui permettent la régulation de la position du centre de pression sur l'axe antéro-postérieur autour de la cheville sont plus petits que ceux qui contribuent au contrôle postural sur l'axe médio-latéral (WINTER 1995). Autour de l'articulation de la cheville, ce sont le *soleus* et *tibialis antérieur* qui sont mis en action sur l'axe antéro-postérieur, alors que pour l'axe médio-latéral, ce sont des muscles plus imposants situés au niveau de la hanche qui contribuent (WINTER 1995). Ceci explique

	élite		relève		<i>p</i>
ML					
d_{mean} (mm)	0,4(0,3)	1,1[0,1 1,2]	0,4(0,2)	1,2[0,2 1,4]	0,18
d_{rms} (mm)	0,5(0,3)	1,2[0,2 1,3]	0,5(0,3)	1,4[0,2 1,6]	0,22
v_{mean} (mm/s)	6,7(4,2)	14,6[2,9 17,5]	7,3(5,7)	26,7[3,6 30,4]	0,07
v_{max} (mm/s)	24,1(19,7)	227,9[9,8 237,6]	22,3(19,9)	74,1[11,0 85,1]	0,50
A (mm)	1,9(1,2)	5,8[0,7 6,5]	1,9(1,2)	5,4[0,7 6,1]	0,47
AP					
d_{mean} (mm)	0,6(0,4)	2,0[0,2 2,2]	0,7(0,6)	2,6[0,1 2,7]	<0,01*
d_{rms} (mm)	0,6(0,5)	2,4[0,2 2,6]	0,8(0,7)	2,8[0,2 3,0]	<0,01*
v_{mean} (mm/s)	4,6(2,2)	10,3[2,5 12,8]	6,3(2,9)	10,8[2,4 13,2]	<0,01*
v_{max} (mm/s)	14,0(6,7)	32,5[6,4 38,9]	18,4(10,3)	33,9[7,8 41,7]	<0,01*
A (mm)	2,2(1,6)	7,7[0,8 8,5]	2,9(2,0)	7,6[0,6 8,2]	<0,01*
Oxy					
d_{mean} (mm)	0,8(0,4)	2,0[0,3 2,3]	1,0(0,6)	2,6[0,4 3,0]	<0,01*
d_{rms} (mm)	0,9(0,5)	2,3[0,4 2,7]	1,1(0,7)	2,7[0,40 3,14]	<0,01*
v_{mean} (mm/s)	9,3(4,1)	14,2[4,9 19,1]	11,2(7,9)	27,4[5,6 33,0]	<0,01*
v_{max} (mm/s)	19,9(15,1)	224,4[9,0 233,4]	21,5(15,5)	52,1[9,9 62,0]	0,36
$A_{95\%}$ (mm ²)	5,4(5,1)	41,1[1,3 42,4]	7,7(7,7)	54,5[1,2 55,7]	<0,01*

TABLE III.3 – Comparaison des indicateurs d'équilibre postural entre les deux groupes d'archers pendant la phase de visée. d_{mean} : distance moyenne à la position moyenne, d_{rms} : écart-type de distance par rapport à la position moyenne, v_{mean} : vitesse moyenne, v_{max} : vitesse maximale, A : amplitude du déplacement. Médiane (Écart interquartile), étendue [minimum maximum]. * indique une différence significative entre les groupes $p < 0,05$

que chez des adultes en bonne santé, les oscillations posturales sont plus élevées sur l'axe antéro-postérieur que sur l'axe médio-latéral (PRIETO et al. 1996). Pour des archers ayant des années de pratique déjà, nos résultats suggèrent que la composante déterminante de l'équilibre postural est l'axe antéro-postérieur plutôt que l'axe médio-latéral.

Les valeurs inférieures d'oscillations posturales chez les archers « élite » par rapport aux archers « relève » suggèrent que l'expertise permet d'avoir une meilleure maîtrise de l'équilibre postural. Ces résultats sur la phase de visée sont cohérents avec les études existantes dans la littérature qui montrent que la réduction des oscillations posturales est un gage de performance dans le tir à l'arc ou dans des disciplines de tir (section I.3.3.4). Pour des archers entraînés, la différence de performance serait expliquée partiellement par la réduction des oscillations sur l'axe antéro-postérieur pendant la phase de visée, qui est l'axe ayant naturellement de plus grandes oscillations posturales.

3.2.2 Stratégies posturales

3.2.2.a Caractéristiques spatiales

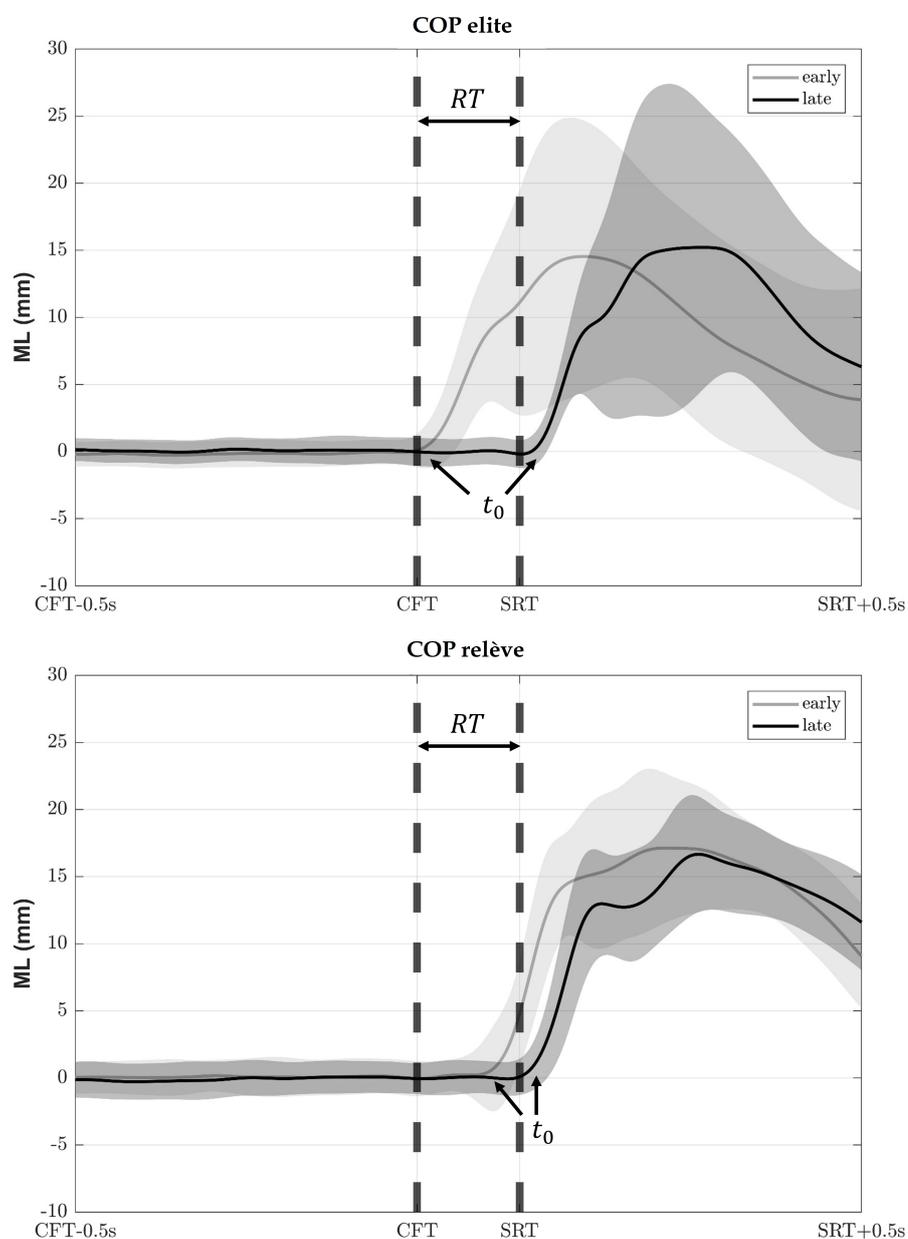


FIGURE III.11 – Position du centre de pression sur l'axe médio-latéral au cours du temps. Le trait plein représente la moyenne pour une des stratégies. Pour plus de clarté sur le graphique, l'axe temporel commence une demi-seconde avant la tombée du clicker et les données comprises entre CFT et SRT sont normalisées sur un temps de réaction moyen de 150 millisecondes.

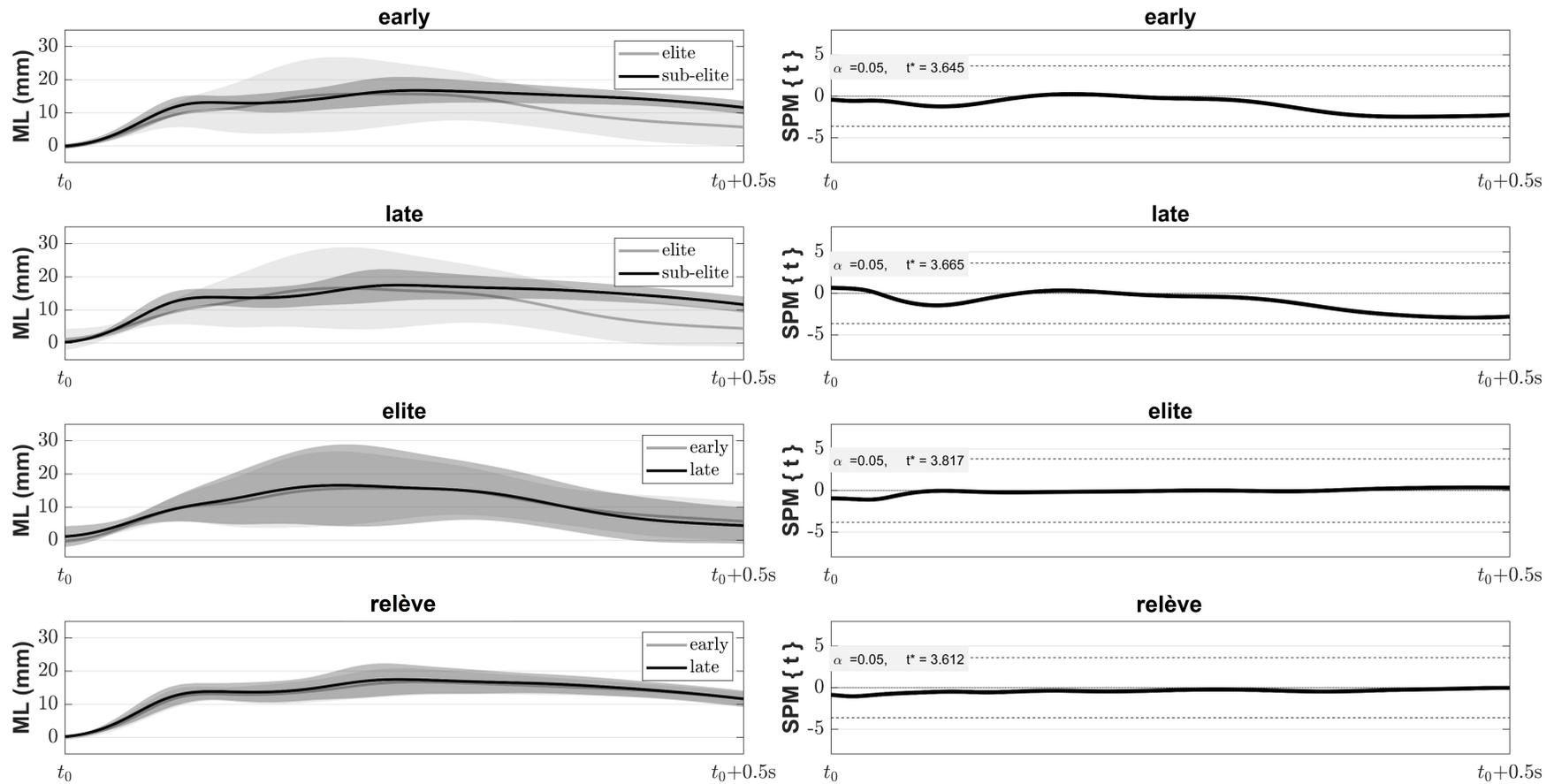


FIGURE III.12 – Comparaison du recul médio-latéral du centre de pression, à partir de leur initiation t_0 , entre les stratégies et entre les groupes d'archers. Sur la partie gauche, les séries temporelles moyennes du déplacement du centre de pression avec leur écart-type. Sur la partie droite la série temporelle de la statistique paramétrique.

L'instant du recul médio-latéral est notre critère de détection d'éventuels ajustements posturaux anticipés. Comme observé chez l'archer précédent, tous les archers ont connu un recul médio-latéral pendant la phase de tir (Figure III.11). De plus, l'ensemble des archers de cette étude ont eu des essais où le recul survient avant le lâcher de la corde, et d'autres où le recul survient après. Ceci signifie que les deux stratégies posturales (« early » et « late ») que l'archer de la précédente étude avait exhibé et qui ont été mis en évidence (section III.2.3.3), existent également chez d'autres archers entraînés. Les deux stratégies ont été utilisées par les deux groupes d'archers, mais la répartition de leur utilisation a montré des disparités. En effet, les archers du groupe « élite » ont utilisé de façon significative plus souvent la stratégie « early » que les archers du groupe « relève » : 82 fois sur 107 (77%) contre 73 fois sur 123 (59%). Au sein de chaque groupe, l'écart-type d'utilisation de la stratégie « early » était de 16% pour les archers « élite » et 17% chez les archers « relève ».

Le recul du centre de masse du système archer-arc causé par le départ de la corde est évalué à 4 millimètres environ (section III.2.3.3) et a besoin d'être compensé dans une situation d'un pendule inverse. Cet équilibrage est assuré en déplaçant le centre de pression dans la même direction de la perturbation et avec une plus grande amplitude (section I.3.4.4). Un tel recul du centre de pression global a bien été observé, avec une amplitude comprise entre 15 et 20 millimètres soit quatre à cinq fois le recul estimé du centre de masse du système. Par rapport aux oscillations posturales de la phase de visée, ce recul est 8 à 10 fois plus important.

Sur la Figure III.12, sont présentés les caractéristiques spatiales du recul médio-latéral du centre de pression, en superposant les séries temporelles à partir de l'instant où le recul est initié. L'analyse statistique paramétrique (Figure III.12 coté droit) pour chaque groupe ou chaque stratégie n'a pas montré de différences sur le recul effectué par les archers ($p > 0,05$). Les archers de cette étude étaient au final tous des pratiquants entraînés et étaient tous capables de produire des ajustements posturaux anticipés dont les caractéristiques spatiales permettent de compenser la perturbation volontaire. Cette même réponse posturale d'un point de vue spatial produite par ces archers suggèrent qu'après des années d'entraînement et des milliers, voire des dizaines de milliers de tirs, leur modèle interne a complètement intégré les conséquences du lâcher de corde sur leur équilibre postural puisqu'ils reproduisent le même recul quel que soit son instant de déclenchement : avant ou après la perturbation. Finalement, le seul critère que permet de différencier les stratégies « early » et « late » est le temps d'initiation du recul médio-latéral.

3.2.2.b Caractéristiques temporelles

Comme on peut l'observer sur la Figure III.11, les stratégies « early » et « late » des 2 populations n'ont pas les mêmes caractéristiques temporelles. Chez les archers « élite », lorsque la stratégie « early » est utilisée, le recul survient de façon significative avant les archers « relève » : 23 ± 38 millisecondes seulement après la tombée du clicker, contre 119 ± 37 millisecondes. En comparant cet instant par rapport à la perturbation, la stratégie « early » pour les archers « élite » survient aux alentours de 123 millisecondes avant le lâcher de corde contre 38 millisecondes pour les archers « relève ». Pour la stratégie « late », aucune différence n'a été mesurée entre leur survenue : 163 ± 24 millisecondes

après le clicker pour les archers « élite » contre 180 ± 26 millisecondes pour les archers « relève » (Table III.4). Ces valeurs correspondent pour les archers « élite » à 17 millisecondes et pour des archers « relève » à 25 millisecondes de latence après la perturbation. Au sein de chaque groupe d'archers, l'instant du recul était significativement antérieur pour la stratégie « early » que pour la stratégie « late ».

Dans une majorité des essais réalisés tout groupe confondu (155 sur 230), le recul médio-latéral a précédé le lâcher de la corde. Les temps de recul mesurés pour chaque groupe et chaque stratégie se sont révélés très répétables avec une distribution inférieure à 38 millisecondes au maximum (Table III.4). Le lâcher de la corde est extrêmement court, avec moins de 16 millisecondes de temps de contact entre la corde et la flèche. Pendant la phase de visée, le centre de pression se déplace très peu (Table III.3) et on peut donc considérer que le mouvement de recul médio-latéral débute avec une inertie quasi nulle. Le déplacement du centre de pression étant conditionné à des activations des muscles posturaux qui ont un certain temps de latence (WINTER 1995), la commande motrice vers ces muscles est forcément pré-programmée (MASSION 1994 ; HORAK, S. M. HENRY et al. 1997), antérieure à la perturbation, afin d'avoir un centre de pression proche de l'amplitude maximale du recul. Pour les archers « élite » environ deux tiers du recul était déjà effectué lorsque la corde est lâchée et un tiers pour les archers « relève » (Figure III.11).

Des différences temporelles très marquées ont toutefois été observées par rapport à l'instant où ce recul survient et leurs caractéristiques temporelles sont visibles sur la Figure III.11. Pour les archers « élite », le recul des tirs de la stratégie « early » survient seulement 23 millisecondes après la tombée du clicker et 17 millisecondes après le lâcher de la corde pour le recul des essais « late ». Ces deux temps de latence sont bien inférieurs à un réflexe postural qui est quantifié à 40 millisecondes (JACOBS et al. 2007 ; ACKERMANN et al. 1991), ce qui semble indiquer que l'ajustement postural anticipé chez les archers « élite » sont synchronisés sur les deux instants temporels importants dans le tir à l'arc, la tombée du clicker et le lâcher de la corde. Dans une majorité des cas (77%), ces ajustements le sont avec la tombée du clicker.

Pour les archers du groupe « relève », la distinction temporelle est plus ténue. Une différence temporelle significative a certes été montrée entre les deux stratégies, mais le recul médio-latéral dans ces deux stratégies surviennent à proximité du lâcher de corde, environ 30 millisecondes avant pour la stratégie « early » et 30 millisecondes après pour la stratégie « late ». La temporalité des ajustements posturaux anticipés produits dans la stratégie « early », très inférieur à ce qui est proposé par KRISHNAN et al. 2012, combiné à leur proximité avec la stratégie « late » (~ 60 millisecondes), laisse penser finalement à une seule et même stratégie synchronisée avec le lâcher de corde. Dans une majorité des cas (59%), l'archer parvient à devancer légèrement la perturbation. Cette explication questionne par conséquent le choix arbitraire du lâcher de corde pour catégoriser un essai en « early » ou en « late ».

Les résultats pour les archers « élite » sont similaires à ce qui a été montré dans d'autres sports (PAILLARD 2017). Les archers « élite » ont complètement intégré les caractéristiques temporelles et spatiales des conséquences liées au lâcher de corde après

des années d'entraînement qui leur ont permis d'optimiser leur geste et de produire des ajustements posturaux synchronisés avec la tombée du clicker. En revanche, les archers « relève », avaient moins d'expérience et étaient encore dans leur adolescence au moment de l'expérimentation (Table III.2). Par conséquent, ils pourraient être encore en cours de maturation de leur modèle interne, évoluant justement à cette période (MALLAU et al. 2010; ASSAIANTE et al. 2014), ce qui expliquerait la plus grande variabilité temporelle qu'ils avaient dans leur réponse posturale alors que la composante spatiale semble avoir été maîtrisée.

3.2.3 Temps de réaction

Les tests de Kruskal-Wallis ont montré un temps de réaction significativement inférieur chez les archers « élite » (146 ± 12 millisecondes) comparé aux archers « relève » (156 ± 15 millisecondes). Ce résultat permet de confirmer ceux présents dans la littérature. Tout d'abord, les temps de réaction produits correspondent à ce qui a été mesuré suite à un stimulus auditif prévisible (JACOBS et al. 2007) et les valeurs mesurées sont conformes à ce qui a pu déjà être mesuré chez des archers sachant bien tirer (section I.3.3.2). Ensuite le temps de réaction plus court chez les archers « élite » confirme que ceux-ci se réduisent avec le niveau des archers (section I.3.3.2).

Un temps de réaction trop long sera accompagné d'un maintien plus long de la tension musculaire à l'allonge maximale. De plus le clicker est l'indicateur d'allonge qui permet à l'archer d'être répétable de ce point de vue là, donc passer plus de temps sans lâcher la corde alors que le clicker est déjà tombé ne permet plus d'assurer cette répétabilité et la performance s'en retrouvera amoindrie (SPRAFORD et al. 2017). Pour les archers « relève », réduire la durée du temps de réaction peut être une piste d'amélioration, cependant les temps mesurés sont déjà assez faibles ce qui laisse très peu de plage d'amélioration. La réduction de ce temps, finalement, se heurtera à la limite des capacités humaines, car même dans des cas de stimulus prévisibles et de réaction prédéterminée, un délai incompressible existera dans tous les cas, le temps pour que le système nerveux traite le stimulus détecté, qu'une décision soit prise et que la commande motrice soit renvoyée (HICK 1952).

Malgré les différences temporelles notées sur les stratégies posturales effectuées par les archers, l'utilisation d'une stratégie ou d'une autre n'a eu aucune influence sur le temps de réaction au sein des groupes (Table III.4). Pour les archers « élite » il a été de 146 ± 11 millisecondes en « early » contre 146 ± 15 millisecondes pour les essais « late », tandis que pour les archers « relève » il a été de 157 ± 14 millisecondes pour « early » et 155 ± 17 millisecondes pour « late ».

3.2.4 Scores

Les archers du groupe « élite » ont marqué en moyenne $9,2 \pm 0,8$ points par flèche, contre $8,9 \pm 1,0$ points pour les archers du groupe « relève ». Les scores du groupe « élite » se sont par ailleurs révélés significativement supérieurs ($p = 0,03$). Ces résultats étaient

	élite		relève	
	early	late	early	late
Score	9,2±0,2	9,0±0,5	8,8±0,5	8,9±0,6
RT (ms)	146±11	146±15	157±14	155±17
t_0 (ms)	23±38	163±24	119±37	180±26

TABLE III.4 – Score, temps de réaction et temps d’initiation du recul par groupe et par stratégie pour chaque groupe et chaque stratégie. Moyenne \pm écart-type

attendus et permettent de confirmer la classification initiale des archers dans un groupe ou dans un autre en fonction de leur niveau.

Cependant, le score n’a pas été affecté significativement par les stratégies (Table III.4). Le score pour l’ensemble des essais « early » tout groupe confondu était de $9,0\pm 0,8$ contre $8,9\pm 1,1$ points pour l’ensemble des essais « late ». Au sein des groupes également, les tests statistiques n’ont pas montré l’avantage d’utiliser une stratégie ou une autre. Chez les archers « élite », les scores lorsqu’ils produisent une stratégie « early » est de $9,2\pm 0,2$ contre $9,0\pm 0,5$ pour la stratégie « late ». Chez les archers « relève », les scores étaient de $8,8\pm 0,5$ et $8,9\pm 0,6$ pour les stratégies « early » et « late » respectivement. Ainsi, un ajustement postural anticipé produit plus tôt ne semble pas améliorer la performance des archers.

Pour des archers de haut-niveau, n’importe quel gain marginal mérite d’être étudié (D. HALL et al. 2012). Suivant une modélisation proposée par J. L. PARK et LARVEN 2014, un archer perd 1 place au classement pour 1,4 points perdus sur un maximum de 720. La différence de score entre les stratégies « early » et « late » pour les archers « élite » est de 0,2 points par flèche. Pour les 72 flèches tirées en qualification, cela se traduirait par une perte de rang situé entre 0 et 10 places au maximum dans l’hypothèse où aucun tir n’est « early ». Pour la répartition des stratégies « early » (77%) et « late » (23%) qui a été observée chez les archers « élite », cela correspond à une perte de deux places au classement. Une moins bonne place sur la phase qualificative entraîne logiquement un parcours plus ardu lors des phases éliminatoires car un archer sera amené à tirer contre des personnes mieux classées. Entre 2000 et 2014, 76% des compétitions internationales de tir à l’arc ont été remportées par des archers classés entre la 1^{ère} et la 8^{ème} place après les tirs de qualifications (J. L. PARK 2016), ce qui démontre l’importance d’avoir le meilleur classement possible avant la phase éliminatoire.

3.2.5 Positionnement autour de la ligne de tir

L’écart-type de la position moyenne du pied avant chez les archers « élite » a été évalué à $11,2\pm 4,8$ millimètres sur l’axe médio-latéral et $12,6\pm 3,7$ millimètres sur l’axe antéro-postérieur, contre $9,4\pm 2,8$ millimètres sur l’axe médio-latéral et $17,1\pm 5,8$ millimètres sur l’axe antéro-postérieur pour le groupe « relève » (Table III.5). Pour le pied arrière, celui était de $9,4\pm 5,0$ millimètres sur l’axe médio-latéral et $13,6\pm 3,7$ millimètres sur l’axe antéro-postérieur, contre $9,6\pm 2,1$ millimètres sur l’axe médio-latéral et $15,5\pm 5,1$ milli-

mètres sur l'axe antéro-postérieur pour le groupe « relève » (Table III.5). Aucune différence entre les groupes n'a été notée sur ces deux axes de positionnement. Ces résultats témoignent d'une bonne répétabilité de positionnement avec toutefois une variabilité plus élevée sur l'axe antéro-postérieur. La seule différence significative qui a pu être observée se trouve pour les archers « relève » au niveau de leur pied avant où le positionnement médio-latéral était moins variable que sur l'axe antéro-postérieur ($p = 0,03$).

		élite		relève	
Av.	std_{ML} (mm)	11,2±4,8	11,6[6,0 17,6]	9,4±2,8*	6,7[6,8 13,5]
	std_{AP} (mm)	12,6±3,7	9,9[7,8 17,7]	17,1±5,8*	16,8[8,2 25,0]
Ar.	std_{ML} (mm)	9,4±5,0	13,5[4,0 17,5]	9,6±2,1	6,2[7,2 13,4]
	std_{AP} (mm)	13,6±2,8	8,1[8,6 16,6]	15,5±5,1	14,3[8,1 22,4]

TABLE III.5 – Positionnement des archers sur la ligne de tir, pied avant (Av.), pied arrière (Ar.), écart-type médio-latéral std_{ML} , antéro-postérieur std_{AP} , pour l'ensemble de leurs tirs. Moyenne ± écart-type, étendue [minimum maximum]. * indique une différence significative $p < 0,05$

On peut noter toutefois des différences inter-individus au sein des groupes. Au sein du groupe « élite », un unique archer (*E4*) a réalisé tous les minimums de positionnement pour les deux pieds et les deux axes, tandis qu'un autre *E5* a réalisé toutes les valeurs maximales (Table III.5). Pour le groupe relève, un archer (*R4*) a réalisé un meilleur positionnement que les autres avec toutes les valeurs minimales au sein du groupe avec une répétabilité jusqu'à deux à trois fois plus élevée que les autres archers « relève » (Table III.5).

Ces différences de positionnement initial entraînent des variations de la position globale du centre de pression. Leur distribution autour de la ligne de tir est présentée sur la Figure III.13, en fonction des scores réalisés par les archers. Pour deux archers « élite » (Figure III.13), la position des pieds sur l'axe antéro-postérieur s'est révélée être un facteur discriminant entre des flèches inférieures à « 10 » et des flèches à « 10 » points ($p < 0,01$ pour *E2* et $p = 0,04$ pour *E5*). Ces deux archers sont par ailleurs ceux qui ont montré la moins bonne répétabilité dans leur positionnement initial. Le lien entre le positionnement médio-latéral sur la ligne de tir et la performance était également montré pour un archer du groupe « relève » ($p = 0,03$ pour *R7*).

D'après le modèle balistique simplifié II.3.2.5, la variabilité de positionnement sur l'axe médio-latéral ou l'axe du tir n'est pas supposée avoir une influence sur la dispersion verticale si grande et donc sur le score (J. L. PARK 2019). Pour l'archer *R7* il est probable que ce soit des variations d'angle de tir qui ont causés de moins bons scores. En revanche pour les archers élites *E2* et *E5*, la variabilité sur l'axe antéro-postérieur a pu causer une dispersion latérale des flèches en modifiant par exemple légèrement l'orientation de leur arc J. L. PARK 2013. Cependant, les scores des flèches uniquement ont été conservés et non pas leur localisation en cible. Toutefois, ces résultats peuvent paraître déconcertants pour des archers de haut niveau qui estiment que le positionnement autour de la ligne de tir n'est pas important dans l'optique de la performance (J. L. PARK 2019). Si ce postu-

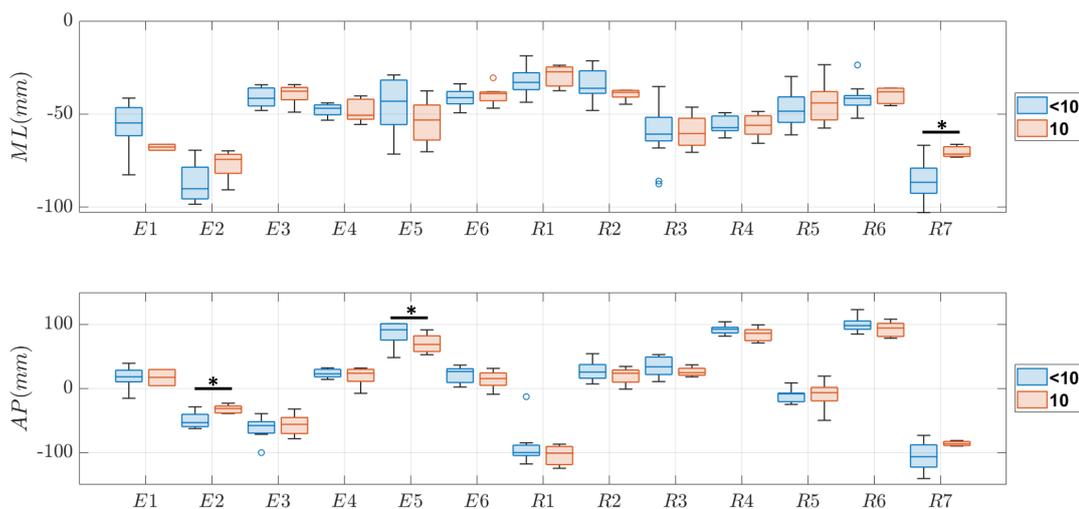


FIGURE III.13 – Positionnement initial du centre de pression sur l’axe médio-latéral (*ML*) et l’axe antéro-postérieur (*AP*), comparaisons entre scores (« 10 » ou inférieur à « 10 ») par archer. *E* : archer « élite », *R* : archer « relève ». * indique une différence significative entre les scores $p < 0,05$.

lat est vérifié chez dix des archers étudiés, un positionnement répétable permettrait aux trois archers restants de potentiellement améliorer leur score. Cette piste d’amélioration ne nécessite aucune réelle modification de leur technique et peut être mise en pratique très facilement en prenant des repères au sol pour se positionner à chaque fois de façon répétable, par exemple le pied arrière collé à la ligne comme préconisé par J. L. PARK 2019.

3.3 Limites

L’étude d’athlètes de haut niveau est par nature plus difficile que l’étude sur une population normale, du fait de leur nombre restreint et de leur emploi du temps très chargé entre les entraînements, les compétitions, les stages de préparation, les cours ou leur travail en parallèle. L’accès aux archers a également souffert du report des Jeux Olympiques de Tokyo en décalant d’un an toute la préparation à ce grand rendez-vous. Cette étude s’est intéressée uniquement à la catégorie des archers entraînés, ce qui rend une généralisation des résultats plus difficile à l’ensemble des archers.

Un des objectifs de toutes ces expérimentations, au-delà de la mise en évidence d’un mécanisme d’équilibration postural, est la préparation d’une station d’expertise pouvant être utilisée en routine d’entraînement, mesurant une séquence de tir d’une manière la plus écologique possible. Sans mesures d’activités musculaires en complément, aussi bien sur les muscles posturaux que sur les muscles du membre supérieur, il n’a pas été possible d’étudier les schémas d’activations précédant le lâcher de corde et/ou la tombée du clicker afin de les comparer avec ceux mis en évidence dans les études sur les ajustements posturaux anticipés (section I.3.4.4).

4 Conclusion

Au sujet de la station d'expertise désirée par la Fédération Française de Tir à l'Arc, le retour expérimental a permis d'affiner les appareils de mesures compatibles avec une utilisation par des athlètes de haut niveau. D'un point de vue pratique, la mise à l'écart d'un système de mesure d'électromyographie de surface est un choix clairement assumé car son utilisation est chronophage. Sans critères de performance musculaires, seul le retour sur les conséquences des activations musculaires est possible à travers le déplacement du centre de pression grâce à des plateformes de forces.

La présence d'ajustements posturaux anticipés préprogrammés à des instants précis pendant la séquence de tir montre que les archers entraînés semblent avoir intégré les caractéristiques spatiales de la perturbation liée au lâcher de la corde sur leur équilibre postural. Les archers « élite » arrivent à produire ces ajustements de façon synchronisée avec la tombée du clicker, alors que ceux des archers « relève » sont simultanés au lâcher de corde. Pour autant, la performance ne semble pas être influencée par le temps d'initiation de l'ajustement, mais plutôt par la maîtrise plus fine des oscillations posturales sur l'axe antéro-postérieur pendant la phase de visée.

Conclusion générale et perspectives

Le fil conducteur du travail réalisé pendant cette thèse a été de répondre aux questionnements des entraîneurs et des archers de l'équipe de France sur différentes thématiques liées aussi bien au matériel, au montage des flèches, à la technique et à la recherche de critères posturaux déterminants dans une optique d'amélioration de la performance.

Sur le matériel dans un premier temps, il faut assurer aux archers (ou les rassurer) qu'ils utilisent un matériel optimisé. La vitesse de la flèche en sortie d'arc ayant été déterminée comme un critère de performance (section I.2.1.1), l'objectif pour les archers est d'utiliser des branches d'arc les plus efficaces possible permettant de maximiser l'énergie potentielle élastique stockée à une allonge donnée pour une force moindre. L'utilisation du banc de mesure d'arc a au moins permis d'établir pour une catégorie de force l'avantage en terme d'efficacité qu'une paire a sur les autres branches de la même catégorie, en présentant un profil de force singulier. Cependant, les mesures sur le banc d'arc mériteraient d'être poursuivies afin d'agrandir la base de données et permettre des comparaisons plus générales à la fois entre les marques, les tailles de branches et les différents groupes de forces. L'énergie potentielle élastique calculée donne uniquement une indication sur la vitesse théorique qu'une flèche pourrait avoir en sortie d'arc. Cependant, toute l'énergie n'est pas entièrement transmise à la flèche lors de l'éjection, car une partie de l'ordre de 10% est dissipée, notamment par la corde (LIEU et al. 2011). Pour évaluer cette perte d'énergie lors de l'éjection de la flèche, il serait possible d'utiliser un radar pour mesurer la vitesse réelle de la flèche en sortie d'arc et de la comparer avec la vitesse théorique calculée. Sur les quatorze branches, seulement une mesure sur radar a pu être réalisée et cette comparaison reste à poursuivre.

Ensuite, une partie du travail a été consacrée à l'amélioration du processus de sélection des futs en amont de leur utilisation. Pour cela, il a d'abord fallu mesurer les caractéristiques des futs à l'aide d'un deuxième banc de mesure. Ce dispositif s'est révélé utile dans un premier temps pour éliminer les flèches, très peu nombreuses heureusement, dont les propriétés mécaniques ne respectent pas les indications fournies par le fabricant. Ensuite, en utilisant des critères de tris proposés dans la littérature, seulement 8% des futs en moyenne par catégorie de raideur sont jugés conformes à la pratique du tir à l'arc au haut-niveau. Ce nombre très faible justifie encore plus l'utilisation d'un tel banc pour permettre une sélection optimale des futs. En complément des paramètres proposés dans la littérature (section I.2.2), une modélisation sinusoïdale pour caractériser la raideur d'un fut a été proposée et validée. L'influence de la raideur, du diamètre, de la rectitude des futs, du montage des flèches et de leurs masses sur la dispersion en finale en cible a pu être évaluée en utilisant une machine de tir, plus répétable qu'un archer humain. Parmi l'ensemble des paramètres cités, seul la masse de la flèche a une incidence significative

sur sa position verticale, tandis que seul le diamètre a semblé être lié à la dispersion horizontale. En partant du modèle balistique de MADDALENA 2020 prenant en compte la rotation de la flèche, le vent et les erreurs liées au lâcher des doigts, il pourrait être possible de rajouter le paramètre de raideur de la flèche en s'inspirant du modèle proposé par LIU 2014 combinant équations de la balistique et la théorie des poutres.

Sur la base des résultats obtenus par la machine de tir, une combinaison de paramètres mécaniques permet de concorder à la proximité relative des flèches les unes par rapport aux autres, comprenant le spine, équivalent à la raideur, sa fréquence et la masse de la flèche. Pour l'ensemble des futs qui ont été mesurés au cours de ces trois ans, il est donc possible d'établir de nouveaux critères de tris. L'ensemble des futs qui ont été mesurés actuellement est issu d'un seul fabricant, possédant la quasi-totalité du marché des flèches utilisées par les archers participant aux plus grandes compétitions mondiales et très peu de concurrents parviennent à se montrer. Pour le CRITT Sport Loisirs, ce travail présente un intérêt afin de proposer une certification des futs propices à l'usage en compétition à destination de ces fabricants, qui pourraient alors s'en servir comme argument de vente. Cependant, cette proposition de critère de sélection ne se base que sur un travail expérimental et ne peut remplacer le ressenti d'un archer.

L'appropriation du travail réalisé concernant le tri de futs par les entraîneurs et les archers de l'équipe de France est un pas encourageant dans la bonne direction. Sur la Figure C.7 en annexe est présenté un extrait d'un tableau envoyé aux entraîneurs après les tris de futs réalisés. Dans les colonnes A à H, sont contenus les paramètres mécaniques des futs après caractérisation sur le banc de mesure, avec leur spine, amplitude, fréquence, diamètre, rectitude et masse. Les informations des trois dernières colonnes sont rajoutées par un entraîneur et un archer. Dans la colonne K est renseignée la masse de la flèche montée, paramètre qui n'était que trop rarement pris en compte auparavant et témoigne d'un début de prise de conscience sur son importance. La colonne J quant à elle correspond au ressenti de l'archer par rapport à la flèche montée : « 1 » indique une très bonne flèche utilisable en compétition, « 2 » une flèche normale suffisante pour l'entraînement et « 3 » une mauvaise flèche à éviter totalement. Ainsi, au fur et à mesure que des archers feront un retour sur leur ressenti des flèches qui ont été triées, il sera possible de comparer les critères qui ont été identifiés par la machine de tir et d'éventuels critères qui ressortiraient du tri humain basé sur l'expertise des archers.

La machine de tir qui a été utilisée, bien que déjà très performante, est améliorable. Les « doigts » mécaniques à l'heure actuelle sont rigides et ne peuvent pas reproduire exactement l'interaction doigt-corde qui existe. Le mécanisme déclencheur pourrait également être automatisé. Ces deux pistes d'améliorations pourraient s'inspirer de travaux réalisés par CHADEFaux, LE CARROU et al. 2013 sur la harpe qui avaient créé un doigt robotique recouvert d'une couche de silicone, pour coller au mieux à l'interaction doigt-corde dans la pratique de cet instrument. En utilisant un tel système, le lâcher de corde produit par la machine se rapprocherait encore plus d'un lâcher produit par un humain.

L'équilibre postural pendant la phase de visée est un critère de performance qui a été bien établi par la littérature (section I.3.3). Ceci a été confirmé en comparant des archers experts membres du collectif olympique français avec des archers plus jeunes membres

du Pôle France Relève. Les archers experts avaient en particulier une maîtrise plus fine de leurs oscillations posturales sur l'axe antéro-postérieur par rapport aux archers moins expérimentés, similairement à ce qui a été montré dans des disciplines de tir au pistolet.

Un mécanisme d'équilibre postural a été mis en évidence chez l'ensemble de ces archers. Dans un souci de maintien de l'équilibre, lorsqu'une perturbation volontaire est réalisée, des ajustements posturaux anticipés devraient avoir lieu. Cette hypothèse s'est vérifiée avant ou en même temps que le lâcher de la corde se produisant pendant une séquence de tir et perturbant l'équilibre que l'archer a établi pendant sa phase de visée. La temporalité de l'initiation du mouvement de recul médio-latéral a montré que celui est pré-programmé. Chez les archers expérimentés, deux stratégies ont été observées. Le recul est dans une majorité des tirs synchronisés avec la tombée du clicker (23 millisecondes après), bien avant le lâcher de corde (123 millisecondes), et dans une minorité des tirs après la perturbation (17 millisecondes). En revanche, chez les archers plus jeunes, le recul semble plutôt synchronisé avec le lâcher de corde, en se produisant seulement autour de 30 millisecondes avant et après le lâcher de corde qui traduirait plutôt une seule stratégie pré-programmée pour se déclencher au moment de la perturbation. Ces caractéristiques temporelles étaient la seule différence concernant cette anticipation posturale, leur amplitude ayant été similaire quelque soit les temps d'initiation.

Pour autant, il n'a pas été possible de démontrer l'utilité de produire de tels ajustements dans l'optique de l'amélioration de la performance, car le niveau entre ces deux populations de sujet n'a pas été assez différent. Une autre campagne d'expérimentation pourrait être conduite chez des archers débutants ou très moyens afin de déterminer si ceux-ci produisent des ajustements posturaux, et dans le cas contraire comment ces mécanismes sont acquis. Il pourrait également être intéressant de suivre l'évolution dans le temps des indicateurs posturaux et des caractéristiques temporelles des ajustements anticipés des archers du groupe « relève » pour voir si, au fil des années et des tirs, ils se rapprochent temporellement de la tombée du clicker. Les problématiques de maintien de l'équilibre étant les mêmes avec l'arc à poulies, une étude comparative intéressante pourrait être d'étudier chez cette population d'archers si de tels ajustements se produisent.

Pour pouvoir mesurer en routine d'entraînement les tirs des archers français, puis fournir un retour objectifs sur la qualité des tirs, une référence temporelle est obligatoire afin de savoir exactement ce qui est analysé. Les deux évènements qui ressortent et se produisent à chaque tir sont la tombée du clicker et le lâcher de corde. Jusqu'à présent, ces instants ont été mesurés à l'aide d'un accéléromètre, puis d'une caméra rapide, et ont nécessité un traitement a posteriori pour détecter ces instants et analyser les données des autres capteurs. La synchronisation de l'ensemble des appareils de mesures s'effectuait avec un système de capture du mouvement que possède le laboratoire et qui n'est pas disponible au centre d'entraînement national. Si l'étude des critères de performances basés sur l'équilibre postural ou les activations musculaires sont possibles avec du post-traitement, la mesure de ces instants reste encore aujourd'hui un défi logistique à réaliser en mode routine/temps réelle. En effet, celle-ci est en partie contrainte par le matériel utilisé au centre d'entraînement des archers français, qui comprend les deux plateformes

Kistler utilisées lors de l'étude sur les archers et deux caméras rapides Olympus iSpeed TR (Tokyo, Japon).

À l'heure actuelle, les deux plateformes de forces ont été installées sur un des pas de tirs et sont utilisées régulièrement en mode routine pour visualiser la trajectoire du centre de pression après chaque tir. En parallèle, les deux caméras rapides sont utilisées pour permettre à l'archer d'avoir un retour visuel après chaque tir avec deux points de vue différent (profil et vue de dessus). La synchronisation de ces deux systèmes indépendants n'est pas réalisée, et aucune référence temporelle n'est utilisée. Il faudrait alors rajouter un système de détection automatique d'un des événements, soit via les caméras rapides, soit à l'aide d'un autre appareil, par exemple un microphone qui permettrait d'effectuer cette mesure à distance.

Bibliographie

- AALTO, Heikki et al. (1990). « Postural Stability in Shooters ». In : *ORL* 52.4, p. 232-238. ISSN : 1423-0275. DOI : 10.1159/000276141. URL : <https://www.karger.com/Article/FullText/276141> (cf. p. 35).
- ABRAHAMOVA, Diana et al. (2008). « Age-related changes of human balance during quiet stance ». In : *Physiological Research* 57.6, p. 1-17. ISSN : 08628408. DOI : 10.33549/physiolres.931238 (cf. p. 34).
- ACKERMANN, H. et al. (1991). « Influence of an acoustic preparatory signal on postural reflexes of the distal leg muscles in humans ». In : *Neuroscience Letters* 127.2, p. 242-246. DOI : 10.1016/0304-3940(91)90803-2. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0304394091908032> (cf. p. 86, 101).
- AOKI, F. (1991). « Activity patterns of upper arm muscles in relation to direction of rapid wrist movement in man ». In : *Experimental Brain Research* 83.3, p. 679-682. ISSN : 0014-4819. DOI : 10.1007/BF00229847. URL : <http://link.springer.com/10.1007/BF00229847> (cf. p. 33, 35).
- ARCHERY TRADE ASSOCIATION (2009). *Technical guidelines*. 1^{re} éd. (cf. p. 8, 12, 42, 43, 53, 75).
- ARUIN, Alexander S., William R. FORREST et al. (1998). « Anticipatory postural adjustments in conditions of postural instability ». In : *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology - Electromyography and Motor Control* 109.4, p. 350-359. ISSN : 0924980X. DOI : 10.1016/S0924-980X(98)00029-0 (cf. p. 35).
- ARUIN, Alexander S. et Mark L. LATASH (1995). « The role of motor action in anticipatory postural adjustments studied with self-induced and externally triggered perturbations ». In : *Experimental Brain Research* 106.2, p. 291-300. ISSN : 00144819. DOI : 10.1007/BF00241125 (cf. p. 24, 33, 35).
- (1996). « Anticipatory postural adjustments during self-initiated perturbations of different magnitude triggered by a standard motor action ». In : 101, p. 497-503 (cf. p. 35).
- ARUIN, Alexander S. et Takako SHIRATORI (2004). « The effect of the amplitude of motor action on anticipatory postural adjustments ». In : *Journal of Electromyography and Kinesiology* 14.4, p. 455-462. ISSN : 10506411. DOI : 10.1016/j.jelekin.2003.12.002. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S105064110300155X> (cf. p. 35).
- ASHBY, Ed (2007). « Understanding FOC ». In : p. 1-11 (cf. p. 17).
- ASSAIANTE, C. et al. (2014). « Body schema building during childhood and adolescence : A neurosensory approach ». In : *Neurophysiologie Clinique* 44.1, p. 3-12. ISSN : 09877053. DOI : 10.1016/j.neucli.2013.10.125 (cf. p. 34, 102).

- BAKHSH, Wajeeh et al. (2018). « Anatomy and Physical Examination of the Shoulder ». In : *Sports Medicine and Arthroscopy Review* 26.3, e10-e22. ISSN : 15381951. DOI : 10.1097/JSA.0000000000000202 (cf. p. 27).
- BALASUBRAMANIAM, Ramesh et al. (2000). « Specificity of postural sway to the demands of a precision task ». In : *Gait & Posture* 11.1, p. 12-24. ISSN : 1076898X. DOI : 10.1037/a0026661 (cf. p. 28).
- BALL, Kevin A. et al. (2003). « Body sway, aim point fluctuation and performances in rifle shooters : Inter- and intra-individual analysis ». In : *Journal of Sports Sciences* 21.7, p. 559-566. ISSN : 02640414. DOI : 10.1080/0264041031000101881 (cf. p. 28).
- BALOH, R. W. et al. (1998). « Balance disorders in older persons : Quantification with posturography ». In : *Otolaryngology - Head and Neck Surgery* 119.1, p. 89-92. ISSN : 01945998. DOI : 10.1016/S0194-5998(98)70177-9 (cf. p. 34).
- BARTON, John et al. (2011). « A miniaturised arrow ballistic measurement system ». In : *Proceedings of IEEE Sensors*, p. 1289-1292. DOI : 10.1109/ICSENS.2011.6127412 (cf. p. 38).
- (2012). « Arrow-mounted ballistic system for measuring performance of arrows equipped with hunting broadheads ». In : *Procedia Engineering* 34, p. 455-460. ISSN : 18777058. DOI : 10.1016/j.proeng.2012.04.078 (cf. p. 37).
- BEHM, David G et al. (2015). « Effects of Strength Training Using Unstable Surfaces on Strength, Power and Balance Performance Across the Lifespan : A Systematic Review and Meta-analysis ». In : *Sports Medicine* 45.12, p. 1645-1669. ISSN : 0112-1642. DOI : 10.1007/s40279-015-0384-x. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s40279-015-0384-x> (cf. p. 35).
- BELÉN'KII, V Ye (1966). « Elements of control of voluntary movements ». In : *Biofizika* 12, p. 135-141 (cf. p. 33).
- BERRIGAN, Félix et al. (2006). « Coordination between posture and movement : interaction between postural and accuracy constraints ». In : *Experimental Brain Research* 170.2, p. 255-264. ISSN : 0014-4819. DOI : 10.1007/s00221-005-0210-z. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00221-005-0210-z> (cf. p. 34).
- BERTHOZ, A., M. LACOUR et al. (1979). « The Role of Vision in the Control of Posture During Linear Motion ». In : *Progress in Brain Research* 50.C, p. 197-209. ISSN : 18757855. DOI : 10.1016/S0079-6123(08)60820-1 (cf. p. 29).
- BERTHOZ, A. et T. POZZO (1994). *Head and Body Coordination during Locomotion and Complex Movements*. ACADEMIC PRESS, INC, p. 147-165. DOI : 10.1016/B978-0-12-679270-6.50012-7. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-679270-6.50012-7> (cf. p. 30).
- BERTUCCO, M. et al. (2010). « Does movement planning follow Fitts' law ? Scaling anticipatory postural adjustments with movement speed and accuracy ». In : *Neuroscience* 171.1, p. 205-213. ISSN : 03064522. DOI : 10.1016/j.neuroscience.2010.08.023. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.08.023> <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306452210011309> (cf. p. 34, 35).
- BONNETBLANC, François et al. (2004). « Pointing to a target from an upright standing position : anticipatory postural adjustments are modulated by the size of the target in humans ». In : *Neuroscience Letters* 358.3, p. 181-184. ISSN : 03043940. DOI :

- 10.1016/j.neulet.2004.01.020. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304394004000710> (cf. p. 34).
- BOUISSET, S. et al. (1981). « A sequence of postural movements precedes voluntary movement ». In : *Neuroscience Letters* 22.3, p. 263-270. ISSN : 03043940. DOI : 10.1016/0304-3940(81)90117-8 (cf. p. 33).
- BRONSTEIN, A. M. (1986). « Suppression of visually evoked postural responses ». In : *Experimental Brain Research* 63.3, p. 655-658. ISSN : 00144819. DOI : 10.1007/BF00237488 (cf. p. 29).
- BRONSTEIN, Adolfo et al. (2004). *Clinical disorders of balance, posture and gait*. 2^e éd. CRC Press. ISBN : 978-0340806579 (cf. p. 30, 33).
- BUCCIOL, Alessandro et al. (2020). « Choking under pressure in archery ». In : *Journal of Behavioral and Experimental Economics* 89.June, p. 101581. ISSN : 22148043. DOI : 10.1016/j.socec.2020.101581. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221480432030080X> (cf. p. 6, 25).
- BURLEIGH, A. L. et al. (1994). « Modification of postural responses and step initiation : Evidence for goal- directed postural interactions ». In : *Journal of Neurophysiology* 72.6, p. 2892-2902. ISSN : 00223077. DOI : 10.1152/jn.1994.72.6.2892 (cf. p. 33).
- CALLAWAY, Andrew J. et al. (2017). « Identification of temporal factors related to shot performance for indoor recurve archery ». In : *Journal of Sports Sciences* 35.12, p. 1142-1147. ISSN : 1466447X. DOI : 10.1080/02640414.2016.1211730. URL : <http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2016.1211730> (cf. p. 9, 26, 37).
- CARONNI, Antonio, F BOLZONI et al. (2013). « Accuracy of pointing movements relies upon a specific tuning between anticipatory postural adjustments and prime mover activation ». In : *Acta Physiologica* 208.1, p. 111-124. ISSN : 17481708. DOI : 10.1111/apha.12081. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/apha.12081> (cf. p. 34).
- CARONNI, Antonio et Paolo CAVALLARI (2009). « Anticipatory postural adjustments stabilise the whole upper-limb prior to a gentle index finger tap ». In : p. 59-66. DOI : 10.1007/s00221-008-1668-2 (cf. p. 33, 35).
- CAVALLARI, Paolo et al. (2016). « The organization and control of intra-limb anticipatory postural adjustments and their role in movement performance ». In : *Frontiers in Human Neuroscience* 10.OCT2016, p. 1-14. ISSN : 16625161. DOI : 10.3389/fnhum.2016.00525 (cf. p. 33, 34).
- CHADEFAUX, Delphine, Jean-Loïc LE CARROU et al. (2013). « A model of harp plucking ». In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 133.4, p. 2444-2455. ISSN : 0001-4966. DOI : 10.1121/1.4792249 (cf. p. 108).
- CHADEFAUX, Delphine, L. VALDES-TAMAYO et al. (2020). « A preliminary study of stability in elite and novice 10 meter air pistol shooters ». In : *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 23.sup1, S61-S62. ISSN : 1025-5842. DOI : 10.1080/10255842.2020.1812160. URL : <https://doi.org/10.1080/10255842.2020.1812160> (cf. p. 28).
- CHOI, Seokgyu et al. (2016). « The role of Gukgung in the success of South Korean Archery ». In : *International Journal of the History of Sport* 33.9, p. 990-1007. ISSN : 17439035. DOI : 10.1080/09523367.2016.1237507. URL : <http://dx.doi.org/10.1080/09523367.2016.1237507> (cf. p. 5).

- CLARYS, J. P. et al. (1990). « Muscular activity of different shooting distances, different release techniques, and different performance levels, with and without stabilizers, in target archery ». In : *Journal of Sports Sciences* 8.3, p. 235-257. ISSN : 1466447X. DOI : 10.1080/02640419008732149 (cf. p. 9, 18, 28, 37).
- CORDO, P. J. et al. (1982). « Properties of postural adjustments associated with rapid arm movements ». In : *Journal of Neurophysiology* 47.2, p. 287-302. ISSN : 00223077. DOI : 10.1152/jn.1982.47.2.287 (cf. p. 33).
- CREATH, Robert et al. (2005). « A unified view of quiet and perturbed stance : Simultaneous co-existing excitable modes ». In : *Neuroscience Letters* 377.2, p. 75-80. ISSN : 03043940. DOI : 10.1016/j.neulet.2004.11.071 (cf. p. 32).
- CROTTS, Deanna et al. (1996). « Balance Abilities of Professional Dancers on Select Balance Tests ». In : *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy* 23.1, p. 12-17. ISSN : 0190-6011. DOI : 10.2519/jospt.1996.23.1.12. URL : <http://www.jospt.org/doi/10.2519/jospt.1996.23.1.12> (cf. p. 35).
- DAY, B. L. et al. (1997). « Human body-segment tilts induced by galvanic stimulation : A vestibularly driven balance protection mechanism ». In : *Journal of Physiology* 500.3, p. 661-672. ISSN : 00223751. DOI : 10.1113/jphysiol.1997.sp022051 (cf. p. 29).
- DENNY, Mark (2011). *Their arrows will darken the sun : the evolution and science of ballistics*. The Johns Hopkins University Press. ISBN : 978-0-8018-9856-3 (cf. p. 7, 17).
- DUARTE, Marcos et al. (2007). « Effects of postural task requirements on the speed-accuracy trade-off ». In : *Experimental Brain Research* 180.3, p. 457-467. ISSN : 0014-4819. DOI : 10.1007/s00221-007-0871-x. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00221-007-0871-x> (cf. p. 34, 35).
- EDELMANN-NUSSER, Jürgen et al. (2006). « On-target trajectories and the final pull in archery ». In : *European Journal of Sport Science* 6.4, p. 213-222. ISSN : 17461391. DOI : 10.1080/17461390601012579 (cf. p. 26, 28).
- ELLISON, Steve (2000). *Controlling bow behaviour with stabilisers*. Rapp. tech. (cf. p. 10).
- EMMET, Jessica (2014). *Recurve bow*. URL : <http://www.jessica-emmett.com/blog/archery-beginners-recurve-diagrams/> (cf. p. 7).
- ENRIQUEZ, Ortiz et al. (2021). « Experimental and computational study of the aerodynamic characteristics of archery arrows ». Thèse de doct. (cf. p. 17).
- ERA, Pertti et al. (1996). « Postural stability and skilled performance-a study On top-Level and naive rifle shooters ». In : *Journal of Biomechanics* 29.3, p. 301-306. ISSN : 00219290. DOI : 10.1016/0021-9290(95)00066-6 (cf. p. 28).
- EREN, Metin I., Michelle R. BEBBER et al. (2022). « North American Clovis Point Form and Performance II : An Experimental Assessment of Point, Haft, and Shaft Durability ». In : *Lithic Technology* 47.1, p. 38-51. ISSN : 20516185. DOI : 10.1080/01977261.2021.1926724. URL : <https://doi.org/10.1080/01977261.2021.1926724> (cf. p. 38).
- EREN, Metin I., Jay ROMANS et al. (2021). « Validating chronograph photo sensor measurement accuracy of stone-tipped projectile velocity ». In : *Measurement : Sensors* 13.December 2020, p. 100037. ISSN : 26659174. DOI : 10.1016/j.measen.

- 2020.100037. URL : <https://doi.org/10.1016/j.measen.2020.100037> (cf. p. 37).
- ERTAN, Hayri (2009). « Muscular activation patterns of the bow arm in recurve archery ». In : *Journal of Science and Medicine in Sport* 12.3, p. 357-360. ISSN : 14402440. DOI : 10.1016/j.jsams.2008.01.003 (cf. p. 26, 27).
- ERTAN, Hayri, Behzat KENTEL, S. T. TÜMER et al. (2003). « Activation patterns in forearm muscles during archery shooting ». In : *Human Movement Science* 22.1, p. 37-45. ISSN : 01679457. DOI : 10.1016/S0167-9457(02)00176-8 (cf. p. 26, 27).
- ERTAN, Hayri, Behzat KENTEL, S. Turgut TÜMER et al. (2005). « Reliability and validity testing of an archery chronometer ». In : *Journal of Sports Science and Medicine* 4.2, p. 95-104. ISSN : 13032968 (cf. p. 9, 26).
- ERTAN, Hayri, Axel KNICKER et al. (2011). « Individual variation of bowstring release in high level archery : A comparative case study ». In : *Human Movement* 12.3, p. 273-276. ISSN : 17323991. DOI : 10.2478/v10038-011-0030-x (cf. p. 26).
- ERTAN, Hayri, A. R. SOYLU et al. (2005). « Quantification the relationship between FITA scores and EMG skill indexes in archery ». In : *Journal of Electromyography and Kinesiology* 15.2, p. 222-227. ISSN : 10506411. DOI : 10.1016/j.jelekin.2004.08.004 (cf. p. 26, 27).
- FITA, World Archery (2021). *World Archery rulebook 2021* (cf. p. 3, 4, 23).
- FRIEDLI, W. G. et al. (1984). « Postural adjustments associated with rapid voluntary arm movements 1. Electromyographic data. ». In : *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 47.6, p. 611-622. ISSN : 0022-3050. DOI : 10.1136/jnnp.47.6.611. URL : <https://jnnp.bmj.com/lookup/doi/10.1136/jnnp.47.6.611> (cf. p. 33).
- GAGE, William H. et al. (2004). « Kinematic and kinetic validity of the inverted pendulum model in quiet standing ». In : *Gait and Posture* 19.2, p. 124-132. ISSN : 09666362. DOI : 10.1016/S0966-6362(03)00037-7 (cf. p. 30).
- GRUBER, M. et al. (2002). « An Analysis of the holding area in olympic archery ». In : *XXth international Symposium on Biomechanics*, p. 218-221 (cf. p. 28).
- GURFINKEL, V. S. et al. (1988). « Body Scheme in the Control of Postural Activity ». In : *Stance and Motion*, p. 185-193. DOI : 10.1007/978-1-4899-0821-6_17 (cf. p. 30, 35).
- HAAS, G. et al. (2008). « Development of feedback and feedforward control of upright stance ». In : *Developmental Medicine & Child Neurology* 31.4, p. 481-488. ISSN : 00121622. DOI : 10.1111/j.1469-8749.1989.tb04026.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8749.1989.tb04026.x> (cf. p. 35).
- HALL, David et al. (2012). « Marginal gains : Olympic lessons in high performance for organisations ». In : *HR Bulletin : Research and Practice* 7.2, p. 9-13. URL : <http://eprints.port.ac.uk/10012/> (cf. p. 103).
- HALL, Leanne M et al. (2010). « Adaptive Changes in Anticipatory Postural Adjustments With Novel and Familiar Postural Supports ». In : p. 968-976. DOI : 10.1152/jn.00479.2009. (cf. p. 35).
- HARRIS, Jacob A. et al. (2021). « The role of causal knowledge in the evolution of traditional technology ». In : *Current Biology* 31.8, 1798-1803.e3. ISSN : 18790445. DOI :

- 10.1016/j.cub.2021.01.096. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.01.096> (cf. p. 8).
- HEATH, Ernest Gerald (1973). *A history of target archery*. David & Charles (cf. p. 2).
- HELLER, Mario (2012). « Evaluation of arrow release in highly skilled archers using an acoustic measurement system ». In : *Procedia Engineering* 34, p. 532-537. ISSN : 18777058. DOI : 10.1016/j.proeng.2012.04.091 (cf. p. 26, 37).
- HENRY, Mélanie et al. (2019). « Age-related changes in leg proprioception : Implications for postural control ». In : *Journal of Neurophysiology* 122.2, p. 525-538. ISSN : 15221598. DOI : 10.1152/jn.00067.2019 (cf. p. 34).
- HICK, W.E. (1952). « Quarterly Journal of Experimental On the rate of gain of information ». In : *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 4.1, p. 11-26 (cf. p. 102).
- HICKMAN, Clarence (1947). *Archery : the technical side*. National field archery association (cf. p. 18, 19).
- HOF, A. L. et al. (2005). « The condition for dynamic stability ». In : *Journal of Biomechanics* 38.1, p. 1-8. ISSN : 00219290. DOI : 10.1016/j.jbiomech.2004.03.025 (cf. p. 29).
- HORAK, Fay B. (1987). « Clinical measurement of postural control in adults ». In : *Physical Therapy* 67.12, p. 1881-1885. ISSN : 00319023. DOI : 10.1093/ptj/67.12.1881 (cf. p. 32).
- (2006). « Postural orientation and equilibrium : What do we need to know about neural control of balance to prevent falls ? » In : *Age and Ageing* 35.SUPPL.2, p. 7-11. ISSN : 00020729. DOI : 10.1093/ageing/af1077 (cf. p. 32-35).
- HORAK, Fay B., H. C. DIENER et al. (1989). « Influence of central set on human postural responses ». In : *Journal of Neurophysiology* 62.4, p. 841-853. ISSN : 00223077. DOI : 10.1152/jn.1989.62.4.841 (cf. p. 35).
- HORAK, Fay B., P ESSELMAN et al. (1984). « The effects of movement velocity, mass displaced, and task certainty on associated postural adjustments made by normal and hemiplegic individuals. » In : *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 47.9, p. 1020-1028. ISSN : 0022-3050. DOI : 10.1136/jnnp.47.9.1020. URL : <https://jnnp.bmj.com/lookup/doi/10.1136/jnnp.47.9.1020> (cf. p. 35).
- HORAK, Fay B., Sharon M. HENRY et al. (1997). « Postural perturbations : New insights for treatment of balance disorders ». In : *Physical Therapy* 77.5, p. 517-533. ISSN : 00319023. DOI : 10.1093/ptj/77.5.517 (cf. p. 32, 34, 101).
- HORAK, Fay B. et Jane M. MACPHERSON (1996). « Postural orientation and equilibrium ». In : *Handbook of Physiology* 25.10, p. 255-292. ISSN : 1750-4589 (cf. p. 28, 30, 32, 33, 35).
- HORAK, Fay B. et Lewis M. NASHNER (1986). « Central programming of postural movements : Adaptation to altered support-surface configurations ». In : *Journal of Neurophysiology* 55.6, p. 1369-1381. ISSN : 00223077. DOI : 10.1152/jn.1986.55.6.1369 (cf. p. 32).
- HORAK, Fay B., Lewis M. NASHNER et H. C. DIENER (1990). « Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss ». In : *Experimental Brain Research* 82.1, p. 167-177. ISSN : 00144819. DOI : 10.1007/BF00230848 (cf. p. 29).
- HORAK, Fay B., C. L. SHUPERT et al. (1994). « Vestibular and somatosensory contributions to responses to head and body displacements in stance ». In : *Experimental*

- Brain Research* 100.1, p. 93-106. ISSN : 00144819. DOI : 10.1007/BF00227282 (cf. p. 29).
- HORSACK, Brian et al. (2011). « A three-dimensional analysis of finger and bow string movements during the release in archery ». In : *Journal of Applied Biomechanics* 27.2, p. 151-160. ISSN : 15432688. DOI : 10.1123/jab.27.2.151 (cf. p. 19).
- HORSTMANN, G. A. et al. (1988). « The contribution of vestibular input to the stabilization of human posture : A new experimental approach ». In : *Neuroscience Letters* 95.1-3, p. 179-184. ISSN : 03043940. DOI : 10.1016/0304-3940(88)90653-2 (cf. p. 29).
- HSU, Wei Li et al. (2007). « Control and estimation of posture during quiet stance depends on multijoint coordination ». In : *Journal of Neurophysiology* 97.4, p. 3024-3035. ISSN : 00223077. DOI : 10.1152/jn.01142.2006 (cf. p. 32).
- HUXHAM, Frances E. et al. (2001). « Theoretical considerations in balance assessment ». In : *Australian Journal of Physiotherapy* 47.2, p. 89-100. ISSN : 00049514. DOI : 10.1016/S0004-9514(14)60300-7. URL : [http://dx.doi.org/10.1016/S0004-9514\(14\)60300-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0004-9514(14)60300-7) (cf. p. 28).
- HYTÖNEN, Malta et al. (1993). « Postural control and age ». In : *Acta Oto-Laryngologica* 113.1-2, p. 119-122. ISSN : 00016489. DOI : 10.3109/00016489309135778 (cf. p. 34).
- JACOBS, J. V. et al. (2007). « Cortical control of postural responses ». In : *Journal of Neural Transmission* 114.10, p. 1339-1348. ISSN : 03009564. DOI : 10.1007/s00702-007-0657-0 (cf. p. 86, 101, 102).
- JAKOBS, Oliver et al. (2009). « Effects of timing and movement uncertainty implicate the temporo-parietal junction in the prediction of forthcoming motor actions ». In : *NeuroImage* 47.2, p. 667-677. ISSN : 10538119. DOI : 10.1016/j.neuroimage.2009.04.065. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.04.065> <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1053811909004315> (cf. p. 27).
- JAMI, Léna (1992). « Golgi tendon organs in mammalian skeletal muscle : Functional properties and central actions ». In : *Physiological Reviews* 72.3, p. 623-666. ISSN : 00319333. DOI : 10.1152/physrev.1992.72.3.623 (cf. p. 30).
- JEONG, Yeongsang et al. (2013). « Measurement and calibration system of arrow's impact point using high speed object detecting sensor ». In : *The Second International Conference on Intelligent Systems and Applications company. c*, p. 167-172. ISBN : 9781612082691 (cf. p. 11).
- JOHANSSON, Rolf et al. (1988). « Identification of Human Postural Dynamics ». In : *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 35.10, p. 858-869. ISSN : 15582531. DOI : 10.1109/10.7293 (cf. p. 29).
- KANDEL, E. R. et al. (2014). « Posture ». In : *Principles of Neural Science*. The McGraw. Chap. 41, p. 1-28. ISBN : 978-0-07-139011-8. URL : <https://neurology.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1049%7B%5C%7Dsectionid=59138671> (cf. p. 29, 32, 33, 35).
- KAVOUNOUDIAS, Anne et al. (1999). « From balance regulation to body orientation : Two goals for muscle proprioceptive information processing? ». In : *Experimental Brain Research* 124.1, p. 80-88. ISSN : 00144819. DOI : 10.1007/s002210050602 (cf. p. 29, 34).

- KEAST, David et al. (1990). « Fine body movements and the cardiac cycle in archery ». In : *Journal of Sports Sciences* 8.3, p. 203-213. ISSN : 1466447X (cf. p. 26, 28, 88).
- KILBY, Melissa C. et al. (2015). « Models of postural control : Shared variance in joint and COM motions ». In : *PLoS ONE* 10.5, p. 1-20. ISSN : 19326203. DOI : 10.1371/journal.pone.0126379 (cf. p. 32).
- KIM, Han Byul et al. (2015). « The relative importance of performance factors in Korean archery ». In : *Journal of Strength and Conditioning Research* 29.5, p. 1211-1219. ISSN : 15334295. DOI : 10.1519/JSC.0000000000000687 (cf. p. 9, 25).
- KO, Ji Hynu et al. (2017). « Skill level constrains the coordination of posture and upper-limb movement in a pistol-aiming task ». In : *Human Movement Science* 55. August, p. 255-263. ISSN : 18727646. DOI : 10.1016/j.humov.2017.08.017. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.humov.2017.08.017> (cf. p. 28).
- KOLAYIŞ, İpek Eroğlu et al. (2016). « Differences in Activation Patterns of Shoulder Girdle Muscles in Recurve Archers ». In : *Pamukkale Journal of Sport Sciences* 7.1, p. 25-34 (cf. p. 88).
- KONRAD, Peter (2005). « The abc of emg. A practical introduction to kinesiological electromyography ». In : 1 (cf. p. 82).
- KOOI, B. W. (1991). « 'Cut and try' method in the design of the bow ». In : *Lecture Notes in Engineering* 292.63, p. 283-292. ISSN : 01765035. DOI : 10.1007/978-3-642-84397-6_29 (cf. p. 3, 7).
- (1998). « The Archer's Paradox and Modelling, a Review ». In : *History of Technology* 20, p. 125-137 (cf. p. 12, 13, 18, 37).
- (2019). *Design and materials in archery*. Elsevier Ltd, p. 347-374. ISBN : 9780081025826. DOI : 10.1016/B978-0-08-102582-6.00012-5. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102582-6.00012-5> (cf. p. 6, 7, 9, 43).
- KOOI, B. W. et J. A. SPARENBERG (1997). « On the mechanics of the arrow : Archer's paradox ». In : *Journal of Engineering Mathematics* 31.4, p. 285-303. ISSN : 0022-0833 (cf. p. 19, 86).
- KRISHNAN, Vennila et al. (2012). « Early and late components of feed-forward postural adjustments to predictable perturbations ». In : *Clinical Neurophysiology* 123.5, p. 1016-1026. ISSN : 13882457. DOI : 10.1016/j.clinph.2011.09.014. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinph.2011.09.014> (cf. p. 33, 86, 101).
- KUCH, A. et al. (2019). « A study of the influence of arrow mass on ballistics ». In : *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 22.sup1, S526-S528. ISSN : 1025-5842. DOI : 10.1080/10255842.2020.1715006. URL : <https://doi.org/10.1080/10255842.2020.1715006> (cf. p. 53).
- KÜMMEL, Jakob et al. (2016). « Specificity of Balance Training in Healthy Individuals : A Systematic Review and Meta-Analysis ». In : *Sports Medicine* 46.9, p. 1261-1271. ISSN : 0112-1642. DOI : 10.1007/s40279-016-0515-z. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s40279-016-0515-z> (cf. p. 35).
- LABORDE, Sylvain et al. (2009). « Interaction of Hand Preference with Eye Dominance on Accuracy in Archery ». In : *Perceptual and Motor Skills* 108.2, p. 558-564. ISSN : 0031-5125. DOI : 10.2466/pms.108.2.558-564. URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.2466/pms.108.2.558-564> (cf. p. 11).

- LANDERS, Daniel M. et al. (1986). « A psychobiological study of archery performance ». In : *Research Quarterly for Exercise and Sport* 57.3, p. 236-244. ISSN : 21683824. DOI : 10.1080/02701367.1986.10605403 (cf. p. 25).
- LAU, Michael et al. (2018). « A device for measuring the variable lateral bow angle and its impact on score loss ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology*. ISSN : 1754338X. DOI : 10.1177/1754337118815026 (cf. p. 37).
- LE PELLECC, Armande et al. (1999). « Anticipatory postural adjustments are associated with single vertical jump and their timing is predictive of jump amplitude ». In : *Experimental Brain Research* 129.4, p. 551-558. ISSN : 00144819. DOI : 10.1007/s002210050925 (cf. p. 35).
- LEDSOME, Colin (2018). « Designing a Better Archery bow ». In : *International conference on engineering and product design education* (cf. p. 15).
- LEE, David et al. (1975). « Visual proprioceptive control of stance. » In : *Journal of Human Movement Studies* 1.April, p. 87-95. URL : <http://psycnet.apa.org/psycinfo/1976-27111-001> (cf. p. 29).
- LEE, Kisik et al. (2009). *Total Archery*. Sous la dir. d'Adamson SPENCER. 1^{re} éd. GimPo-City (cf. p. 8, 18, 24, 25).
- LEPERS, Christian et al. (2020). « The important role of bow choice and arrow fletching in projectile experimentation. A ballistic approach ». In : *Journal of Archaeological Science : Reports* 34.PA, p. 102613. ISSN : 2352409X. DOI : 10.1016/j.jasrep.2020.102613. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102613> (cf. p. 9, 13, 17).
- LEROYER, P. et al. (1993). « Biomechanical study of the final push-pull in archery ». In : *Journal of Sports Sciences* 11.1, p. 63-69. ISSN : 1466447X. DOI : 10.1080/02640419308729965 (cf. p. 24, 26-28, 37).
- LESINSKI, Melanie et al. (2015). « Dose-Response Relationships of Balance Training in Healthy Young Adults : A Systematic Review and Meta-Analysis ». In : *Sports Medicine* 45.4, p. 557-576. ISSN : 0112-1642. DOI : 10.1007/s40279-014-0284-5. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s40279-014-0284-5> (cf. p. 35).
- LESTIENNE, F. et V. GURFINKEL (1988). « Postural control in weightlessness : a dual process underlying adaptation to an unusual environment ». In : *Trends in Neurosciences* 11.8, p. 359-363. ISSN : 01662236. DOI : 10.1016/0166-2236(88)90058-6. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0166223688900586> (cf. p. 28).
- LESTIENNE, F., J. SOECHTING et al. (1977). « Postural readjustments induced by linear motion of visual scenes ». In : *Experimental Brain Research* 28.3-4, p. 363-384. ISSN : 00144819. DOI : 10.1007/BF00235717 (cf. p. 29, 30).
- LIEU, D.K. et al. (2011). « The Mechanics of Arrow Flight upon Release ». In : p. 1-12 (cf. p. 7, 10, 13, 18-20, 107).
- LIN, Jiu Jenq et al. (2010). « Activation and tremor of the shoulder muscles to the demands of an archery task ». In : *Journal of Sports Sciences* 28.4, p. 415-421. ISSN : 1466447X. DOI : 10.1080/02640410903536434 (cf. p. 26, 27).
- LIN, Kuo Bin et al. (2009). « Performance analysis based on an emulated archery machine ». In : *Proceedings of the 2009 International Conference on Machine Learning*

- and Cybernetics* 6.July, p. 3275-3278. DOI : 10.1109/ICMLC.2009.5212739 (cf. p. 38, 69).
- LISTON, Thomas Lewis (1991). *Physical laws of archery*. Liston & Associates (cf. p. 10).
- LIU, F. (2014). « Three-dimensional ballistic equations of rocket considering the elastic effects ». In : *Applied Mechanics and Materials* 628, p. 157-160. ISSN : 16627482. DOI : 10.4028/www.scientific.net/AMM.628.157 (cf. p. 108).
- LOWE, Corey et al. (2019). « Controlled ballistics tests of ground, percussion-flaked, and pressure-flaked projectile point impact durability : Implications for archaeological method and theory ». In : *Journal of Archaeological Science : Reports* 24, p. 677-682. ISSN : 2352409X. DOI : 10.1016/j.jasrep.2019.02.017. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352409X18307375> (cf. p. 38).
- MADDALENA, Tom (2020). « La physique des sports de tir ». PhD Thesis. Institut Polytechnique de Paris (cf. p. 1, 8, 10, 15-18, 22, 26, 28, 36, 37, 48, 51-53, 61, 72, 108).
- MAGNUSSON, M., H. ENBOM, R. JOHANSSON et I. PYYKKÖ (1990). « Significance of Pressor Input from the Human Feet in Anterior-Posterior Postural Control : The Effect of Hypothermia on Vibration-Induced Body-sway ». In : *Acta Oto-Laryngologica* 110.3-4, p. 182-188. ISSN : 0001-6489. DOI : 10.3109/00016489009122535. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.3109/00016489009122535> (cf. p. 29).
- MAGNUSSON, M., H. ENBOM, R. JOHANSSON et J. WIKLUND (1990). « Significance of pressor input from the human feet in lateral postural control : The effect of hypothermia on galvanically induced body-sway ». In : *Acta Oto-Laryngologica* 110.3-4, p. 321-327. ISSN : 00016489. DOI : 10.3109/00016489009122555 (cf. p. 29).
- MALLAU, Sophie et al. (2010). « Postural strategies and sensory integration : No turning point between childhood and adolescence ». In : *PLoS ONE* 5.9. ISSN : 19326203. DOI : 10.1371/journal.pone.0013078 (cf. p. 34, 102).
- MANCINI, Martina et al. (2020). « How is balance controlled by the nervous system ? » In : *Balance Dysfunction in Parkinson's Disease*, p. 1-24. DOI : 10.1016/b978-0-12-813874-8.00001-5 (cf. p. 29, 32, 34).
- MARLOW, W. C. (1981). « Bow and arrow dynamics ». In : *American Journal of Physics* 49.4, p. 320-333. ISSN : 0002-9505. DOI : 10.1119/1.12505. URL : <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.12505> (cf. p. 22).
- MARTIN, Philip E. et Gary D. HEISE (1992). « Archery Bow Grip Force Distribution : Relationships with Performance and Fatigue ». In : *International Journal of Sport Biomechanics* 8.4, p. 305-319. ISSN : 0740-2082. DOI : 10.1123/ijsb.8.4.305 (cf. p. 26).
- MARTIN, Philip E., William L. SILER et al. (1990). « Electromyographic analysis of bow string release in highly skilled archers ». In : *Journal of Sports Sciences* 8.3, p. 215-221. ISSN : 1466447X. DOI : 10.1080/02640419008732147 (cf. p. 27, 28, 37).
- MASON, Bruce R., L.F.COWAN et al. (1990). « Factors Affecting Accuracy in Pistol Shooting ». In : *EXCEL publication of the Australian Institute of Sport* June, 2 to 6 (cf. p. 28).
- MASON, Bruce R. et P. P. PELGRIM (1986). « Body stability and performance in archery ». In : *EXCEL*. T. 3. 2, p. 17-20 (cf. p. 28, 37).

- MASSION, Jean (1992). « Movement, posture and equilibrium : Interaction and coordination ». In : *Progress in Neurobiology* 38.1, p. 35-56. ISSN : 03010082. DOI : 10.1016/0301-0082(92)90034-C. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/030100829290034C> (cf. p. 30, 33, 34).
- (1994). « Postural control system ». In : *Current Opinion in Neurobiology* 4.6, p. 877-887. DOI : 10.1016/0959-4388(94)90137-6 (cf. p. 28-30, 32, 33, 101).
- (1998). « Postural control systems in developmental perspective ». In : *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 22.4, p. 465-472. ISSN : 01497634. DOI : 10.1016/S0149-7634(97)00031-6 (cf. p. 30, 32, 33).
- MERGNER, T. (2010). « A neurological view on reactive human stance control ». In : *Annual Reviews in Control* 34.2, p. 177-198. ISSN : 13675788. DOI : 10.1016/j.arcontrol.2010.08.001. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2010.08.001> (cf. p. 29).
- MEYER, H. O. (2015). « Applications of Physics to Archery ». In : November, p. 1-25. arXiv : 1511.02250. URL : <http://arxiv.org/abs/1511.02250> (cf. p. 10, 13, 16-18, 20, 21, 37, 86).
- MIYAZAKI, Takeshi, T. MATSUMOTO et al. (2017). « Indeterminacy of drag exerted on an arrow in free flight : Arrow attitude and laminar-turbulent transition ». In : *European Journal of Physics* 38.6. ISSN : 13616404. DOI : 10.1088/1361-6404/aa8339 (cf. p. 16, 37, 53).
- MIYAZAKI, Takeshi, Keita MUKAIYAMA et al. (2013). « Aerodynamic properties of an archery arrow ». In : *Sports Engineering* 16.1, p. 43-54. ISSN : 1369-7072. DOI : 10.1007/s12283-012-0102-y. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s12283-012-0102-y> (cf. p. 15, 17, 37).
- MORSE, Edward Sylvester (1885). *Ancient and modern methods of arrow-release*. Essex Institute (cf. p. 19).
- MOUCHNINO, L. et al. (1992). « Coordination between equilibrium and head-trunk orientation during leg movement : A new strategy built up by training ». In : *Journal of Neurophysiology* 67.6, p. 1587-1598. ISSN : 00223077. DOI : 10.1152/jn.1992.67.6.1587 (cf. p. 30).
- NANA-IBRAHIM, Salim et al. (2007). « Target size modifies anticipatory postural adjustments and subsequent elementary arm pointing ». In : *Experimental Brain Research* 184.2, p. 255-260. ISSN : 0014-4819. DOI : 10.1007/s00221-007-1178-7. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00221-007-1178-7> (cf. p. 34).
- NASHNER, Lewis M. (1977). « Fixed patterns of rapid postural responses among leg muscles during stance ». In : *Experimental Brain Research* 30.1, p. 13-24. ISSN : 00144819. DOI : 10.1007/BF00237855 (cf. p. 29, 33).
- NASHNER, Lewis M. et Gin MCCOLLUM (1985). « The organization of human postural movements : A formal basis and experimental synthesis ». In : *Behavioral and Brain Sciences* 8.1, p. 135-150. ISSN : 0140-525X. DOI : 10.1017/S0140525X00020008. URL : https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0140525X00020008/type/journal%7B%5C_%7Darticle (cf. p. 28, 32).
- NASHNER, Lewis M. et Paul WOLFSON (1974). « Influence of head position and proprioceptive cues on short latency postural reflexes evoked by galvanic stimulation of

- the human labyrinth ». In : *Brain Research* 67.2, p. 255-268. ISSN : 00068993. DOI : 10.1016/0006-8993(74)90276-5 (cf. p. 29, 34).
- NISHIZONO, H et al. (1987). « Analysis of Archery Shooting Techniques by Means of Electromyography ». In : *ISBS-Conference Proceedings Archive*, p. 364-372 (cf. p. 26, 27).
- OHARA, Masashi et al. (2020). « Development of an Archery Robot for the Selection ». In : 1, p. 3-9. DOI : 10.3390/proceedings2020049115 (cf. p. 38, 69).
- OKAWA, K. et al. (2013). « Free flight and wind tunnel measurements of the drag exerted on an archery arrow ». In : *Procedia Engineering* 60, p. 67-72. ISSN : 18777058. DOI : 10.1016/j.proeng.2013.07.017. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.07.017> (cf. p. 16).
- ORTIZ, Julio, Masato ANDO et al. (2020). « Numerical Simulation of Wind Drift of Arrows on the Olympic Venue for Tokyo 2020 ». In : *Athens Journal of Sports* 7.1, p. 1-20. DOI : 10.30958/ajspo.7-1-1 (cf. p. 36, 37).
- ORTIZ, Julio, Atsushi SERINO et al. (2020). « Experimental and Computational Study of Archery Arrows Fletched with Straight Vanes ». In : p. 56. DOI : 10.3390/proceedings2020049056 (cf. p. 16, 37, 53, 61).
- PAILLARD, Thierry (2012). « Effects of general and local fatigue on postural control : A review ». In : *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 36.1, p. 162-176. ISSN : 01497634. DOI : 10.1016/j.neubiorev.2011.05.009. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.05.009> <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0149763411001047> (cf. p. 34).
- (2016). *Posture et équilibration humaines*, p. 272. ISBN : 978-2-35327-314-0. URL : <https://www.decitre.fr/media/pdf/feuilleter/9/7/8/2/3/5/3/2/9782353273140.pdf> (cf. p. 30).
- (2017). « Plasticity of the postural function to sport and/or motor experience ». In : *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 72.6, p. 129-152. ISSN : 01497634. DOI : 10.1016/j.neubiorev.2016.11.015. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.11.015> <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1440244012011358> <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0149763416304158> (cf. p. 34, 35, 101).
- PARK, Jae Woo et al. (2016). « Interrogating the key policy factors behind South Korea's archery success ». In : *International Journal of the History of Sport* 33.5, p. 523-544. ISSN : 17439035. DOI : 10.1080/09523367.2016.1173673 (cf. p. 37, 42).
- PARK, James L. (2011a). « Arrow behaviour in free flight ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology* 225.4, p. 241-252. ISSN : 17543371. DOI : 10.1177/17543371111398542 (cf. p. 37, 38).
- (2011b). « The aerodynamic drag and axial rotation of an arrow ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology* 225.4, p. 199-211. ISSN : 17543371. DOI : 10.1177/17543371111407124 (cf. p. 11, 15, 16, 36, 53).
- (2011c). « The behaviour of an arrow shot from a compound archery bow ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports*

- Engineering and Technology* 225.1, p. 8-21. ISSN : 17543371. DOI : 10 . 1177 / 17543371JSET82 (cf. p. 21, 22, 37, 38).
- (2013). « Arrow behaviour in the lateral plane during and immediately following the power stroke of a recurve archery bow ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology* 227.3, p. 172-183. ISSN : 17543371. DOI : 10 . 1177 / 1754337112464844 (cf. p. 9, 11, 15, 19, 20, 27, 37, 38, 104).
 - (2014). « Modelling archers' scores at different distances to quantify score loss due to equipment selection and technique errors ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology* 228.4, p. 250-258. ISSN : 1754338X. DOI : 10 . 1177 / 1754337114539308 (cf. p. 36, 53, 61, 71, 75).
 - (2016). « Winning major international target archery competitions ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology* 230.3, p. 186-194. ISSN : 1754338X. DOI : 10 . 1177 / 1754337115590277 (cf. p. 5, 103).
 - (2019). « Optimising an archer's foot position to obtain a competitive advantage ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology* 233.3, p. 402-407. ISSN : 1754-3371. DOI : 10 . 1177 / 1754337119830569. URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1754337119830569> (cf. p. 23, 104, 105).
 - (2020). « The dynamic behaviour of an arrow in wind ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology* 234.3, p. 268-277. ISSN : 1754338X. DOI : 10 . 1177 / 1754337120910015 (cf. p. 15).
 - (2021a). « Minimising the impact of arrow mass and stiffness variations on an archer's score ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology*, p. 175433712110165. ISSN : 1754-3371. DOI : 10 . 1177 / 17543371211016598. URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/17543371211016598> (cf. p. 11, 13-15, 36-38, 53, 55, 59, 60, 68, 69, 73).
 - (2021b). « The impact of the atmosphere on target archery ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology* 235.4, p. 251-256. ISSN : 1754-3371. DOI : 10 . 1177 / 1754337118823967. URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1754337118823967> (cf. p. 37).
 - (2022). « Optimised sight adjustment processes for archers ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology*, p. 175433712211092. ISSN : 1754-3371. DOI : 10 . 1177 / 17543371221109250. URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/17543371221109250> (cf. p. 11).
- PARK, James L., Patrick J. AITCHISON et al. (2018). « Effect of arrow shaft straightness on arrow grouping ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology* 232.3, p. 236-241. ISSN : 1754338X. DOI : 10 . 1177 / 1754337117736705 (cf. p. 12, 15, 36, 38, 53).
- PARK, James L. et James E. LARVEN (2014). « Analysis of scores and arrow grouping at major international archery competitions ». In : *Proceedings of the Institution of*

- Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology* 228.2, p. 86-94. ISSN : 1754338X. DOI : 10.1177/1754337113519760 (cf. p. 103).
- PATAKY, Todd C., Mark A. ROBINSON et al. (2016). « Region-of-interest analyses of onedimensional biomechanical trajectories : Bridging 0D and 1D theory, augmenting statistical power ». In : *PeerJ* 2016.11. ISSN : 21678359. DOI : 10.7717/peerj.2652 (cf. p. 96).
- PATAKY, Todd C., Jos VANRENTERGHEM et al. (2015). « Zero- vs. one-dimensional, parametric vs. non-parametric, and confidence interval vs. hypothesis testing procedures in one-dimensional biomechanical trajectory analysis ». In : *Journal of Biomechanics* 48.7, p. 1277-1285. ISSN : 18732380. DOI : 10.1016/j.jbiomech.2015.02.051 (cf. p. 96).
- PERRIN, Philippe et al. (2002). « Judo, better than dance, develops sensorimotor adaptabilities involved in balance control ». In : *Gait and Posture* 15.2, p. 187-194. ISSN : 09666362. DOI : 10.1016/S0966-6362(01)00149-7 (cf. p. 35).
- PETERKA, R. J. (2002). « Sensorimotor integration in human postural control ». In : *Journal of Neurophysiology* 88.3, p. 1097-1118. ISSN : 00223077. DOI : 10.1152/jn.2002.88.3.1097 (cf. p. 29).
- POLLOCK, A. S. et al. (2000). « What is balance ? » In : *Clinical Rehabilitation* 14.4, p. 402-406. ISSN : 02692155. DOI : 10.1191/0269215500cr342oa (cf. p. 32).
- PRIETO, Thomas E. et al. (1996). « Measures of postural steadiness : Differences between healthy young and elderly adults ». In : *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 43.9, p. 956-966. ISSN : 00189294 (cf. p. 81, 88, 93, 97).
- QUAN, Cheng Hao et al. (2017). « Analysis of Shooting Consistency in Archers : A Dynamic Time Warping Algorithm-Based Approach ». In : *Journal of Sensors* 2017. ISSN : 16877268. DOI : 10.1155/2017/7471217 (cf. p. 37).
- RICCIO, Gary E. et al. (1992). « The role of balance dynamics in the active perception of orientation. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 18.3, p. 624-644. ISSN : 1939-1277. DOI : 10.1037/0096-1523.18.3.624. URL : <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.18.3.624> (cf. p. 28).
- RICE, Simon M. et al. (2016). « The Mental Health of Elite Athletes : A Narrative Systematic Review ». In : *Sports Medicine* 46.9, p. 1333-1353. ISSN : 11792035. DOI : 10.1007/s40279-016-0492-2 (cf. p. 25).
- RIECKMANN, Marianne et al. (2012). « Modelling the three-dimensional vibration of composite archery arrows under free-free boundary conditions ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology* 226.2, p. 114-122. ISSN : 17543371. DOI : 10.1177/1754337112442273 (cf. p. 13).
- SANTOS, Marcio J. et al. (2010). « The role of anticipatory postural adjustments in compensatory control of posture : 2. Biomechanical analysis ». In : *Journal of Electromyography and Kinesiology* 20.3, p. 398-405. ISSN : 10506411. DOI : 10.1016/j.jelekin.2010.01.002. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelekin.2010.01.002> (cf. p. 32, 33).
- SARRO, Karine Jacou et al. (2020). « Relationship between bow stability and postural control in recurve archery ». In : *European Journal of Sport Science* 0.0, p. 1-13. ISSN : 15367290. DOI : 10.1080/17461391.2020.1754471. URL : <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1754471> (cf. p. 28, 88).

- SATTLECKER, Gerold et al. (2017). « Factors discriminating high from low score performance in biathlon shooting ». In : *International Journal of Sports Physiology and Performance* 12.3, p. 377-384. ISSN : 15550265. DOI : 10.1123/ijsp.2016-0195 (cf. p. 28).
- SHINOHARA, Hiroshi et al. (2018). « Analysis of muscular activity in archery : a comparison of skill level ». In : *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 58.12. ISSN : 00224707. DOI : 10.23736/S0022-4707.17.07826-4. URL : <https://www.minervamedica.it/index2.php?show=R40Y2018N12A1752> (cf. p. 26, 27).
- SHUMWAY- COOK, Anne et al. (1995). *Motor Control : Theory and practical applications*. Sous la dir. de John P. BUTLER. First. Lippincott Williams et Wilkins, p. 591. ISBN : 0683077570 (cf. p. 28, 29).
- SIMSEK, Deniz et Ali O. CERRAH (2013). « The Assessment of Postural Control Mechanisms in Three Archery Disciplines : A Preliminary Study ». In : *Pamukkale Journal of...* 4.3, p. 18-28. URL : <http://psbd.pau.edu.tr/index.php/pjss/article/view/149> (cf. p. 21).
- SIMSEK, Deniz, Ali O. CERRAH, Hayri ERTAN et al. (2018). « Muscular coordination of movements associated with arrow release in archery ». In : *South African Journal for Research in Sport, Physical Education and Recreation* 40.1, p. 141-155. ISSN : 03799069 (cf. p. 26, 27, 79, 88).
- (2019). « A comparison of the ground reaction forces of archers with different levels of expertise during the arrow shooting ». In : *Science and Sports* 34.2, e137-e145. ISSN : 17784131 (cf. p. 26, 28, 37, 85, 88).
- SITTON, Jase et al. (2020). « Tip cross-sectional geometry predicts the penetration depth of stone-tipped projectiles ». In : *Scientific Reports* 10.1, p. 1-9. DOI : 10.1038/s41598-020-70264-y. URL : <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70264-y> (cf. p. 38).
- SMETACEK, Victor et al. (2004). « Making sense ». In : *Nature* 432.7013, p. 21-21. ISSN : 0028-0836. DOI : 10.1038/432021a. URL : <http://www.nature.com/articles/432021a> (cf. p. 34).
- SOYLU, A. R. et al. (2006). « Archery performance level and repeatability of event-related EMG ». In : *Human Movement Science* 25.6, p. 767-774. ISSN : 01679457. DOI : 10.1016/j.humov.2006.05.002 (cf. p. 9, 26, 28, 37).
- SPRATFORD, Wayne et al. (2017). « Postural stability, clicker reaction time and bow draw force predict performance in elite recurve archery ». In : *European Journal of Sport Science* 17.5, p. 539-545. ISSN : 15367290 (cf. p. 8, 9, 26, 28, 48, 80, 84, 102).
- SQUADRONE, Roberto et Renato RODANO (1994). « Multifactorial analysis of shooting archery ». In : *Proceedings of the XIIIth International Symposium on Biomechanics in Sports*, p. 270-273 (cf. p. 28).
- SQUADRONE, Roberto, Renato RODANO et Claudio GALLOZZI (1994). « Fatigue effects on shooting archery performance ». In : *ISBS-Conference Proceedings Archive*. T. 1. 1, p. 274-277 (cf. p. 26, 28, 37).
- ST GEORGE, R. J. et al. (2018). « Case studies in neuroscience : a dissociation of balance and posture demonstrated by camptocormia ». In : *Journal of Neurophysiology* 119.1, p. 33-38. ISSN : 15221598. DOI : 10.1152/jn.00582.2017 (cf. p. 29, 34).
- STAMBOLIEVA, Katerina et al. (2015). « Postural Stability during Static Upright Stance in Archers ». In : *Posture, Balance and the Brain*. Procon Ltd., p. 29-35. ISBN :

9789549252170. DOI : 10 . 11610 / posture . 05. URL : <http://www.biomed-data.eu/article/postural-stability-during-static-upright-stance-archers> (cf. p. 35).
- STUART, Jonathan et al. (1990). « Postural consistency in skilled archers ». In : *Journal of Sports Sciences* 8.3, p. 223-234. ISSN : 0264-0414. DOI : 10 . 1080 / 02640419008732148. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02640419008732148> (cf. p. 28).
- SUNG, Lok Man et al. (2018). « The Modern Compound Bow ». In : *Journal of Forensic Sciences* 63.1, p. 130-139. ISSN : 15564029. DOI : 10 . 1111 / 1556-4029 . 13503 (cf. p. 3, 21, 22).
- TAHA, Zahari et al. (2017). « Analysis of biological and mechanical related performance parameters of Malaysian senior youth archers ». In : *Advances in Human Biology* 7.3, p. 137. ISSN : 2321-8568. DOI : 10 . 4103 / AIHB . AIHB_35_17. URL : <http://www.aihbonline.com/text.asp?2017/7/3/137/214893> (cf. p. 27, 28, 37).
- TAKAI, Hideaki et al. (2009). « Characteristics of time spent on each phase during archery shooting : A study of the men's and women's individual gold medalists from the World Outdoor Archery Championships ». In : *Taikugaku kenkyu (Japan Journal of Physical Education, Health and Sport Sciences)* 54.2, p. 399-404. ISSN : 1881-7718. DOI : 10 . 5432 / jjpehss . a540205. URL : http://www.jstage.jst.go.jp/article/jjpehss/54/2/54%7B%5C_%7Da540205/%7B%5C_%7Darticle/-char/ja/ (cf. p. 26).
- (2012). « Characteristics of shooting time of the world's top level male archery athletes ». In : *NSSU Journal of Sport Sciences* 1.1990, p. 8-12 (cf. p. 26).
- TAYLOR, Danielle (2015). « Hunger Games Hysteria ». In : *Parks & Recreation* 50.3, p. 16-17 (cf. p. 2).
- TINAZCI, Cevdet (2011). « Shooting dynamics in archery : A multidimensional analysis from drawing to releasing in male archers ». In : *Procedia Engineering* 13, p. 290-296. ISSN : 18777058 (cf. p. 26, 27).
- TING, Lena H. et al. (2007). « Neuromechanics of muscle synergies for posture and movement ». In : *Current Opinion in Neurobiology* 17.6, p. 622-628. ISSN : 09594388. DOI : 10 . 1016 / j . conb . 2008 . 01 . 002 (cf. p. 32).
- TORRES-OVIEDO, Gelsy et al. (2006). « Muscle synergy organization is robust across a variety of postural perturbations ». In : *Journal of Neurophysiology* 96.3, p. 1530-1546. ISSN : 00223077. DOI : 10 . 1152 / jn . 00810 . 2005 (cf. p. 32).
- TUIJN, C. et al. (1992). « The measurement of arrow velocities in the students' laboratory ». In : *European Journal of Physics* 13.3, p. 127-134. ISSN : 0143-0807. DOI : 10 . 1088 / 0143-0807 / 13 / 3 / 006. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/13/3/006> (cf. p. 7).
- VENDRAME, Eleonora et al. (2022). « Performance assessment in archery : a systematic review ». In : *Sports Biomechanics* 00.00, p. 1-23. ISSN : 1476-3141. DOI : 10 . 1080 / 14763141 . 2022 . 2049357. URL : <https://doi.org/10.1080/14763141.2022.2049357> (cf. p. 2, 25).
- WERNER, Angelia et al. (2019). « Experimental assessment of proximal-lateral edge grinding on haft damage using replicated Late Pleistocene (Clovis) stone projectile points ». In : *Archaeological and Anthropological Sciences* 11.11, p. 5833-5849. ISSN : 18669565. DOI : 10 . 1007 / s12520-017-0594-2 (cf. p. 38).

- WINTER, David A. (1995). « Human balance and posture control during standing and walking ». In : *Gait & Posture* 3.4, p. 193-214. ISSN : 09666362. DOI : 10.1016/0966-6362(96)82849-9. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0966636296828499> (cf. p. 29-32, 96, 101).
- (2009). *Biomechanics and motor control of human movement*. Fourth. John Wiley & Sons. ISBN : 978-0-470-39818-0 (cf. p. 29).
- WINTER, David A. et al. (1998). « Stiffness control of balance in quiet standing ». In : *Journal of Neurophysiology* 80.3, p. 1211-1221. ISSN : 00223077. DOI : 10.1152/jn.1998.80.3.1211 (cf. p. 30).
- WOOLLACOTT, M. H. et al. (1984). « Preparatory process for anticipatory postural adjustments : Modulation of leg muscles reflex pathways during preparation for arm movements in standing man ». In : *Experimental Brain Research* 55.2, p. 263-271. ISSN : 00144819. DOI : 10.1007/BF00237277 (cf. p. 33).
- WU, Ge et al. (1997). « The significance of somatosensory stimulations to the human foot in the control of postural reflexes ». In : *Experimental Brain Research* 114.1, p. 163-169. ISSN : 00144819. DOI : 10.1007/PL00005616 (cf. p. 29).
- ZANEVSKYY, Igor (2001). « Lateral deflection of archery arrows ». In : *Sports Engineering* 4.1, p. 23-42. ISSN : 1369-7072. DOI : 10.1046/j.1460-2687.2001.00066.x (cf. p. 13, 14, 18, 19, 53).
- (2006). « Bow tuning in the vertical plane ». In : *Sports Engineering* 9.2, p. 77-86. ISSN : 1369-7072. DOI : 10.1007/bf02844860 (cf. p. 8).
- (2007). « Archery bow stabiliser modelling ». In : *The impact of Technology on Sport II*. CRC Press, p. 779-786. ISBN : 9780429094491 (cf. p. 10).
- (2012). « Recoil and vibration in an archery bow equipped with a multi-rod stabilizer ». In : *Shock and Vibration* 19.2, p. 231-246. ISSN : 10709622. DOI : 10.3233/SAV-2011-0626 (cf. p. 10, 20, 86).
- ZAWI, K et al. (2013). « Postural Sway Distinguishes Shooting Accuracy among Skilled Recurve Archers ». In : *The Online Journal of Recreation and Sport* 2.4, p. 21-28. URL : <http://www.tojras.com/volume/tojras-volume02-issue04.pdf%7B%5C#%7Dpage=89> (cf. p. 28).

Annexes

Annexe A

Actes de congrès

Poster

A study of the influence of arrow mass on ballistics

A. Kuch, J-F. Debril, J-M. Tizzoni, P. Laguillaumie, T. Monnet
44^{eme} congrès de la Société de Biomécanique, 2019, Poitiers

Oral

Effect of bow drawing technique on skilled archer postural stability

A. Kuch, J-F. Debril, M. Domalain, R. Tisserand, T. Monnet
45^{eme} congrès de la Société de Biomécanique, 2020, Metz

A postural strategy at string release in elite archers

A. Kuch, R. Tisserand, F. Durand, T. Monnet
27^{eme} congrès de la European Society of Biomechanics, 2022, Porto

A study of the influence of arrow mass on ballistics

A. Kuch^{a,d}, J.-F. Debril^b, J.-M. Tizzoni^c, P. Laguillaumie^d and T. Monnet^d

^aCRITT Sport Loisirs, Châtellerauld, France; ^bCREPS de Poitiers, Poitiers, France; ^cFédération Française de Tir à l'Arc, Noisy-le-Grand, France; ^dInstitut Pprime, CNRS/Université de Poitiers/ISAE-ENSMA, Poitiers, France

1. Introduction

Olympic target archery is a precision mechanic sports. It consists in shooting at a 122 centimetres target set 70 metres away with a recurve bow. The target is composed of ten concentric circles. The inner-most circle is the smallest one (12.2 cm) and gives the highest possible points. Archery can be considered as a concentration sport, where stability and repeatability are the most important qualities.

Precision in archery depends also on the mechanical properties of the bow used and the mechanical properties of the arrows that are shot. The provider of most archery Olympic medals, Easton Archery (USA), guarantees that the weight between two shafts from the same packaged dozen does not exceed 0.5 grains (≈ 0.032 grams).

In a context of high density among the world top level archers and countries, the French archery federation (FFTA) wishes to assess the quality of the arrow shafts used for training or competition and quantify the impact of weight shafts variations on target.

2. Methods

An archery arrow is composed of a shaft, a point, three fletchings and a nock. The arrow shaft represents roughly 2/3 of its total mass. In this study, only the variation of the shaft weight is considered.

Twenty-six dozens of X10 arrow shafts (Easton Archery, USA) of different arrow stiffness used for the Olympic Games were chosen. The selection includes three dozens of stiffness 325, 350, 380, 410, five dozens of 500, 550 and four dozens of 600.

The arrow shafts were weighted on a scale (A&D FZ-200i, Japan). The scale readability is 0.001 grams with a standard deviation of 0.001 grams.

To verify the weight specification given by Easton Archery, weight range per dozens was calculated.

Since the archers mix shafts from different dozens of the same size, the weight range across every shafts of the same size are also studied.

In this preliminary study, the energy losses due to friction for the arrow system are neglected. Hence, the total energy is the sum of the kinetic energy and potential energy. During the aiming phase, the system arrow is at equilibrium. When the archer reaches full draw, potential elastic energy (E_{bow}) is stored in the bow limbs. After the release, the bow elastic energy is transformed into kinetic energy (E_{arr}) via the nocking point ($E_{bow} = E_{arr}$).

$$\Delta E_{arr} + \Delta E_{bow} = 0 \quad (1)$$

$$E_{arr} = \frac{1}{2} m v_{arr}^2 \quad (2)$$

From Equations (1) and (2) derives the relation between the velocity of the arrow (v_{arr}) right after the release, its mass (m) the energy of the bow (E_{bow}).

$$v_{arr} = \sqrt{\frac{2E_{bow}}{m}} \quad (3)$$

After being released, with an initial velocity (v_{arr}), height (y_0) and angle (α_0), the arrow is under the influence of its weight (\vec{W}_{arr}) and air resistance (\vec{F}_d).

$$\vec{W}_{arr} = m \vec{g} \quad (4)$$

$$\vec{F}_d = -\frac{1}{2} \rho v^2 C_d A \vec{u}_v \quad (5)$$

with g the gravitational acceleration on Earth, ρ the density of the air, C_d the drag coefficient, v the velocity of the arrow relative to the air, \vec{u}_v its direction and A the cross sectional area of the arrow.

Applying Newton's second law,

$$m \vec{a}_{rr} = \vec{W}_{arr} + \vec{F}_d \quad (6)$$

Assuming that the initial velocity of the arrow is contained only in a plane (x, y), it derives the acceleration on both axes:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{1}{2m} \rho v^2 C_d A \dot{x} \\ \ddot{y} = -g - \frac{1}{2m} \rho v^2 C_d A \dot{y} \\ v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 \end{cases} \quad (7)$$

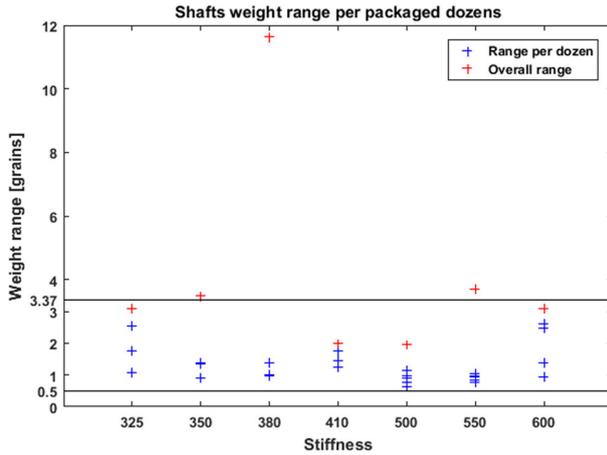


Figure 1. Weight range per packaged dozen (grains).

With the initial conditions:

$$\begin{cases} x(0) = 0 \\ y(0) = y_0 \end{cases} \quad \text{and} \quad \begin{cases} \dot{x}(0) = v_{arr} \cos \alpha_0 \\ \dot{y}(0) = v_{arr} \sin \alpha_0 \end{cases}$$

To obtain the trajectory of the arrow, the differential equations are solved numerically.

3. Results and discussion

Figure 1 presents the weight range within each packaged dozen. It appears that none of the dozens respects the weight specification given by the manufacturer. The analysis of weight range of the shafts within a same size highlights the difference of 11.64 grains between the lighter and heavier 380 shaft. For all the other stiffness, the overall ranges values went from 1.96 to 3.69 grains.

From Equation (3), for equal bow energy, the velocity of the arrow after release decreases if its mass increases. Moreover, Equation (7) show that the arrow mass will also affect its acceleration on both axes. The equations are solved with Matlab basic ordinary differential equations solver ode45 to give the trajectory of the arrow in the plane (x, y) .

Realistic parameters are selected for the computation. The bow energy, initial angle and baseline mass are chosen such as the arrow hits the target centre, set approximately at 130 cm, 70 metres away according to World Archery rulebook. $g = 9.80665 \text{ m.s}^{-2}$, $E_{\text{bow}} = 45 \text{ J}$, $\alpha_0 = 5.1^\circ$, $y_0 = 1.7 \text{ m}$, $C_d = 1.5$ (Miyazaki et al. 2013), $m = 23.361 \text{ g}$ ($\approx 360.5 \text{ gr}$), $\rho = 1.204 \text{ kg.m}^{-3}$, $A = 3.763 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

Table 1. Impact height at 70 m with different masses.

Weight (gr)	$m-1.96$	$m-3.69$	$m-11.64$
Height(cm)	+3.59	+6.76	+21.3
Weight (gr)	$m+1.96$	$m+3.69$	$m+11.64$
Height(cm)	-3.52	-6.67	-20.93

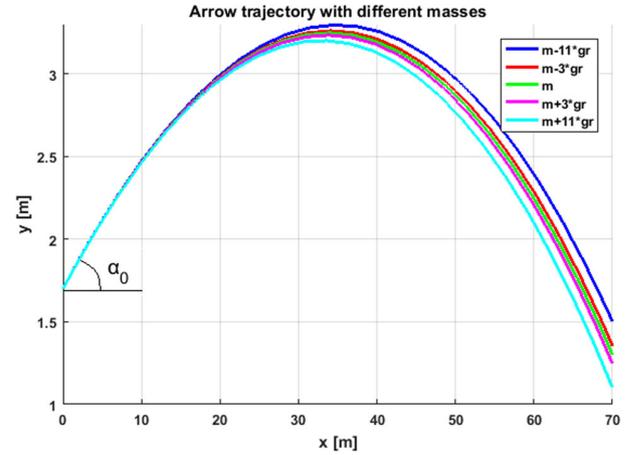


Figure 2. Arrow trajectories with different masses.

Table 1 sums up the different height impact relative to the target centre for the weight ranges measured.

According to Easton weight specification, an arrow heavier than the baseline arrow by 0.5 grains hits the target 0.87 cm lower. For arrows 0.5 grains lighter, the impact height is 0.94 cm higher.

Figure 2 displays different trajectories obtained with varying arrow masses ($m \pm 11$ grains). Assuming that the shots are perfectly duplicable in the same exact conditions, for the baseline mass m chosen, others same stiffness arrows weight should be ranged between $m - 3.35$ and $m + 3.37$ grains to keep arrows in the 10 points zone ($130 \pm 6.1 \text{ cm}$). For the shafts weighted, each dozens shots separately with the same initial conditions would give the maximum score. However, looking at the overall mass range in Figure 1, only 325, 410, 500 and 600 shafts are below 3.37 grains. Since archers mix the arrow shafts and shoot multiple arrows with the same bow settings, it is expected that just with shafts weight variations, scores should range from 7 to 10 points ($130 \pm 24.4 \text{ cm}$) for 380 shafts. For 350 and 550 shafts scores are expected to be at least 9 ($130 \pm 12.2 \text{ cm}$). Else, all the arrows are in the 10 points area.

4. Conclusions

The aim of this study was to assess the characteristics of the raw shafts provided by Easton in France. After analysis of the shafts weight, it was shown that for

each shaft stiffness tested, none of the packaged dozens respected the manufacturer specifications. Moreover, variations of shafts weight impact the exit velocity of the arrow after the release and its acceleration, thus induces a different target impact height or score according to the simplified model.

However, this model does not consider the stiffness of the arrow. The arrow bends around the bow after the release, inducing a lateral deflection. In order to limit the variability of the arrow shafts, future work will consist in measuring other mechanical properties such as their stiffness or diameter to quantify their influence on the scores for a whole target and select shafts with the same mechanical characteristics.

Funding

This work has been sponsored by the French National Institute of Sport and Physical Education (INSEP) and the French Ministry of Sports.

References

Miyazaki T, Mukaiyama K, Komori Y, Okawa K, Taguchi S, Sugiura H. 2013. Aerodynamic properties of an archery arrow. *Sports Eng.* 16(1):43–54.

KEYWORDS Olympic archery; shaft; recurve bow; ballistics

 andrian.kuch@univ-poitiers.fr

Effect of bow drawing technique on skilled archer postural stability: a case study

A. Kuch^{a,b,c}, J.-F. Debril^{c,d}, M. Domalain^{b,c},
R. Tisserand^{b,c} and T. Monnet^{b,c}

^aCRITT Sport Loisirs, Châtellerault, France; ^bInstitut Pprime, CNRS/Université de Poitiers/ISAE-ENSMA, Poitiers, France; ^cCAIPS, Poitiers, France; ^dCREPS de Poitiers, Poitiers, France

1. Introduction

At the Olympic games, archers use a recurve bow to shoot arrows at a 122 centimeters diameter target set 70 meters away. Postural stability and consistency are therefore determinant in the archer's performance.

A shot is generally decomposed in two main phases. The aiming phase, mostly static, is followed by the string release phase, which is much more dynamic. To optimize bow draw length consistency, a small metallic device called 'clicker' is mounted on the bow riser. When the clicker falls, the metallic sound emitted signals the correct draw length is reached. Then the archer releases the arrow with a reaction time latency.

Previous studies showed the importance of postural stability on archery performance (Keast and Elliott 1990), particularly during the last second preceding string release (Mason and Pelgrim 1986) and during the release (Tinazci 2011). Moreover limited postural sway (Simsek et al. 2019) and postural consistency across shootings (Stuart and Atha 1990) are crucial indicators of an archery performance.

Bow drawing action directly challenges the archer upper body stability, which is reflected in the ground reaction forces.

The current study aims to characterise the effects of different bow drawing techniques on the archer's postural stability.

2. Methods

One skilled archer participated. He was asked to shoot at a target set 12 meters away from him, with

each foot resting on each of two 6-axis force plates (Sensix, Poitiers, France). An ADXL354 analog accelerometer was mounted on the bow riser to monitor the clicker fall and the bowstring release. Both devices were synchronized and sampled at a 1000 Hz frequency. Analog signals from the force plates were filtered using a 3rd order Butterworth low-pass filter with a 6 Hz cutoff frequency (Spratford and Campbell 2017). The centre of pressure (COP) was computed in the anteroposterior (AP) and mediolateral (ML) directions. The ML direction was the shooting direction.

The archer shot 3 arrows using one of three different bow draw techniques for a total of 9 shots: upper-draw (preferred technique), lower-draw and direct draw.

Based on accelerometer data, two phases were identified (Figure 1): a pre-release phase (*i.e.* the one second period preceding Tclicker plus the reaction time) and a post-release phase (*i.e.* the 0.5 seconds period following Trelease). The reaction time to the clicker fall was computed as the difference between Trelease and Tclicker. \overline{COP}_{AP} and \overline{COP}_{ML} were defined as the mean position of the COP in AP and ML directions respectively. Several postural stability indicators were computed during the two phases (Prieto et al. 1996): the mean and RMS distance around the mean COP position, mean and maximum velocity of the COP, and the 95% confidence ellipse area of the COP path.

A Kruskal-Wallis test was performed on each postural parameter in both the pre-release and the post release phases to assess whether the postural stability indicators were different between the three drawing techniques. Reaction time duration was also compared between the three drawing techniques. A Wilcoxon-Mann-Whitney test was used as *post-hoc*. For all tests, given the low number of shots performed, a $p < 0.1$ was set for significance.

3. Results and discussion

All recorded shots hit the target centre, therefore performance was maximal. The average reaction time was 209 ± 105 ms but was significantly longer and more variable when using the direct draw (304 ± 149 ms) compared to both the upper (161 ± 34 ms) and lower draw techniques

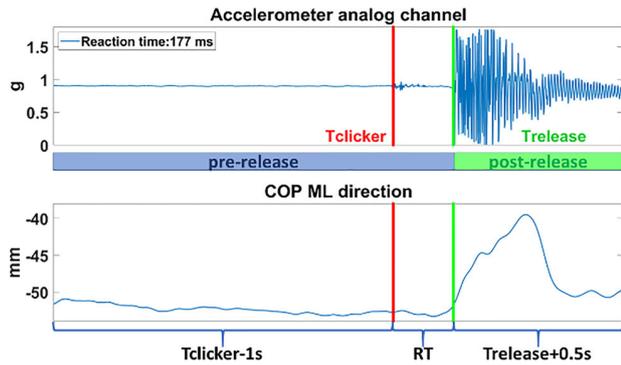


Figure 1. Top: events detection based on accelerometer data: pre-release phase before Trelease (vertical green line) and post-release phase after. Bottom: COP trajectory in the ML (shooting) direction.

(163 ± 22 ms). Upper and lower draw techniques reaction time were similar to elite archers performances (Spratford and Campbell 2017).

No statistical differences were observed in the post-release phase between the three drawing techniques in the postural stability indicators. Thus, only postural stability indicators computed in the pre-release phase were analysed and presented in Table 1.

During the pre-release phase, the mean distance, the RMS distance to the mean COP and the 95% ellipse area were all smaller than in regular quiet standing, but the mean velocity was higher (Prieto et al. 1996). Reducing postural sway amplitude while increasing COP velocity pre-release suggests that the archer increases his own stiffness to reduce postural oscillation and facilitate the aiming task. These results are comparable to elite archers postural sway amplitude (Simsek et al. 2019) and post-release sway ellipse area (Keast and Elliott 1990).

\overline{COP}_{AP} and RMS distance ML pre-release were the only parameters significantly reduced in the upper draw compared to the direct draw technique (both $p = 0.09$). Additionally, despite not significant, a reduction of the mean distance of the COP in the ML direction by a factor of 2 between the direct and the upper draw techniques (0.8 versus 0.4 on average) was noted. These results suggest that bow drawing technique mostly challenges postural stability in the shooting direction (ML) pre-release.

This case study, presents several limitations. For technical reasons, the target could not be set further away. Hence, it was not possible to correlate any of the postural indicators with shooting performance. The number of shots analysed is also very low which prevented the analysis for drawing consistency. Further experimentations including more archers and

Table 1. Indicators of pre-release postural stability, significant differences are presented in bold ($p < 0.1$).

	Upper	Pre-release Direct	Lower
COP_{AP} (mm)	61.7 ± 2.8	72.1 ± 6.3	72.7 ± 4.6
COP_{ML} (mm)	-50.0 ± 7.7	-49.4 ± 6.0	-48.0 ± 1.2
Mean dist (mm)	1.2 ± 0.7	1.5 ± 0.3	1.3 ± 0.5
Mean dist AP (mm)	0.9 ± 0.8	1.0 ± 0.4	1.1 ± 0.6
Mean dist ML (mm)	0.4 ± 0.2	0.8 ± 0.1	0.5 ± 0.2
RMS dist (mm)	1.4 ± 0.7	1.7 ± 0.4	1.5 ± 0.5
RMS dist AP (mm)	1.1 ± 0.8	1.3 ± 0.6	1.2 ± 0.7
RMS dist ML (mm)	0.6 ± 0.3	1.0 ± 0.1	0.6 ± 0.2
Mean v (mm/s)	9.2 ± 3.2	11.9 ± 3.0	9.6 ± 0.7
Mean v AP (mm/s)	6.1 ± 1.5	8.3 ± 3.0	6.8 ± 1.8
Mean v ML (mm/s)	5.8 ± 2.4	6.6 ± 0.7	5.5 ± 1.1
Max v (mm/s)	55.9 ± 25.1	39.1 ± 15.7	40.8 ± 15.9
Max v AP (mm/s)	15.8 ± 6.9	19.0 ± 4.0	15.5 ± 4.1
Max v ML (mm/s)	47.3 ± 34.3	31.7 ± 18.5	36.0 ± 16.3
95% area (mm ²)	10.5 ± 10.3	21.8 ± 9.7	10.9 ± 5.2

a higher number of shots are needed to better assess the effects of bow drawing techniques on postural stability and shooting performance.

4. Conclusions

The skilled archer tested increases postural stability to facilitate aiming prior to bowstring release. Bow drawing techniques have limited influence on pre-release postural stability, but differences are found only in the shooting direction. Since archers need to minimize the postural oscillation to increase shooting performance, the upper draw technique seems more appropriate for this archer than the direct draw.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

Funding

This work is supported by the French National Institute of Sport and Physical Education, the French Archery Federation, the French National Research Technology Association and the French Ministry of Sports.

References

- Keast D, Elliott B. 1990. Fine body movements and the cardiac cycle in archery. *J Sports Sci.* 8(3): 203–213.
- Mason BR, Pelgrim PP. 1986. Body stability and performance in archery. *EXCEL.* 3: 17–20.
- Prieto TE, Myklebust JB, Hoffmann RG, Lovett EG, Myklebust BM. 1996. Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Trans Biomed Eng.* 43(9): 956–966.
- Simsek D, Cerrah AO, Ertan H, Soylu AR. 2019. A comparison of the ground reaction forces of archers with

- different levels of expertise during the arrow shooting. *Sci Sports* 34(2): e137–e145.
- Spratford W, Campbell R. 2017. Postural stability, clicker reaction time and bow draw force predict performance in elite recurve archery. *Eur J Sport Sci.* 17(5): 539–545.
- Stuart J, Atha J. 1990. Postural consistency in skilled archers. *J Sports Sci.* 8(3): 223–234.
- Tinazzi C. 2011. Shooting dynamics in archery: a multidimensional analysis from drawing to releasing in male archers. *Proc Eng*, 13: 290–296.

KEYWORDS Archery; center of pressure; force plate; bow draw
 andrian.kuch@univ-poitiers.fr

A POSTURAL STRATEGY AT STRING RELEASE IN ELITE ARCHERS

Andrian KUCH (1,2), Romain TISSERAND (2), François DURAND (3), Tony MONNET (2)

1. CRITT Sport Loisirs, France ; 2. Institut Pprime, CNRS/Université de Poitiers/ISAE-ENSMA, France ; 3. CREPS de Poitiers, France

Introduction

Limiting motion around the string release instant is decisive for performance in archery [1]. Indeed, the string release changes the {archer + bow} system dynamics maintained during the aiming phase, to propel the arrow towards the target. Not taking these dynamics into account may compromise the archer's postural stability and consecutively reduce his/her performance. For efficient upright balance control associated with voluntarily initiated movements, humans integrate the consequences of the forces they will create into the motor command to ensure postural stability [2]. When the movement initiation instant is predictable, humans can time coordinated motor sequences, called Anticipatory Postural Adjustments (APA), to limit the mechanical consequences of the forthcoming movement on balance [3]. Particularly, the mechanical consequences of these muscles contractions can be observed through the displacement of the center of pressure (COP) that occurs *before* movement onset. Elite archers are likely to have mastered the mechanical perturbation consecutive to string release. Hence, we hypothesized that their APA would be finely coordinated with string release, to limit detrimental effects on postural stability and maximize performance.

Material and Methods

Standing on two force plates (Kistler) sampled at 1000 Hz, 6 French international level archers (3M, 3F) shot 18 arrows, at the 70m Olympic distance in an indoor range. The score of each arrow was collected.

A high-speed camera (Photron), synchronized with the force plates, captured each shot at 1000 fps, and was used to identify two instants: the clicker falling time (CFT) and the clicker reaction time (CRT). The CRT is the onset of the string release. The archers' reaction time was the duration between CFT and CRT.

Postural stability was characterized using the COP trajectory in the mediolateral (ML), i.e. the shooting, direction. On each trial, we observed a backward COP movement, starting after CFT (Fig. 1). The onset of the COP backward movement (t_0), its maximal backward amplitude (COP_A) and peak velocity (COP_v) were computed. If t_0 preceded CRT, an *early* postural strategy was identified, whereas if it occurred after CRT, a *late* postural strategy was identified. For comparison, COP trajectories were normalized by the archers' reaction time. Scores, COP_A and COP_v were compared between *early* and *late* strategies using a Welch's t-test, with $p < 0,05$ for significance.

Results and Discussion

The mean reaction time was 146 ± 11 ms after CFT, which is consistent with previous studies [4].

All archers used both strategies, but they mainly used the *early* one ($73 \pm 8\%$ of their shots). The average t_0 for the *early* strategy was 16 ± 23 ms after CFT, while it was 11 ± 14 ms after CRT for the *late* strategy. Such short duration between t_0 and CFT or CRT, alongside their low variability, suggest that elite level archers anticipate the forthcoming perturbation and are able to finely coordinate the display of their APA with these two specific instants during a shot.

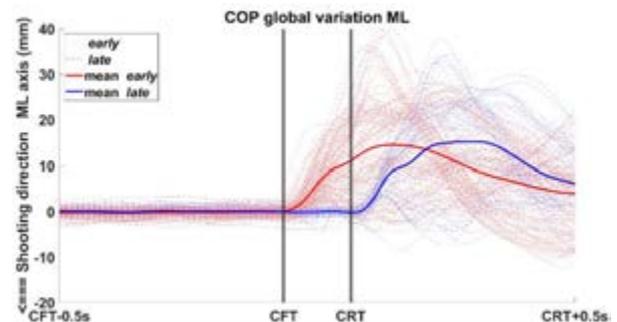


Figure 1: COP in the ML axis.

No statistical differences were found between the two strategies for COP_A and COP_v (Tab. 1). These results indicate that both strategies were identical from a biomechanical standpoint, but only displayed at two different moments in time. Additionally, despite slightly higher scores for the *early* shots, no performance difference was found between the two strategies. Thus, having a later APA does not seem to negatively affect scores in elite level archers.

	<i>early</i>	<i>late</i>	<i>p</i>
scores	$9,2 \pm 0,8$	$9,0 \pm 0,9$	0,17
COP_A (mm)	21 ± 7	20 ± 9	0,54
COP_v (mm/s)	205 ± 85	209 ± 92	0,60

Table 1: Compared indicators between strategies

Conclusion

Our findings suggest that elite level archers have automatized the perturbation caused by the string release and minimize its consequences on postural stability using a postural strategy finely coordinated with either the clicker falling time or the string release, with no differences in performance.

References

1. Keast et al, Journal of Sports Sciences, 8:3, 203-213, 1990
2. Massion, Progress in Neurobiology, 38, 35-56, 1992
3. Bouisset et al, J. Biomech, 20:8, 735-742, 1987
4. Tinazci et al, Procedia Engineering, 13:290-293, 2011.

Acknowledgements

This work is supported by the French National Institute of Sport and Physical Education, the French Archery Federation, the French National Research Technology Association and the French Ministry of Sports



Annexe B

Article scientifique

Soumis en septembre 2022 dans le Journal of Sports Sciences

Postural adjustments preceding string release in elite archers

A. Kuch, R. Tisserand, F. Durand, T. Monnet, J-F. Debril

Article soumis à la revue Journal of Sport Sciences

Postural adjustments preceding string release in trained archers

Authors: A. Kuch^{1,2}, R. Tisserand^{2,3}, F. Durand⁴, T. Monnet², J-F. Debril⁴

Affiliations:

¹CRITT Sport Loisirs, Châtelleraut, France

²Institut PPrime (UPR 3346), Université de Poitiers-ISAE-ENSMA, CNRS, Chasseneuil-du-Poitou, France

³Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage (UMR 7295), Université de Poitiers, Université de Tours, CNRS, Poitiers, France

⁴CAIPS-CREPS de Poitiers, Vouneuil-sous-Biard, France

Corresponding author:

Professor Tony Monnet

Institut PPRIME, Bâtiment H1 SP2MI,

11 Boulevard Pierre et Marie Curie, TSA 41123 - 86073 Poitiers Cedex 9, France

Email: tony.monnet@univ-poitiers.fr

Abstract

Optimal postural stability is required to perform in archery. Since the dynamic consequences of the string release may disturb the archer's postural equilibrium, they should have integrated them in their motor program to optimize postural stability. This study aimed to characterize the postural strategy archers use to limit the potentially detrimental impact of the bow release on their postural stability and identify characteristics that may explain a better performance. Six elite and seven sub-elite archers performed a series of 18 shots at 70 meters, standing on two force plates. Postural stability indicators were computed during the aiming and the shooting phase using the trajectory of the center of pressure. Two postural strategies were defined, as whether they were triggered before (early) or after (late) the string release time. Both groups used anticipated postural adjustments, but elite archers triggered them before the string release more often and sooner. Scores differed between the two groups, but no differences were found between early and late shots. Trained archers seem to have finely integrated the dynamic consequences of their bow motion, triggering anticipated postural adjustments prior to the string release. However, it remains unclear whether this anticipation can positively influence the performance outcome.

Annexe C

Figures

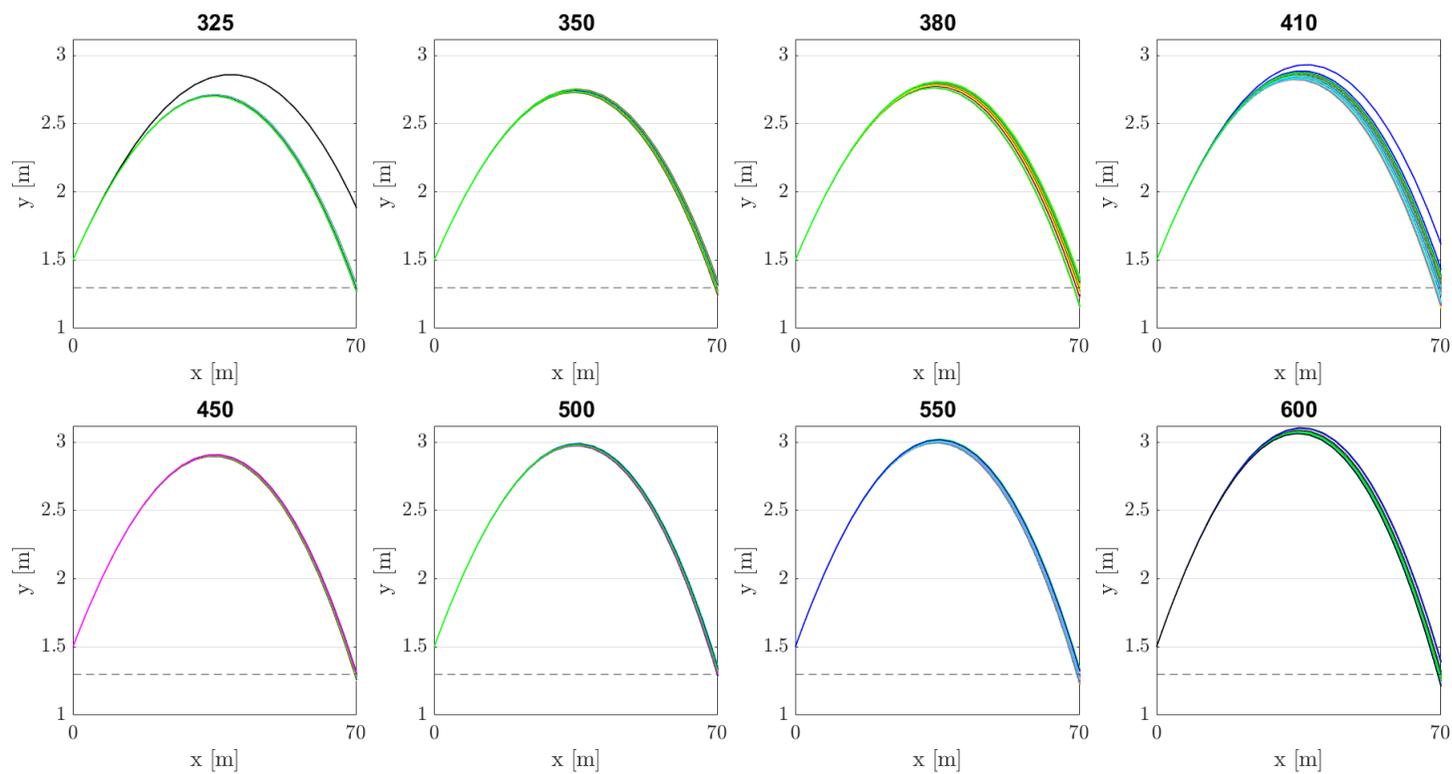


FIGURE C.1 – Simulation des trajectoires par catégorie de spine. La ligne pointillée indique le centre de la cible situé à 1,3 mètre de hauteur

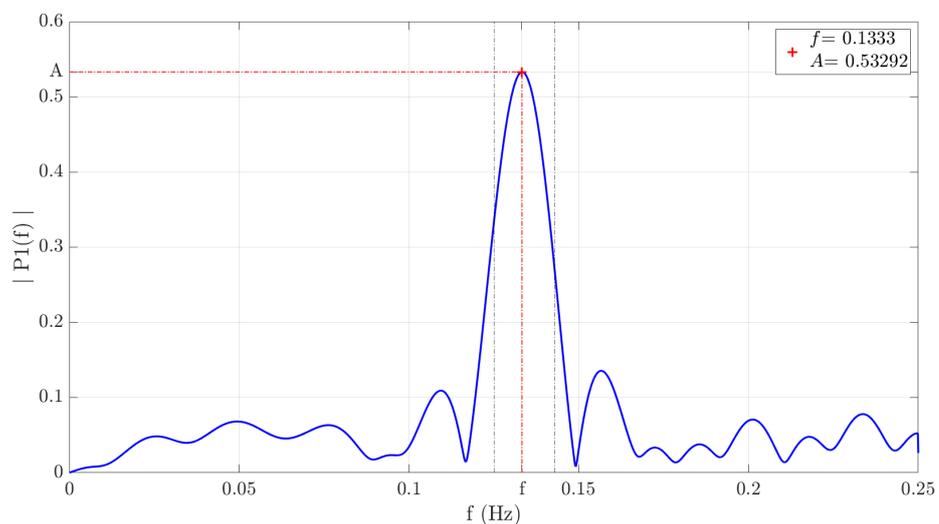


FIGURE C.2 – Densité spectrale de puissance, f correspond à l'abscisse du pic et A à son ordonnée. Les bornes de recherche sont matérialisées par les pointillés noirs

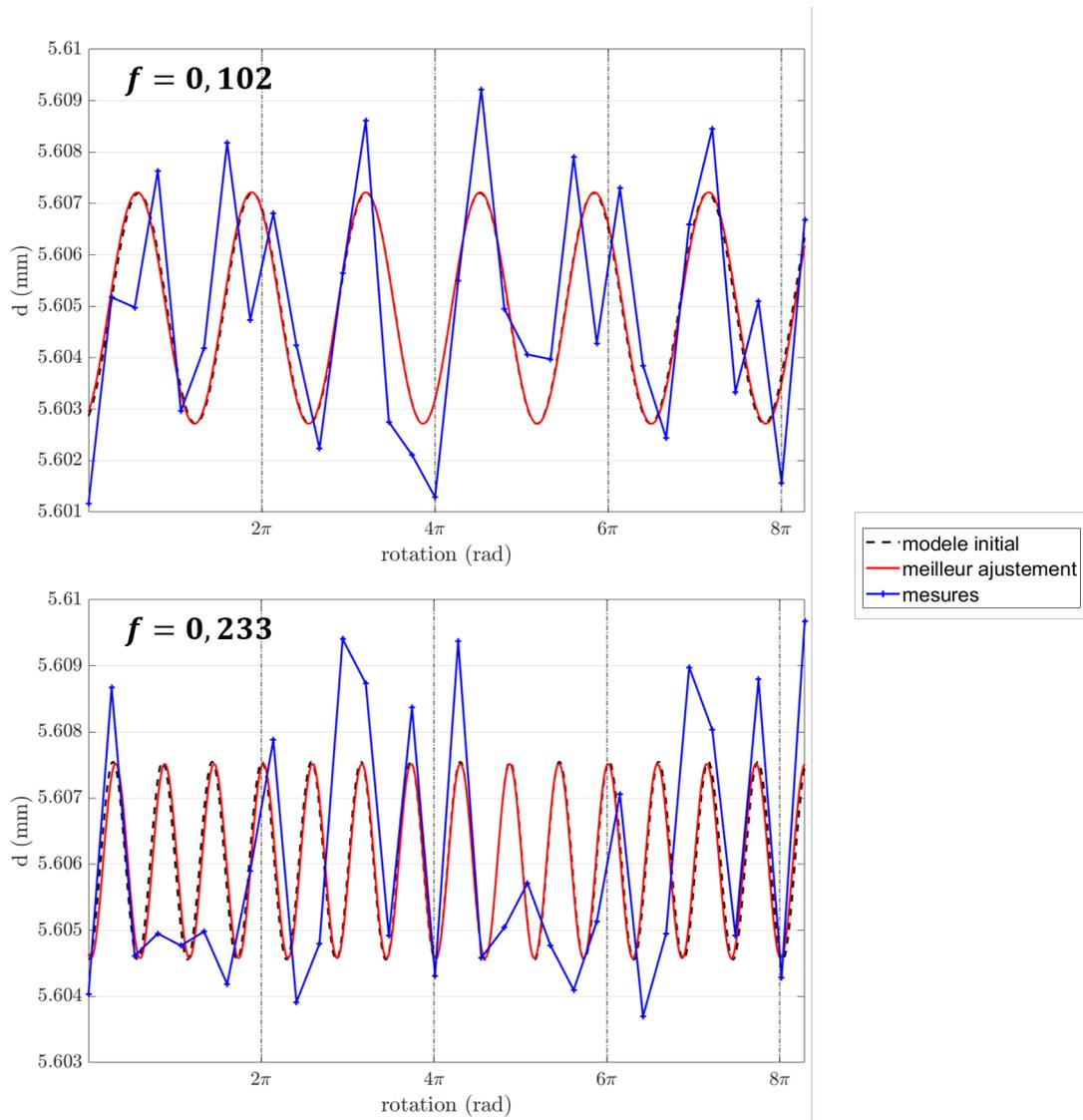


FIGURE C.3 – Détection des paramètres sinusoïdaux du diamètre, pas assez robuste sur la fréquence pour caractériser l'ensemble des futs

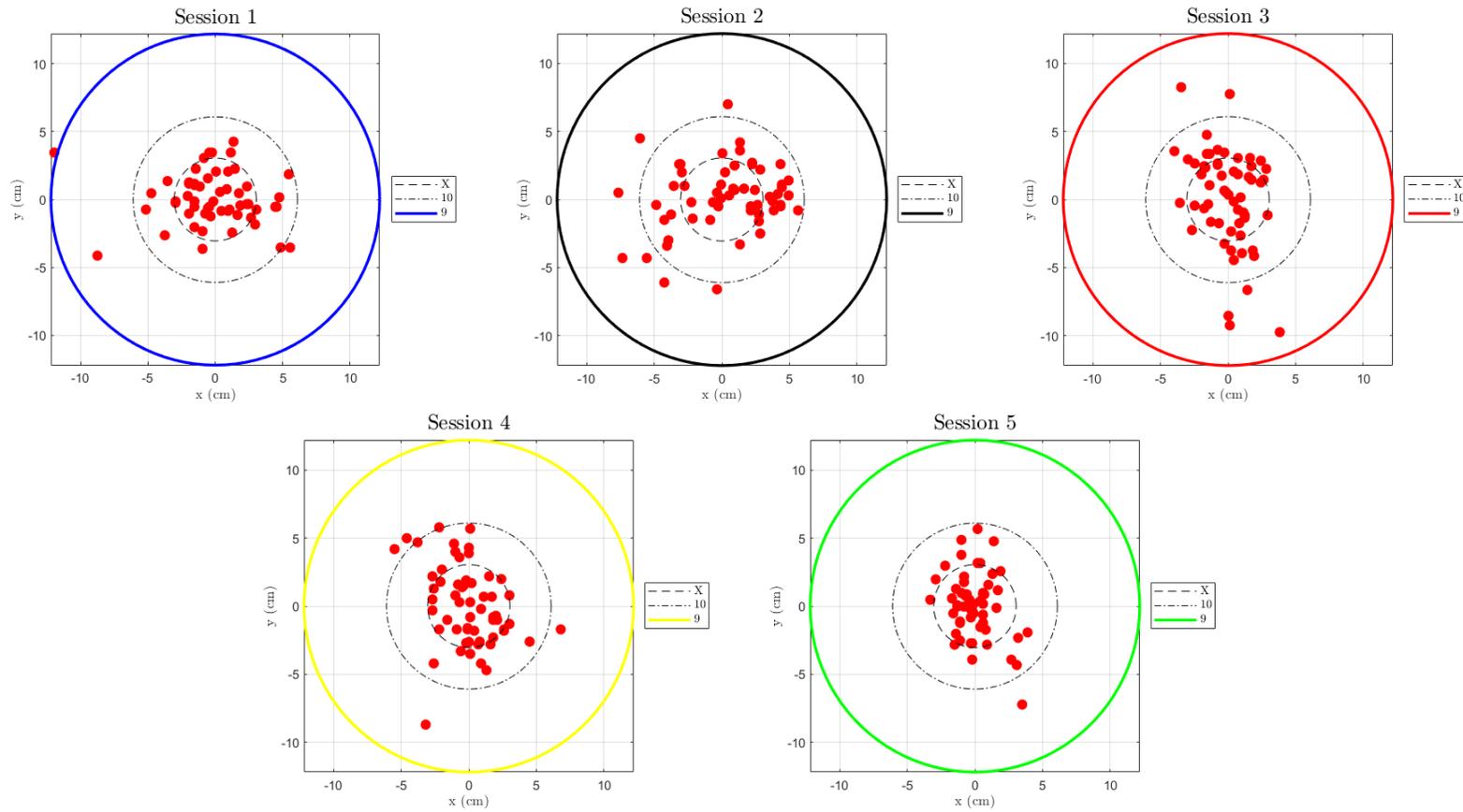


FIGURE C.4 – Localisation des flèches en cible pour l'ensemble des sessions de tirs réalisés. Les cercles représentent du plus petit au plus grand la zone du « X », du « 10 » et du « 9 » respectivement.

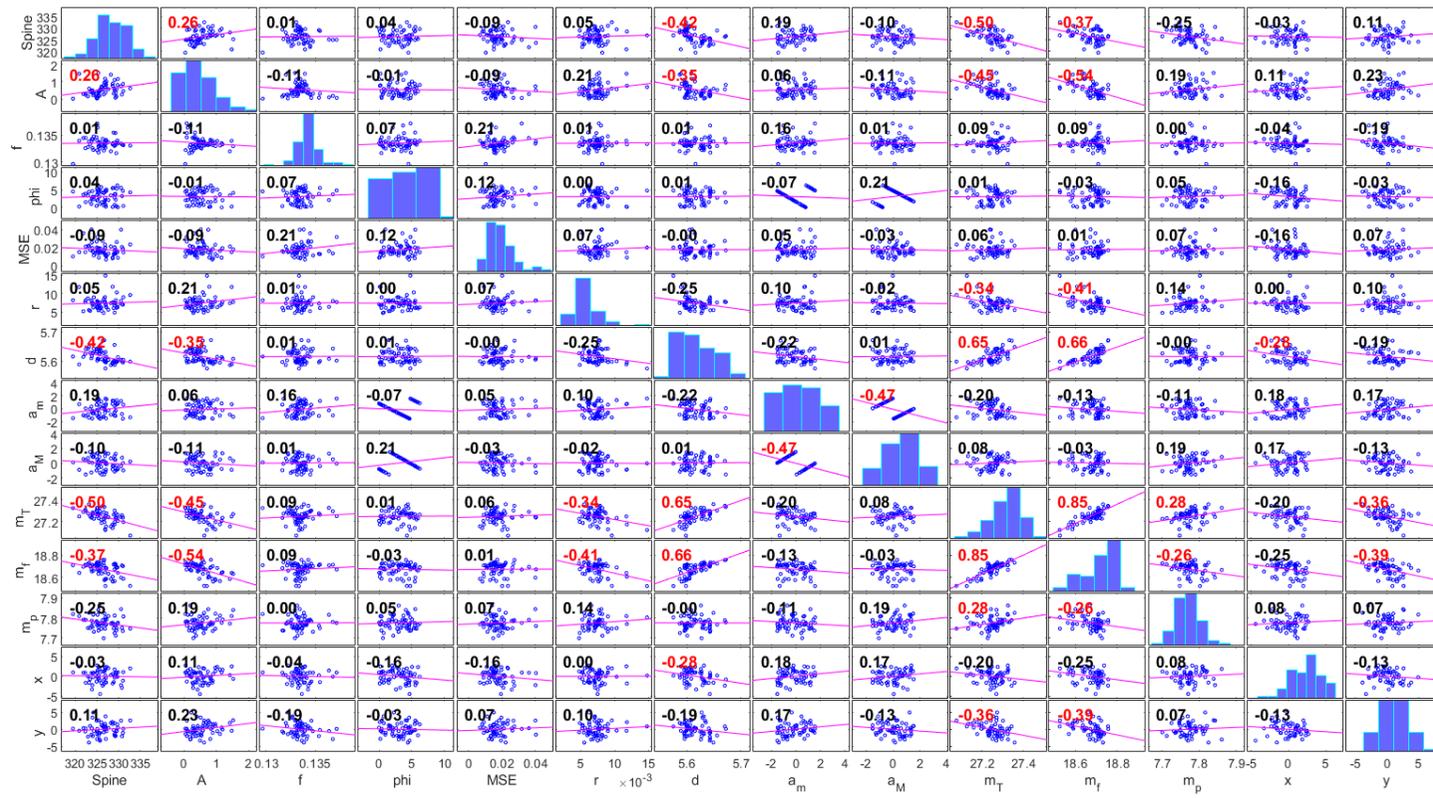


FIGURE C.5 – Corrélations par paires de paramètres. Sur la diagonale, la distribution des paramètres. En rouge les coefficients où $p < 0,05$.

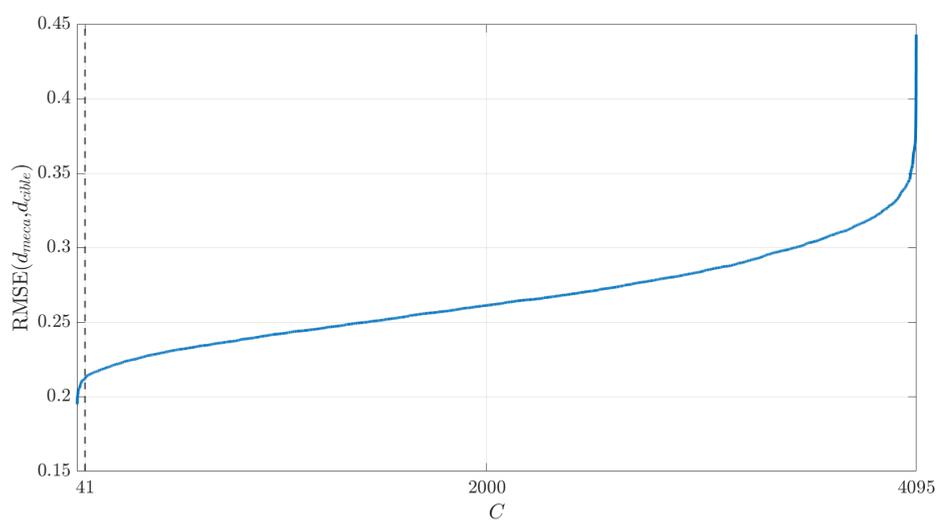


FIGURE C.6 – RMSE entre distance m\acute{e}canique et distance en cible pour toutes les combinaisons, par ordre croissant. La barre verticale correspond au seuil repr\^esentant 1% meilleures combinaisons.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Mesure	Spine (mil)	A (mil)	f (Hz)	d (mm)	r (mm)	m fut (g)	Num	Propriétaire	Tri archer	m montée (g)
03/04/2021 18:49	546,9	0,5	0,064	5,085	0,005	14,60	50	BARBELIN Lisa	1	21,99
04/04/2021 18:54	544,5	0,3	0,075	5,083	0,002	14,61	51	BARBELIN Lisa	1	21,99
04/04/2021 18:57	544,4	0,9	0,068	5,083	0,001	14,63	52	BARBELIN Lisa	2	21,99
04/04/2021 19:00	552,9	0,8	0,069	5,069	0,003	14,61	53	BARBELIN Lisa	1	21,98
04/04/2021 19:03	554,6	0,3	0,089	5,071	0,006	14,60	54	BARBELIN Lisa	1	21,97
04/04/2021 19:06	544,1	0,4	0,066	5,083	0,002	14,60	55	BARBELIN Lisa	1	21,99
04/04/2021 19:09	549,6	0,7	0,070	5,077	0,002	14,65	56	BARBELIN Lisa	2	22,00
04/04/2021 19:12	548,0	0,3	0,068	5,084	0,005	14,61	57	BARBELIN Lisa	1	21,98
04/04/2021 19:15	551,7	0,3	0,062	5,088	0,004	14,67	58	BARBELIN Lisa	1	22,03
04/04/2021 19:22	552,3	0,9	0,065	5,074	0,003	14,61	60	BARBELIN Lisa	1	21,99
04/04/2021 20:49	548,6	1,2	0,067	5,086	0,005	14,75	61	BARBELIN Lisa	3	22,11
04/04/2021 20:52	549,4	1,5	0,060	5,090	0,006	14,71	62	BARBELIN Lisa	1	22,07
04/04/2021 20:54	547,8	1,5	0,070	5,100	0,011	14,73	63	BARBELIN Lisa	2	22,07
04/04/2021 20:57	550,7	0,8	0,070	5,096	0,012	14,71	64	BARBELIN Lisa	2	22,07
04/04/2021 21:01	549,5	0,7	0,067	5,087	0,005	14,71	65	BARBELIN Lisa	3	22,07
04/04/2021 21:03	551,0	0,5	0,068	5,112	0,009	14,74	66	BARBELIN Lisa	1	22,09
04/04/2021 21:06	550,2	0,6	0,075	5,095	0,002	14,72	67	BARBELIN Lisa	1	22,07
04/04/2021 21:09	549,4	1,3	0,067	5,099	0,003	14,76	68	BARBELIN Lisa	3	22,08
04/04/2021 21:12	548,2	1,2	0,065	5,098	0,012	14,71	69	BARBELIN Lisa	3	22,06
04/04/2021 21:15	548,4	1,2	0,065	5,081	0,012	14,68	70	BARBELIN Lisa	1	22,03
04/04/2021 21:18	550,2	0,8	0,064	5,100	0,01	14,74	71	BARBELIN Lisa	2	22,09
04/04/2021 21:20	548,8	1,0	0,069	5,110	0,012	14,74	72	BARBELIN Lisa	2	22,09
04/04/2021 21:37	547,5	1,1	0,065	5,085	0,005	14,59	78	BARBELIN Lisa	1	21,99
04/04/2021 21:55	545,4	0,5	0,071	5,083	0,003	14,60	84	BARBELIN Lisa	3	21,99
28/03/2021 21:49	547,1	0,5	0,064	5,062	0,034	14,49	1			
28/03/2021 21:52	547,9	1,1	0,071	5,058	0,002	14,52	2			
28/03/2021 21:55	548,0	0,6	0,067	5,066	0,008	14,50	3			
28/03/2021 21:58	545,0	2,9	0,068	5,067	0,004	14,54	4			
28/03/2021 22:01	546,4	0,7	0,069	5,064	0,003	14,54	5			
28/03/2021 22:05	549,2	1,8	0,069	5,069	0,007	14,53	6			
28/03/2021 22:08	545,2	0,6	0,067	5,077	0,008	14,54	7			

FIGURE C.7 – Tableau de tri envoyé aux entraîneurs (colonne A à H), puis remplis par leur soin (colonne I à K)

