UNIVERSITÉ DE LORRAINE | BIBLIOTHÈQUES UNIVERSITAIRES

AVERTISSEMENT
DROIT D'AUTEUR

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document. Toute contrefaçon, plagiat ou reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

UNIVERSITÉ DE LORRAINE
34 COURS LÉOPOLD — CS 25233
54052 NANCY CEDEX
WWW.UNIV-LORRAINE.FR

Ecole Doctorale BioSE
Laboratoire UR 3450 DevAH

Ecole Doctorale BioSE (Biologie-Santé-Environnement)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE l'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

par **Raphaël JACQUOT**

Sous la direction de M. GAUCHARD Gérôme et M. JEHL Jean-Philippe

Analyse multidimensionnelle de la performance en tir à l'arc

Le 5 février 2026

Membres du jury :

Direction de thèse :	**M. Gérôme GAUCHARD**	**Professeur des Universités, UR 3450 DevAH, Université de Lorraine, Nancy**
	M. Jean-Philippe JEHL	**Maître de Conférences des Universités, UMR 7198 IJL, Université de Lorraine, Nancy**
Rapporteurs :	**M. Nicolas PEYROT**	**Professeur des Universités, Laboratoire MIP (EA4334), Le Mans**
	Mme. Caroline NICOL	**Professeure des Universités, ISM UMR CNRS 7287, Aix-Marseille Université, Marseille**
Examinateurs :	**Mme. Ahlem ARFAOUI**	**Maître de Conférences des Universités, EA 7507 PSMS, Université de Reims Champagne-Ardenne**
	Mme. Halima KERDJOUDJ	**Professeure des Universités, Bios, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims**
Présidente :	**Mme. Frédérique HINTZY**	**Professeure des Universités, Laboratoire LIBM, Université Savoie Mont Blanc, Chambéry**

UR 3450 Développement, Adaptation, Handicap (DevAH). Bâtiment C – 1er étage. 9 Avenue de la Forêt de Haye. 54505 VANDOEUVRE-LES-NANCY

Résumé

La performance en tir à l'arc est décrite comme un geste multifactoriel, reposant sur des piliers fondamentaux tels que l'organisation musculaire, la stabilité posturale, la configuration cinématique et les stratégies temporelles. La régularité de la mise en œuvre de ces paramètres entre les tirs est également un prédicteur important de la performance. Toutefois, l'analyse isolée des facteurs limite la portée des conclusions et empêche d'obtenir une vision globale de la performance. En se focalisant sur la distinction entre expert et novice, peu d'études ont analysé les variations de performance intra-individuelles chez l'archer élite. Le principe d'individualisation, suggérant que des performances similaires peuvent résulter de stratégies motrices différentes, reste ainsi inexploré. Ce travail de thèse s'articule donc autour de deux axes. La première étude vise à identifier les déterminants de l'expertise en comparant archers élites et intermédiaires. Grâce à une approche mesurant simultanément l'activité neuromusculaire, le contrôle postural, la cinématique et les stratégies temporelles, nous avons identifié les paramètres différenciant les archers intermédiaires des archers élites et évalué leur variabilité inter-tirs. Les résultats montrent que les archers élites se distinguent par une meilleure efficience neuromusculaire, une plus grande stabilité posturale, un temps de visée plus court et une variabilité inter-tirs réduite, ce qui améliore la régularité du geste et des performances. La seconde étude vise à dépasser la comparaison inter-groupes en combinant analyses intra-sujet et de groupe, afin de distinguer, au sein de l'élite, les stratégies communes de celles relevant de l'optimisation individuelle. Les résultats révèlent que les meilleurs scores reposent sur une activation musculaire spécifique, une stabilité accrue et une réaction rapide au clicker, mais que les stratégies optimales diffèrent fortement d'un archer à l'autre. Ainsi, les résultats de ce travail de thèse indiquent que la progression vers l'élite apparaît fondée sur l'efficience, la stabilité et la régularité, tandis qu'au sein de l'élite la performance dépend d'une optimisation individualisée. L'expertise se définit ainsi comme l'alliance entre reproductibilité du geste et stratégie personnelle, ce qui justifie le recours à des outils d'analyse individualisés pour mieux modéliser la performance.

Abstract

Archery performance is described as a multifactorial skill that relies on fundamental pillars such as muscular organization, postural stability, kinematic configuration, and temporal strategies. The consistency with which these parameters are applied from one shot to the next is also an important predictor of performance. However, analyzing these factors in isolation limits the scope of conclusions and prevents a comprehensive understanding of performance. Focusing primarily on the distinction between experts and novices, few studies have examined intra-individual variations in performance among elite archers. The principle of individualization, which suggests that similar levels of performance can result from different motor strategies, therefore remains largely unexplored. This doctoral work is structured around two main areas. The first study aims to identify the determinants of expertise by comparing elite archers and intermediate-level archers. Using an approach that simultaneously measures neuromuscular activity, postural control, kinematics, and temporal strategies, we identified the parameters that differentiate intermediate archers from elite archers and assessed their variability between shots. The results show that elite archers exhibit greater neuromuscular efficiency, increased postural stability, shorter aiming times, and reduced inter-shot variability, all of which improve movement consistency and overall performance. The second study aims to go beyond intergroup comparisons by combining intra-subject and group analyses in order to distinguish, within the elite, between common strategies and those related to individual optimization. The results reveal that the best scores are based on specific muscle activation, increased stability, and rapid reaction to the clicker, but that optimal strategies differ greatly from one archer to another. Thus, the results of this thesis indicate that progression to the elite level appears to be based on efficiency, stability, and consistency, while within the elite, performance depends on individualized optimization. Expertise is thus defined as the combination of reproducibility of movement and personal strategy, which justifies the use of individualized analysis tools to better model performance.

Remerciements

Je souhaite avant tout exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse, Pr Gérôme GAUCHARD et Dr Jean-Philippe JEHL. Ce projet n'aurait pu aboutir sans votre soutien déterminant et la confiance que vous m'avez témoignée. Votre encadrement, à la fois scientifique, administratif et humain, a été très important pour moi et je vous en suis reconnaissant.

J'adresse mes plus vifs remerciements aux membres du jury pour avoir accepté de participer à l'évaluation et au jury de cette thèse. Je suis extrêmement reconnaissant envers le Dr Ahlem ARFAOUI et le Pr Nicolas PEYROT d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce manuscrit. Vos retours avisés seront précieux pour la qualité finale de ce manuscrit, que j'espère à la hauteur de vos attentes. Merci également au Pr Caroline NICOL et au Pr Frédérique HINTZY d'examiner cette thèse. Je suis convaincu que votre expertise permettra d'enrichir ce travail et d'ouvrir de nouvelles perspectives de réflexion.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux membres de mon comité de suivi individuel, Pr Frédérique HINTZY et Pr Thierry BASTOGNE. Votre expertise, associée à une bienveillance constante, a constitué un guide précieux tout au long de mes recherches. Vos conseils avisés m'ont permis d'anticiper et de surmonter de nombreux obstacles.

Je souhaite également remercier le plus sincèrement possible Dr Khaireddine BEN MANSOUR et Dr Kévin BOUILLET d'avoir accepté de rejoindre cette aventure en cours de route. Votre accompagnement précieux a été, sans nul doute, déterminant dans l'accomplissement de ce travail. Khaireddine, la richesse de nos échanges a su clarifier la direction de mes recherches dans les moments d'incertitude. Kévin, tes relectures minutieuses et la bienveillance de tes conseils furent d'une aide précieuse pour mener à bien ce travail. Ta bonne humeur communicative a rythmé nos journées de travail d'une ambiance chaleureuse, et a été essentielle pour entretenir ma motivation au fil des jours, surtout dans les moments difficiles.

Ces travaux ont pu être réalisés grâce aux financements des projets CARE Grand-Est (FEDER FSE-IEJ Lorraine et Massif des Vosges 2014–2020), CROIRE (FEDER FSE-FTJ Lorraine et Massif des Vosges 2021–2027), et DREAM (FEDER FSE-FTJ Lorraine et Massif des Vosges 2021–2027). Je remercie également le laboratoire 3450 DevAH ainsi que l'ensemble de ses membres pour les échanges scientifiques stimulants, ainsi que pour le soutien financier ayant permis la valorisation de mes recherches en congrès. Je remercie également le programme ORION et à ses responsables Laurence HUNG et Mounir TAREK, pour l'opportunité d'évoluer en tant que doctorant-manager au sein du Club CARE, une expérience humaine et professionnelle enrichissante.

Je souhaite exprimer ma vive reconnaissance à toutes les personnes ayant rendu possible la réalisation de ces travaux. Je pense d'abord aux collègues qui m'ont aidé à la mise en œuvre de ce protocole expérimental, avec une mention particulière pour Eryne. J'adresse un remerciement appuyé aux volontaires qui ont accepté de participer aux mesures. J'adresse mes sincères remerciements aux membres du Pôle France Relève du CREPS de Nancy et à son entraîneur, Gilles TOPANDE MAKOMBO, pour nos échanges enrichissants qui ont nourri mon intérêt pour cette discipline. Je remercie également le Comité Départemental de Tir à l'Arc de Meurthe-et-Moselle, notamment Caroline IMBERT et Chloé APPREDERISSE, pour leur aide précieuse dans le recrutement des volontaires et leur soutien logistique. Merci également à Alain KLINTZ et à la 1ère Compagnie d'Arc du Toulois pour leur accueil chaleureux et leur disponibilité lors des expérimentations.

Je remercie également l'ensemble des personnes que j'ai pu croiser ou avec qui j'ai partagé des moments à Care. Ces années de thèse auraient été bien moins sympathiques sans nos multiples conversations et activités. Évidemment, un remerciement tout particulier va vers Nico, Théo et Kévin, pour ces nombreux moments de rigolade qui auront rendu ces années beaucoup plus joyeuses. Nico, avancer en même temps que toi m'a souvent sauvé la mise face aux galères administratives et aux délais serrés. Merci pour ton entraide, mais surtout pour l'exemple de rigueur et de sérieux que tu as été pour moi tout au long de cette thèse. Théo, ta contribution à ce travail est double et paradoxale : merci pour la grande aide que tu m'as fourni dans des domaines que je ne maitrise pas, mais aussi pour les distractions qui ont mis ma concentration à rude épreuve ! Quoi qu'il en soit, tu as toujours été disponible quand j'en avais besoin, et je t'en remercie sincèrement.

Je tiens également à remercier mes amis proches qui m'ont accompagné tout au long de ces années de thèse. Merci pour votre soutien indéfectible, mais aussi pour votre patience lorsque mon caractère prenait le dessus dans les périodes les plus compliquées.

Merci à ma famille pour leur présence et leur soutien, et aussi pour ces moments de vie précieux qui m'ont permis de m'évader du travail. Un immense merci aux relecteurs de ce manuscrit pour le temps précieux que vous y avez consacré : mon papa, ma maman et Juliette. J'ai aussi bien évidemment une pensée particulière pour les nageurs côtoyés durant ces trois ans.

Merci à toi Marie, d'être toi, merci pour ton soutien absolu, et ta capacité à apaiser ma personnalité pour n'en faire ressortir que le meilleur.

Liste des abréviations :

APA : Ajustement Posturaux Anticipatoires

CdP : Centre De Pression

DM : Deltoïde Moyen

DP : Deltoïde Postérieur

ED : Extenseur des Doigts

EMG : Electromyographie

FDS : Fléchisseur Superficiel des Doigts

MF : Multifides

MVC : Contraction Volontaire Maximale (Maximal Voluntary Contraction en anglais)

OE : Oblique Externe

SNC : Système Nerveux Central

TA : Transverse de l'Abdomen

TM : Trapèze Moyen

TRC : Temps de Réaction au Clicker

TS : Trapèze Supérieur

Liste des figures :

Figure 1 : Schéma et description d'un arc olympique (https://www.jessica-emmett.com/blog/archery-beginners-recurve-diagrams/) 3

Figure 2 : Déroulement d'une séquence de tir à l'arc (Callaway et al., 2017) 5

Figure 3 : Position de l'archer durant la phase de visée (Image générée par Gemini) 7

Figure 4 : Schéma des articulations de l'épaule (https://clemedicine.com/5-anatomie-fonctionnelle-de-lepaule/) 10

Figure 5 : Différents mouvements de la scapula (Saini et al., 2020) 11

Figure 6 : Schéma des forces appliquées sur la corde et sur l'arc (adapté de Axford (1995)) 12

Figure 7 : Représentation des paramètres de performance au tir à l'arc 13

Figure 8 : Vue postérieure des trois faisceaux du trapèze : supérieur, médian, inférieur (BodyParts3D, sous licence CC BY-SA 2.1 jp) 14

Figure 9 : Vue latérale des trois faisceaux du deltoïde : postérieur, médian et antérieur (BodyParts3D, sous licence CC BY-SA 2.1 jp) 16

Figure 10 : Muscle extenseur commun des doigts (domaine public) 17

Figure 11 : Muscle fléchisseur superficiel des doigts (domaine public) 17

Figure 12 : Coupe transversale des muscles de l'abdomen https://musculoskeletalkey.com/anatomy-and-mechanics-of-the-abdominal-muscles/ 19

Figure 13 : Activation du muscle extensor digitorum chez trois groupes de niveau différents (Ertan et al., 2003) 21

Figure 14 : Graphiques de l'enveloppe EMG normalisée en fonction du temps pour un athlète d'élite (A), un débutant (B) et un non-archer (C) (Soylu et al., 2006) 36

Figure 15 : Schéma du placement des électrodes electromyographiques, des centrales inertielles, et de la ceinture thoracique 44

Figure 16 : Archer sur la plateforme de force durant une mesure 46

Figure 17 : Valeurs de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de visée pour les muscles du bras de corde (ED : extenseur des doigts, FSD : fléchisseur superficiel des doigts, DM : deltoïde médian, DP : deltoïde postérieur, TS : trapèze supérieur, TM : trapèze moyen) * $p<0.05$, ** $p<0,01$, *** $p<0,001$ 49

Figure 18 : Valeurs de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de visée pour les muscles du bras d'arc (ED : extenseur des doigts, FSD : fléchisseur superficiel des doigts, DM : deltoïde médian) * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001 49

Figure 19 : Valeurs de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de visée pour les muscles du tronc (MF_a : multifides côté arc, MF_c : multifides côté corde, OE_a : Oblique externe côté arc, OE_c : oblique externe côté corde, OI-TA : Oblique interne et transverse de l'abdomen) * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001 50

Figure 20 : Valeurs de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de suivi pour les muscles du bras de corde (ED : extenseur des doigts, FSD : fléchisseur superficiel des doigts, DM : deltoïde médian, DP : deltoïde postérieur, TS : trapèze supérieur, TM : trapèze moyen) * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001 51

Figure 21 : Valeurs de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de suivi pour les muscles du bras d'arc (ED : extenseur des doigts, FSD : fléchisseur superficiel des doigts, DM : deltoïde médian) * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001 51

Figure 22 : Valeurs de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de visée pour muscles du tronc (MF_a : multifides côté arc, MF_c : multifides côté corde, OE_a : Oblique externe côté arc, OE_c : oblique externe côté corde, OI-TA : Oblique interne et transverse de l'abdomen) * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001 52

Figure 23 : Valeurs des variables du contrôle postural en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de visée (Sur : surface totale du déplacement du CdP, Amp X : amplitude du déplacement du CdP sur l'axe antéro-postérieur, amp Y : amplitude du déplacement du CdP sur l'axe médio-latéral, Vit : vitesse globale du déplacement du CdP, Vit X : vitesse globale du déplacement du CdP sur l'axe antéro-postérieur, Vit Y : vitesse du déplacement du CdP sur l'axe médio-latéral, Vit Max : vitesse maximale de déplacement du centre de pression). *p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001 53

Figure 24 : Valeurs des variables du contrôle postural en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de suivi (Sur : surface totale du déplacement du CdP, Amp X : amplitude du déplacement du CdP sur l'axe antéro-postérieur, amp Y : amplitude du déplacement du CdP sur l'axe médio-latéral, Vit : vitesse globale du

déplacement du CdP, Vit X : vitesse globale du déplacement du CdP sur l'axe antéro-postérieur, Vit Y : vitesse du déplacement du CdP sur l'axe médio-latéral, Vit Max : vitesse maximale de déplacement du centre de pression). *p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001 54

Figure 25 : Valeur de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau de score (gris clair : faible ; gris intermédiaire : moyen ; gris foncé : élevé) durant la phase de visée : (a) muscles du bras de corde (ED : extenseur des doigts, FSD : fléchisseur superficiel des doigts, DP : deltoïde postérieur, TM : trapèze moyen), (b) muscles du bras d'arc (ED : extenseur des doigts, FSD : fléchisseur superficiel des doigts), (c) muscles du tronc (MF-c = multifide côté bras de corde). * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001 75

Figure 26 : Valeur de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau de score (gris clair : faible ; gris intermédiaire : moyen ; gris foncé : élevé) durant la phase de suivi : (a) muscles du bras d'arc (ED : extenseur des doigts, FDS : fléchisseur superficiel des doigts), et (b) muscles du tronc (EO-d : oblique externe côté corde, TA : transverse de l'abdomen). * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001 76

Figure 27 : Variables de contrôle postural en fonction du niveau de score (gris clair : faible ; gris intermédiaire : moyen ; gris foncé : élevé) durant la phase de visée (V : vitesse du CdP, Vx et Vy : vitesse du CdP le long de l'axe antéro-postérieur et médiolatéral). * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001 77

Figure 28 : Variables de contrôle postural en fonction du niveau de score (gris clair : faible ; gris intermédiaire : moyen ; gris foncé : élevé) durant la phase de suivi : (a) déplacement du CdP le long des axes antéro-postérieur (Rx) et médiolatéral (Ry) ; (b) vitesse maximale du CdP. * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001 78

Figure 29 : Variables temporelles (TRC : temps de réaction au clicker) en fonction des différents niveaux de score (gris clair : faible ; gris intermédiaire : moyen ; gris foncé : élevé) durant la phase de visée. * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001 79

Liste des tableaux :

Tableau 1: Liste des variables mesurées 73

Tableau 2 : Nombre de flèches pour chaque catégorie de score, pour chaque archer. A1 à A8 représentent l'archer 1 à l'archer 8. 74

Tableau 3 : Valeurs d'activité neuromusculaire [Médiane (IQR)], en fonction du niveau de score pour chaque archer (FDS : fléchisseur superficiel des doigts, MD : deltoïde moyen, PD : deltoïde postérieur, UT : trapèze supérieur, MT : trapèze moyen, MF : multifide, EO : oblique externe, -d : côté corde, -b : côté arc). § : Différence significative par rapport aux scores faibles, † : Différence significative par rapport aux scores moyens, * : Différence significative par rapport aux scores élevés, ε^2 : taille d'effet. 81

Tableau 4 : Valeurs des paramètres de contrôle postural [Médiane (IQR)], en fonction du niveau de score pour chaque archer (S : surface, Rx et Ry : amplitude de déplacement du CdP sur l'axe X et l'axe Y, V, Vx, Vy et Vmax : vitesse moyenne de déplacement du CdP globale, sur l'axe X, et sur l'axe Y, et vitesse maximale de déplacement du CdP). § : Différence significative par rapport aux scores faibles, † : Différence significative par rapport aux scores moyens, * : Différence significative par rapport aux scores élevés, ε^2 : taille d'effet. 82

Tableau 5 : Durée de la visée [Médiane (IQR)], en fonction du niveau de score pour chaque archer (temps de visée : durée de la phase de visée). § : Différence significative par rapport aux scores faibles, † : Différence significative par rapport aux scores moyens, * : Différence significative par rapport aux scores élevés, ε^2 : taille d'effet. 83

Table des matières

Résumé I
Abstract II
Remerciements III
Liste des abréviations : V
Liste des figures VI
Liste des tableaux IX
Table des matières X

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1 : ETAT DE LA LITTERATURE 5

1. Description du mouvement de tir à l'arc 5
1.1. Chronologie 6
1.1.1. Généralités 6
1.1.2. La phase de visée 7
1.1.3. La phase de suivi 8
1.2. Description fonctionnelle 9
1.2.1. Anatomie du complexe articulaire de l'épaule 9
1.2.2. Bras de corde 10
1.2.3. Bras d'arc 11
2. La performance en tir à l'arc 12
2.1. Les groupes musculaires moteurs et stabilisateurs 13
2.1.1. Phase de visée 13
2.1.1.1. Muscles du bras de corde 13
2.1.1.2. Muscles du bras d'arc 18
2.1.1.3. Muscles du tronc 19
2.1.2. Phase de suivi 20
2.1.2.1. Bras de corde 20
2.1.2.2. Bras d'arc 21
2.1.2.3. Muscles du tronc 22
2.2. Le contrôle postural 22
2.2.1. Fondements et mécanismes de régulation 22
2.2.2. Le contrôle postural en tir à l'arc 24
2.2.2.1. Phase de visée 24
2.2.2.2. Phase de suivi 25
2.3. L'organisation segmentaire 26
2.4. Les stratégies temporelles 26
2.4.1. Le temps de réaction au clicker 26
2.4.2. La durée de la phase de visée 28
2.5. Les paramètres physiologiques et psychologiques 28
2.5.1. Les paramètres physiologiques 28
2.5.2. Les facteurs psychologiques 29
2.6. Conclusion 29
3. Les méthodologies d'analyse de la performance en tir à l'arc 30

3.1. L'évaluation des différentes dimensions de la performance 30
3.1.1. Les études uni-dimensionnelles 30
3.1.2. Les études multidimensionnelles 30
3.2. Modalités d'évaluation de la performance 32
3.2.1. La comparaison de groupes de différents niveaux 32
3.2.2. L'analyse d'un seul niveau de population 33
3.3. Les indicateurs de la performance 34
3.3.1. La valeur moyenne 34
3.3.2. Le critère de variabilité 35
3.4. L'individualisation 37
3.5. Les différences de protocoles et d'outils de mesure 38
4. Problématique et objectifs généraux de la thèse 39

CHAPITRE 2 : ETUDES 41

5. Etude 1 : Etude multiparamétrique du tir à l'arc inter-niveau : comparer les stratégies de performance 41
5.1. Introduction 41
5.2. Matériel et méthodes 42
5.2.1. Participants 42
5.2.2. Protocole expérimental 43
5.2.3. Outils de mesures et analyse des données 43
5.2.3.1. Capteurs électromyographiques 43
5.2.3.2. Plateforme de force 45
5.2.3.3. Centrales inertielles 46
5.2.3.4. Ceinture thoracique 47
5.2.3.5. Caméras 47
5.2.4. Indices de variabilité 47
5.2.5. Statistiques 47
5.3. Résultats 48
5.3.1. Comparaison des scores 48
5.3.2. Comparaison des indicateurs médians 48
5.3.2.1. Activité neuro-musculaire 48
5.3.2.1.1. Phase de visée 48
5.3.2.1.2. Phase de suivi 50
5.3.2.2. Contrôle postural 52
5.3.2.2.1. Phase de visée 52
5.3.2.2.2. Phase de suivi 53
5.3.2.3. Cinématique 54
5.3.2.4. Amplitude thoracique 54
5.3.2.5. Durée de la phase de visée et TRC 55
5.3.3. Comparaison des indicateurs de variabilité 55
5.4. Discussion 55
5.4.1. Récapitulatif des résultats 55
5.4.2. Comparaison des indicateurs médians 56
5.4.2.1. Activité neuromusculaire 56
5.4.2.1.1. Phase de visée 56
5.4.2.1.1.1. Bras de corde 56

5.4.2.1.1.2. Bras d'arc 57
5.4.2.1.1.3. Muscles du tronc 58
5.4.2.1.2. Phase de suivi 58
5.4.2.1.2.1. Bras de corde 58
5.4.2.1.2.2. Bras d'arc 59
5.4.2.1.2.3. Muscles du tronc 60
5.4.2.2. Contrôle postural 61
5.4.2.2.1. Phase de visée 61
5.4.2.2.2. Phase de suivi 62
5.4.2.3. Cinématique du bras de corde 62
5.4.2.4. Amplitude thoracique 63
5.4.2.5. Durée de la phase de visée 64
5.4.2.6. Temps de réaction au clicker 64
5.4.3. Indices de variabilité 65
5.4.4. Applications pratiques 66
5.4.5. Limites méthodologiques 68
5.4.6. Perspectives de recherche 68
5.5. Conclusion 69

6. Etude 2 : Etude multiparamétrique du tir à l'arc de haut niveau : distinguer les stratégies de performance individuelles et communes pendant les phases de visée et de suivi 70
6.1. Introduction 70
6.2. Matériel et méthodes 71
6.2.1. Participants 71
6.2.2. Protocole expérimental 71
6.2.3. Outils de mesures et analyse des données 71
6.2.4. Statistiques 72
6.3. Résultats 73
6.3.1. Scores 73
6.3.2. Comparaisons de groupes 74
6.3.2.1. Activité neuromusculaire 74
6.3.2.2. Contrôle postural 76
6.3.2.3. Configuration corporelle 78
6.3.2.4. Stratégies temporelles 78
6.3.3. Comparaisons individuelles 79
6.3.3.1. Activité neuromusculaire 79
6.3.3.2. Contrôle postural 81
6.3.3.3. Configuration corporelle 82
6.3.3.4. Stratégies temporelles 83
6.4. Discussion 83
6.4.1. Déterminants collectifs de la performance 84
6.4.1.1. Activité neuromusculaire 84
6.4.1.2. Contrôle postural 86
6.4.1.3. Paramètres temporels 87
6.4.2. Déterminants individuels de la performance 87
6.4.2.1. Activité neuromusculaire 87
6.4.2.2. Contrôle postural 88
6.4.2.3. Paramètres temporels 88

6.4.3. Applications pratiques 89
6.4.4. Limitations 90
6.4.5. Perspectives 91
6.5. Conclusion 92

CHAPITRE 3 : DISCUSSION GENERALE, PERSPECTIVES ET CONCLUSION 93

7. Discussion générale 93
7.1. Rappel des objectifs et des résultats 93
7.2. Muscles des membres supérieurs 93
7.2.1. Effet du niveau de performance 94
7.2.2. Effet du niveau de performance et optimisation chez l'archer élite 95
7.2.3. Optimisation chez l'archer élite sans effet du niveau de performance 97
7.2.4. Effet du niveau de performance et individualisation chez l'archer élite 98
7.2.5. Individualisation chez l'archer élite sans effet du niveau de performance 99
7.3. Muscles du tronc 99
7.4. Contrôle postural 100
7.4.1. Surface et amplitudes de déplacement du CdP 100
7.4.2. Vitesses de déplacement du CdP 101
7.5. Cinématique du bras de corde 102
7.6. Amplitude du thorax 103
7.7. Stratégies temporelles 103
7.8. Perspectives 104
8. Conclusion générale 106

9. Références 108

ANNEXES 119
1. Rapport de mesure aux archers 119
2. Valorisation de la thèse 122
2.1. Article publié dans Frontiers in Sports and Active Living 122
2.2. Acte de congrès 138
2.2.1. Congrès de la société de biomécanique (SB) – Compiègne (2024) – Présentation poster 138
2.2.2. Congrès de European College of Sport Science – Rimini – 2025 (poster) 139

Résumé grand public 140
Public abstract 140

INTRODUCTION GENERALE

L'histoire du tir à l'arc remonte à des dizaines de millénaires, avec les plus anciennes preuves directes datant d'environ 12 000 ans en Allemagne. Des indices indirects suggèrent même une origine africaine il y a 70 000 ans, et une utilisation au Sri Lanka, il y a 48 000 ans. Essentiel dans de nombreuses mythologies à travers des figures comme Apollon, Robin des Bois ou Arjuna, l'arc était aussi une arme militaire cruciale dans l'Antiquité. Des civilisations telles que les Égyptiens, les Perses, les Chinois et les Amérindiens en dépendaient pour la guerre et la chasse.

Au Moyen Âge européen, son usage militaire s'est généralisé, notamment avec les archers anglais qui ont joué un rôle décisif durant la Guerre de Cent Ans, rivalisant avec l'arbalète. Après le Moyen Âge, l'avènement des armes à feu a progressivement relégué l'arc au second plan en tant qu'arme principale de guerre. Malgré cela, le tir à l'arc a perduré dans certaines cultures et a commencé à se transformer en une activité récréative et sportive.

À la Renaissance, il a connu un regain d'intérêt, notamment en Angleterre, où il est resté une activité populaire. Des sociétés d'archers se sont formées et ont contribué à maintenir la tradition. Au XIX^{e} siècle, le tir à l'arc a commencé à se structurer comme un sport moderne. Les premières compétitions organisées ont vu le jour, et des règles standardisées ont été établies. Il a été inclus aux Jeux Olympiques modernes dès 1900, bien qu'il ait ensuite été retiré, puis réintégré en 1972, démontrant sa reconnaissance comme discipline athlétique majeure. Aujourd'hui, le tir à l'arc est pratiqué dans le monde entier comme un sport compétitif et un loisir.

En 1931, la première organisation internationale voit le jour à Lviv en Pologne, où la France, la République tchèque, la Suède, la Hongrie, l'Italie, la Pologne et les États-Unis créent la Fédération Internationale de Tir à l'Arc (FITA), renommée en *World Archery* (WA) en 2011. Au 4 octobre 2012, la fédération comporte 149 organisations membres, et comptait 30 millions d'archers dans le monde. Une deuxième organisation internationale, l'IFAA (*International Field Archery Association*), a vu le jour aux États-Unis en 1970. Cette association promeut principalement le tir « *Field* », une discipline qui se pratique en environnement naturel et conserve un esprit proche de la chasse. Parmi ces deux fédérations, seule la WA est reconnue par le Comité International Olympique.

Cette modernisation et cette organisation mondiale du tir à l'arc se sont accompagnées d'une évolution technologique du matériel. Les arcs d'aujourd'hui sont bien différents de leurs lointains ancêtres. Le bois a cédé la place à des matériaux comme la fibre de verre, le carbone

ou l'aluminium, offrant une meilleure performance. Ces arcs modernes sont équipés d'accessoires sophistiqués : un viseur pour la précision, un repose-flèche, des stabilisateurs et des amortisseurs pour réduire les vibrations, ainsi que des poids pour un meilleur équilibre. Certains modèles intègrent même des cames (poulies à axe excentré) qui démultiplient considérablement la puissance de l'arc, propulsant les flèches à des vitesses dépassant les 300 km/h en compétition.

Parmi les arcs contemporains, on distingue principalement plusieurs catégories :

- Les arcs longs : descendants directs des arcs anglais, ils se caractérisent par une seule courbure de branche, offrant une expérience de tir plus traditionnelle.
- Les arcs à poulies : grâce à un système de poulies, ces arcs permettent de démultiplier la force de tir. Une poulie asymétrique assure une excellente accélération au moment du lâcher de la corde, tout en réduisant la force nécessaire pour maintenir l'arc bandé.
- Les arcs classiques : utilisés couramment en compétition dans les catégories classiques, ces arcs se distinguent par leurs branches recourbées aux extrémités. Ils peuvent être utilisés de deux manières différentes : nus, ou équipés d'accessoires.

La multiplication de ces équipements est expliquée par la diversité des disciplines pratiquées. En salle, les tirs s'effectuent à 18 mètres. D'autres disciplines se pratiquent en nature sur des parcours variés : le tir en campagne mêle distances connues et inconnues, le tir nature se fait sur des images animalières et le tir 3D sur des répliques d'animaux en trois dimensions. Enfin, des pratiques combinant sport d'endurance et tir existent, comme le ski-arc (associant le ski de fond) et le *run archery* (associant la course à pied).

Parmi les différentes pratiques du tir à l'arc, la discipline olympique est la plus connue. Son cadre compétitif est rigoureusement défini : elle se déroule en extérieur, à une distance unique de 70 mètres, sur une cible de 122 centimètres de diamètre. L'équipement autorisé est exclusivement l'arc classique, qui peut être doté d'accessoires de stabilisation et d'un viseur simple, mais exclut tout mécanisme d'assistance à la traction ou à la visée, comme les poulies. Le système de score est dégressif, allant de dix points pour le cercle central à un point pour l'anneau extérieur.

Pour répondre aux exigences de précision de cette discipline, l'arc classique a évolué vers une forme de compétition équipée de différents accessoires technologiques. L'arc de compétition (Figure 1) s'articule autour de la poignée, qui est sa pièce centrale. Fabriquée en carbone ou en aluminium, elle sert de support à tous les autres équipements. De part et d'autre de la poignée se fixent les branches qui sont la source de toute la puissance de l'arc. Leur force et leur taille sont adaptées au besoin de l'archer. Ces branches sont reliées par la corde, dont la tension permet

de propulser la flèche. Pour tirer avec précision, un viseur est monté sur la poignée. Il est doté d'un point de mire et peut être ajusté en hauteur et latéralement pour affiner le tir.

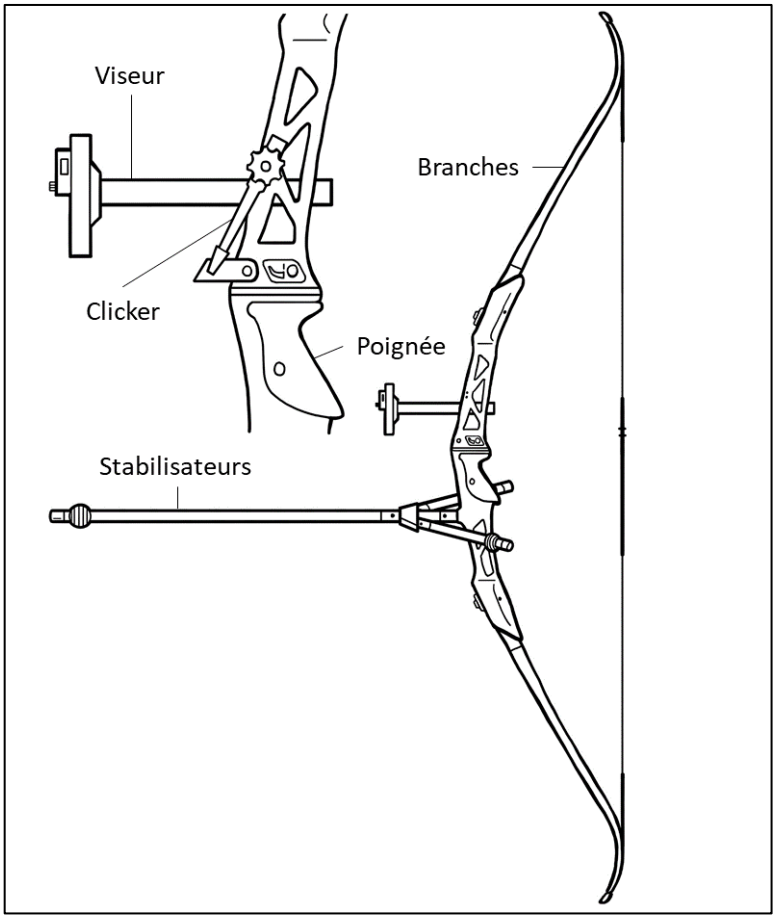


Figure 1 : Schéma et description d'un arc olympique (https://www.jessica-emmett.com/blog/archery-beginners-recurve-diagrams/)

Afin d'assurer une régularité parfaite, le clicker, une fine lame métallique, contrôle l'allonge de l'archer. En produisant un « clic » sonore distinct lorsque la traction est optimale, il indique le moment exact pour décocher, garantissant ainsi que chaque flèche est tirée avec la même énergie. Enfin, le système de stabilisation, composé d'une tige centrale et de deux tiges latérales, joue un double rôle essentiel : il stabilise l'arc pendant la visée et absorbe les vibrations au moment du tir. Le poids de cet ensemble est personnalisable grâce à des masses que l'on peut ajouter ou retirer. Un arc équipé pèse environ 3 kilogrammes.

C'est avec cet instrument de haute précision que l'archer aborde la compétition, qui débute par une phase de qualification où 72 flèches sont tirées pour établir un classement initial. Ce classement détermine ensuite les confrontations de la phase d'élimination directe, qui change radicalement de format pour adopter un système de duels en sets. Un match est remporté par le premier archer atteignant 6 points, sachant qu'un set (3 flèches par archer) rapporte 2 points en cas de victoire ou 1 point en cas d'égalité.

Cette description du format olympique met en lumière la nature complexe du tir à l'arc contemporain : une pratique millénaire transformée en un sport de haute précision, où les facteurs déterminants de la performance sont nombreux. Une telle complexité soulève naturellement des interrogations qui appellent à une analyse scientifique approfondie.

C'est précisément dans ce but qu'a été initié ce travail de thèse, né d'une collaboration entre le centre CARE (Centre d'Accompagnement, de Recherche et d'Expertise) de Nancy porté par l'unité de recherche 3450 DevAH et deux acteurs locaux du tir à l'arc : le Pôle France Relève de tir à l'arc de Nancy et le comité départemental de Meurthe-et-Moselle de tir à l'arc. L'objectif commun de ce partenariat était de mieux comprendre les paramètres biomécaniques de la performance afin d'améliorer l'accompagnement et l'entraînement des athlètes. De cette interaction entre les besoins du terrain et l'analyse scientifique est née la problématique au cœur de cette thèse, qui nécessitera en premier lieu d'établir un état de l'art des études menées sur le sujet, avant de détailler les deux études qui ont été menées lors de ce travail.

CHAPITRE 1 : ETAT DE LA LITTERATURE

1. Description du mouvement de tir à l'arc

Le mouvement de tir à l'arc se divise en plusieurs phases, qui ont été décrites de différentes manières par des études antérieures (Leroyer et al., 1993; Nishizono et al., 1987; Takai et al., 2012). Des approches simplifiées en trois étapes (posture, armement, visée) ont été proposées (Leroyer et al., 1993), tandis que des analyses plus fines, comme celle de Nishizono et al. (1987), décomposent le geste en six phases : prise de l'arc, armement, allonge complète, visée, lâcher et suivi. D'autres classifications intermédiaires existent, comme celle de Takai et al. (2012) qui identifie quatre phases distinctes : positionnement, mise en place, lâcher et suivi.

Parmi les différentes décompositions du tir, le modèle en six phases de Nishizono et al. (1987) s'est imposé comme une référence, puisqu'il a été utilisé dans de nombreuses études (Ertan et al., 2003; Quan et al., 2017; Simsek et al., 2018; Soylu et al., 2006). Néanmoins, le modèle plus récent de Callaway et al. (2017) peut être considéré comme une évolution affinée de ce dernier, visant à apporter une plus grande précision à des instants clés de la séquence. Par exemple, il segmente la phase initiale en y distinguant la « routine de pré-tir » et la « mise en place », et isole la décoche en une phase spécifique, le « temps clicker-lâcher », afin de mieux analyser la réaction neuromusculaire de l'archer.

En raison de sa plus grande finesse d'analyse et de sa pertinence pour l'étude des déterminants modernes de la performance, c'est cette classification qui sera adoptée comme référence pour la suite de ce travail. Le modèle proposé par Callaway et al. (2017) est composé de six phases distinctes : la routine de pré-tir, la mise en place, l'armement, la visée, le temps clicker-lâcher, et le suivi (Figure 2).

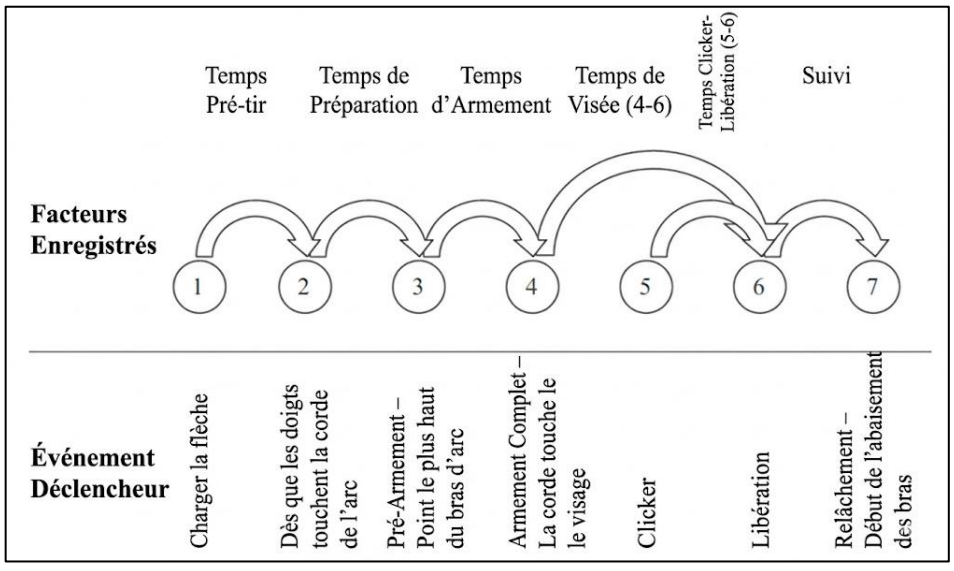


Figure 2 : Déroulement d'une séquence de tir à l'arc (adapté de Callaway et al., 2017)

L'analyse du tir à l'arc comme une chaîne cinétique complète est essentielle pour comprendre comment la performance est construite. Ce concept décrit la manière dont la force est initiée depuis une base stable, transférée à travers les segments corporels, puis canalisée vers l'arc.

1.1. Chronologie

1.1.1. Généralités

La séquence débute par la routine de pré-tir, un moment fondamental où l'archer établit les fondations physiques et mentales de son action. Une posture stable est adoptée, les pieds parallèles, écartés à la largeur des hanches et alignés antéro-postérieurement, définissant un polygone de sustentation symétrique favorisant la stabilité posturale. Cette base au sol permet l'activation des muscles du tronc, qui stabilisent le bassin et la colonne vertébrale pour former une plateforme rigide, indispensable à l'action des membres supérieurs. Cette étape inclut également une préparation mentale cruciale, souvent axée sur des techniques de respiration, visant à optimiser la concentration et à limiter les interférences cognitives. L'objectif de cette phase est d'assurer la reproductibilité du geste et l'instauration d'une routine fiable, deux conditions essentielles à la performance.

La phase de mise en place marque le véritable début du mouvement. C'est durant cette étape que l'archer accroche ses doigts à la corde puis lève l'arc dans un geste fluide et continu en direction de la cible. L'enjeu de cette phase est de passer de l'immobilité de la préparation à la dynamique du tir de manière parfaitement contrôlée et sans précipitation.

S'ensuit la phase d'armement, un mouvement continu et puissant où la force est principalement générée par les muscles dorsaux, et transférée au bras de corde. Pendant que l'archer exerce une force de traction sur la corde, le bras d'arc agit comme un pilier stable, créant un équilibre entre la force qui pousse l'arc et celle qui tire la corde. L'efficacité de ce transfert est primordiale : toute rupture dans la chaîne, comme une instabilité du tronc, obligerait les muscles plus petits et moins endurants du bras à compenser, dégradant la précision (Mann & Littke, 1989). Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la main de corde atteigne le « point d'ancrage », un contact constant et précis sous le menton, emmagasinant ainsi l'énergie maximale de l'arc juste avant d'entrer dans la phase de visée.

Ces étapes du tir ont l'objectif commun de préparer le meilleur lâcher de flèche possible. Parmi ces étapes, la visée et le suivi sont deux moments très importants, car ils encadrent la libération de la corde. La visée est cruciale, parce que c'est à ce moment que l'archer doit optimiser sa stabilité pour assurer l'alignement du système œil-viseur-cible (Mononen et al., 2007). La phase de suivi, quant à elle, est la conséquence directe de la décoche. Elle révèle la qualité de la

libération et la capacité de l'archer à maintenir son geste sans perturber le départ de la flèche. En raison de leur influence directe sur la performance, ces deux phases sont parmi les plus étudiées dans la littérature scientifique et constituent le principal objet d'analyse du présent travail.

1.1.2. La phase de visée

Bien plus qu'une simple action de pointer, la phase de visée est un état de stabilité dynamique. Elle commence lorsque la corde touche le visage, moment où l'archer atteint son point d'ancrage (Figure 3). À cet instant, l'archer doit simultanément gérer plusieurs tâches : il stabilise son corps et son bras d'arc pour minimiser les oscillations du viseur sur la cible, tout en continuant un micromouvement d'expansion caractérisé par une rétropulsion scapulaire et une activation des muscles dorsaux, permettant de maintenir et d'optimiser la tension de l'arc jusqu'à la libération de la corde. Cette stabilité prend racine dans le tronc, où les archers élites maintiennent une co-contraction intense des muscles profonds, comme le transverse de l'abdomen et le multifide (Azhar et al., 2021), créant un « bloc » lombo-pelvien rigide qui sert de plateforme pour les actions des membres supérieurs. Sans cela, toute micro-oscillation ou rotation parasite au niveau du tronc serait inévitablement transmise et amplifiée le long du bras jusqu'à la main qui tient l'arc, rendant la visée précise impossible.

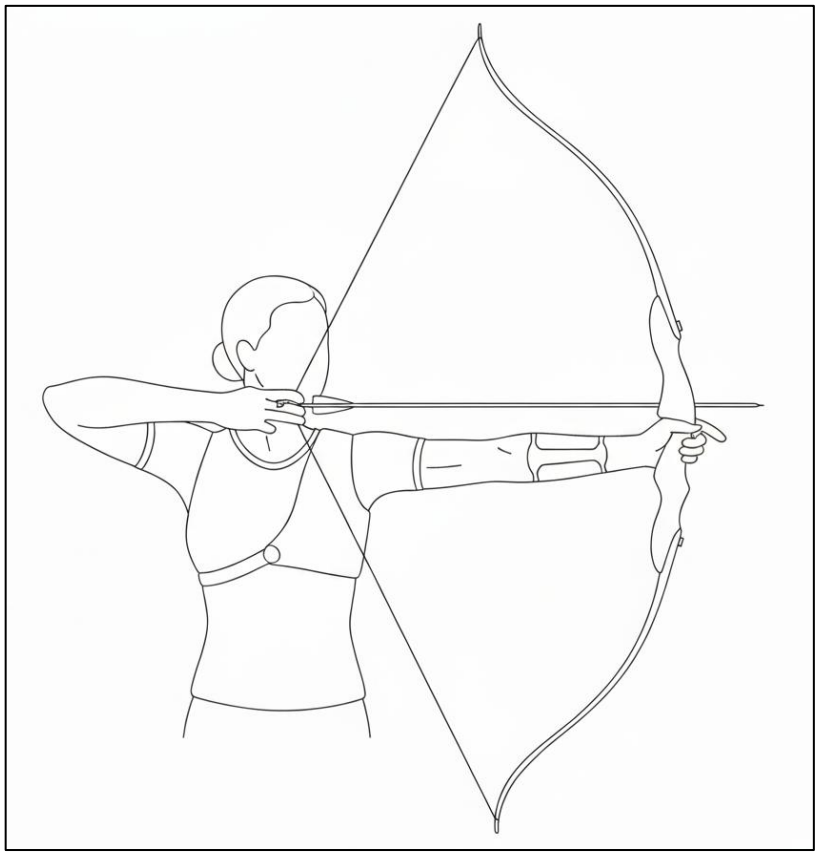


Figure 3 : Position de l'archer durant la phase de visée (Image générée par Gemini)

Ainsi, en verrouillant le tronc, l'archer fournit à la scapula une base d'appui fixe. Cela permet aux muscles de la ceinture scapulaire, comme le trapèze et le deltoïde, de remplir plus efficacement leur propre rôle de stabilisateurs de l'articulation de l'épaule. Le bras d'arc peut alors se concentrer sur sa tâche unique : maintenir une contraction isométrique pour supporter le poids de l'arc et résister à sa force, sans avoir à compenser en permanence les instabilités provenant du corps. Ce n'est pas une phase passive d'attente, mais une intensification contrôlée de la tension. Ce micromouvement, souvent appelé « expansion », correspond à une augmentation continue de l'activité des muscles rétracteurs de la scapula, notamment les faisceaux moyen et inférieur du trapèze. C'est cette traction dorsale finale qui amène la flèche à passer le « clicker », ce signal sonore qui valide la distance de l'allonge. La capacité à maintenir un état général relâché et à laisser ce processus se dérouler sans précipitation affecte directement la précision, car toute crispation ou anticipation perturbera l'alignement final. Une phase de visée réussie est donc la garantie que le tir est initié depuis une plateforme stable et parfaitement alignée.

La décoche est l'instant le plus bref et le plus décisif du tir, consistant en la réaction immédiate de l'archer au signal sonore. Dès qu'il entend le « clic », il libère la corde via un processus qui n'est pas un simple relâchement des fléchisseurs des doigts, mais également une contraction active des muscles extenseurs des doigts. L'objectif fondamental de cette phase n'est pas la vitesse absolue, mais la constance de ce processus neuromusculaire. En effet, un archer performant se distingue par sa capacité à maintenir une variabilité minimale de son temps de réaction, flèche après flèche (Callaway et al., 2017). Cette faible variabilité témoigne d'un geste devenu automatique, à l'opposé de la décoche plus lente et consciente du débutant, souvent parasitée par une co-contraction excessive et inefficace des muscles de l'avant-bras.

1.1.3. La phase de suivi

La phase de suivi constitue une composante déterminante du geste de tir, car elle traduit directement la qualité de l’exécution. D’un point de vue biomécanique, l’archer doit maintenir un contrôle actif et stabiliser les forces résiduelles générées par la décoche, afin de préserver l’équilibre postural et d’assurer la continuité du mouvement (Lee & Benner, 2009). Cette stabilisation reflète l’efficacité du transfert d’énergies de l’arc vers la flèche. La phase de suivi débute précisément au moment du lâcher de la corde et s’achève lorsque l’archer amorce l’abaissement de l’un de ses bras (Callaway et al., 2017). Elle revêt une importance particulière puisqu’elle correspond à l’instant ou l’énergie potentielle accumulée dans l’arc est transmise à la flèche, cette dernière restant encore en contact avec l’arc après la libération.

Au lieu de s’arrêter au moment de la décoche, le mouvement de l’archer se poursuit naturellement : le bras d'arc maintient la visée et la main de corde continue son mouvement vers l'arrière. Cette continuité traduit le caractère processuel du lâcher, qui ne constitue pas une action isolée, mais l'étape d’une séquence motrice fluide, limitant les perturbations susceptibles d’altérer la trajectoire de la flèche. Un archer qui interrompt prématurément ce mouvement, par exemple en baissant son bras d'arc trop tôt pour observer l’impact de sa flèche, risque d'influencer la sortie de la flèche et de modifier sa trajectoire. Ainsi, un suivi correctement exécuté témoigne du maintien du contrôle moteur et de l’équilibre postural.

1.2. Description fonctionnelle

1.2.1. Anatomie du complexe articulaire de l’épaule

La performance en tir à l'arc dépend de l'action coordonnée et asymétrique des deux bras. Le bras de corde doit concilier une large amplitude de mouvement avec une stabilité parfaite à partir de l'ancrage, tandis que le bras d'arc doit agir comme un pilier indéformable. Dans les deux cas, le complexe articulaire de l'épaule est la structure clé qui doit gérer ce compromis entre mobilité et stabilité. Les structures osseuses impliquées comprennent la scapula, la clavicule, ainsi que la chaîne des segments du membre supérieur, de l'humérus (bras) jusqu'au couple radius-ulna (avant-bras).

Le complexe articulaire de l'épaule est une structure anatomique regroupant cinq articulations (Figure 4). L'articulation gléno-humérale, entre la tête de l'humérus et la cavité glénoïde de la scapula, est la plus mobile du corps humain. Cependant, cette grande amplitude de mouvement se fait au détriment de la stabilité, car la tête humérale, large et sphérique, s'articule avec une glène peu profonde et est de surface réduite.

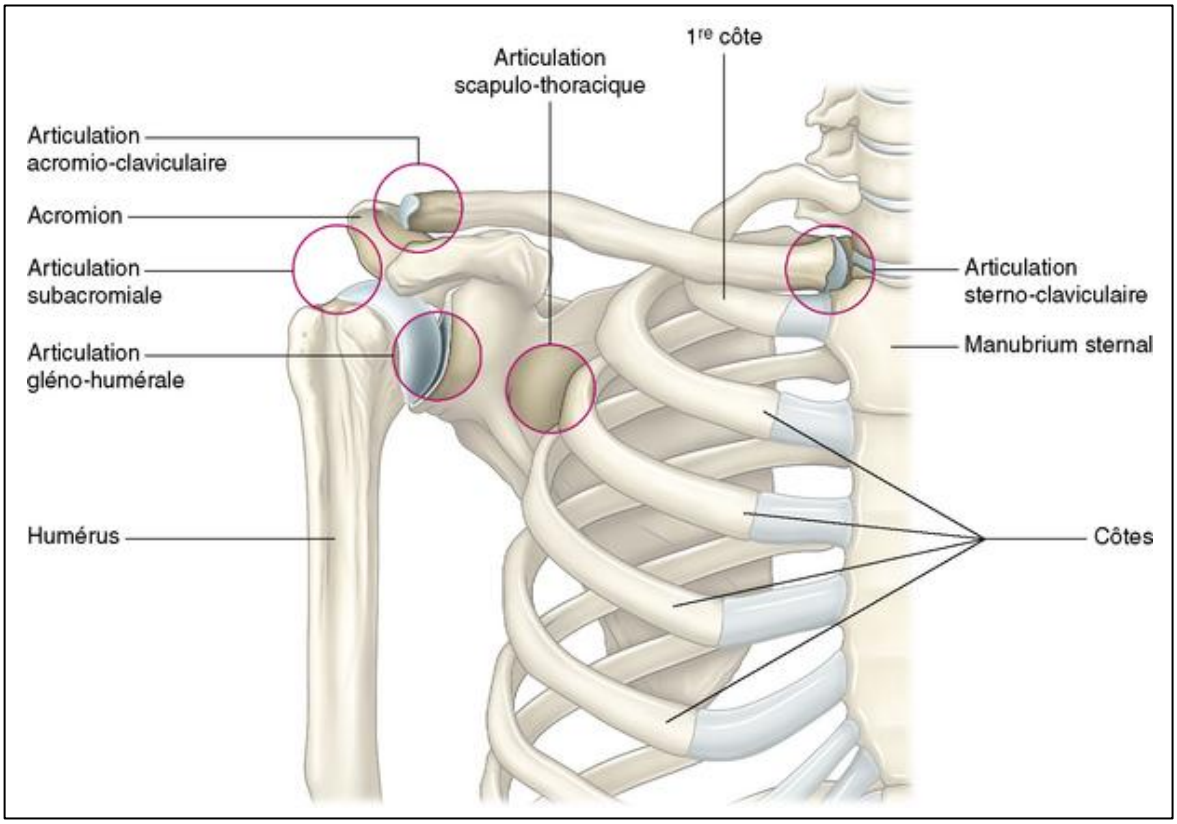


Figure 4 : Schéma des articulations de l'épaule (https://clemedicine.com/5-anatomie-fonctionnelle-de-lepaule/)

Cette configuration exige une stabilisation active et constante de la part des muscles environnants, notamment ceux de la coiffe des rotateurs. Les articulations acromio-claviculaire et sterno-claviculaire, ainsi que les articulations fonctionnelles scapulo-thoracique et subacromiale, complètent ce complexe.

Les mouvements de la scapula sur ce plan sont essentiels car ils positionnent l'articulation gléno-humérale dans l'espace, permettant ainsi d'orienter et d'amplifier les mouvements du bras. Ces déplacements sont produits par des muscles qui prennent leur origine sur le crâne, les vertèbres, ou les côtes, et s'insèrent sur la scapula. Nous détaillerons ces muscles ultérieurement dans cet état de l'art.

1.2.2. Bras de corde

Le bras de corde correspond au membre supérieur qui va tirer la corde en appliquant une force suffisante pour armer l'arc. Durant la phase d'armement, la cinématique du bras de corde est initiée non pas par le membre supérieur lui-même, mais par le déplacement de la scapula.

Durant la traction et la visée, la scapula effectue un mouvement continu de rétraction (Figure 5) entrainant le bras vers l'arrière. Au cours de cette action, l'angle de flexion du coude est

maintenu constant, et le poignet est verrouillé en position neutre par les muscles de l'avant-bras, assurant un alignement osseux optimal pour transmettre efficacement la force générée par les muscles du dos jusqu'à la corde sans déperdition d'énergie.

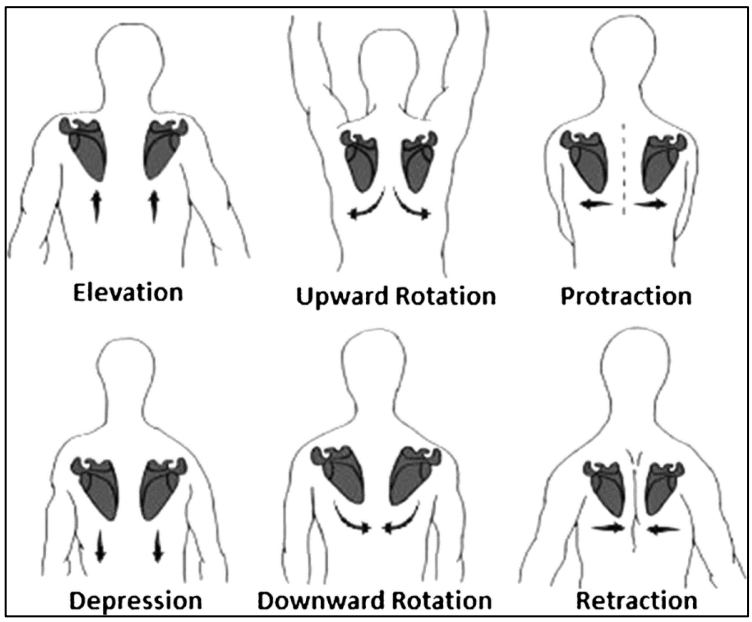


Figure 5 : Différents mouvements de la scapula (Saini et al., 2020)

La libération soudaine de la corde permet alors à la scapula d'achever sa course, le bras de corde de l'archer étant naturellement entraîné vers l'arrière dans un mouvement de suivi qui poursuit la direction de la traction exercée avant la décoche.

1.2.3. Bras d'arc

Avant de lever l'arc, la scapula est placée en position de dépression et de rotation médiale avec une orientation postéro latérale assurant l'apposition du bord médial contre la cage thoracique. Le coude est orienté vers l'extérieur pour aligner radius et ulna. La main est placée sur la poignée de l'arc, de sorte que le point d'appui coïncide avec l'axe longitudinal du radius. La levée de l'arc, qui amène le bras à hauteur des yeux, doit se faire principalement au niveau de l'articulation gléno-humérale. Ce mouvement correspond à une abduction contrôlée de l'humérus sur une scapula maintenue en position de dépression, assurant la stabilité scapulo-thoracique.

Le bras d'arc agit comme un pilier osseux stable qui résiste à la force de l'arc. Durant la traction et la visée, la force est transmise directement à travers les os alignés de la main (Figure 6), de l'avant-bras et du bras jusqu'au tronc. Cette stratégie « d'empilement osseux » permet un maintien stable et sans fatigue, car les os supportent la charge à la place des muscles. Si cet alignement se rompt, les muscles doivent compenser, ce qui crée de l'instabilité. Enfin, à la

décoche, la force disparaît et le mouvement du bras d'arc vers l'avant est une simple réaction passive et inertielle, et non une action volontaire.

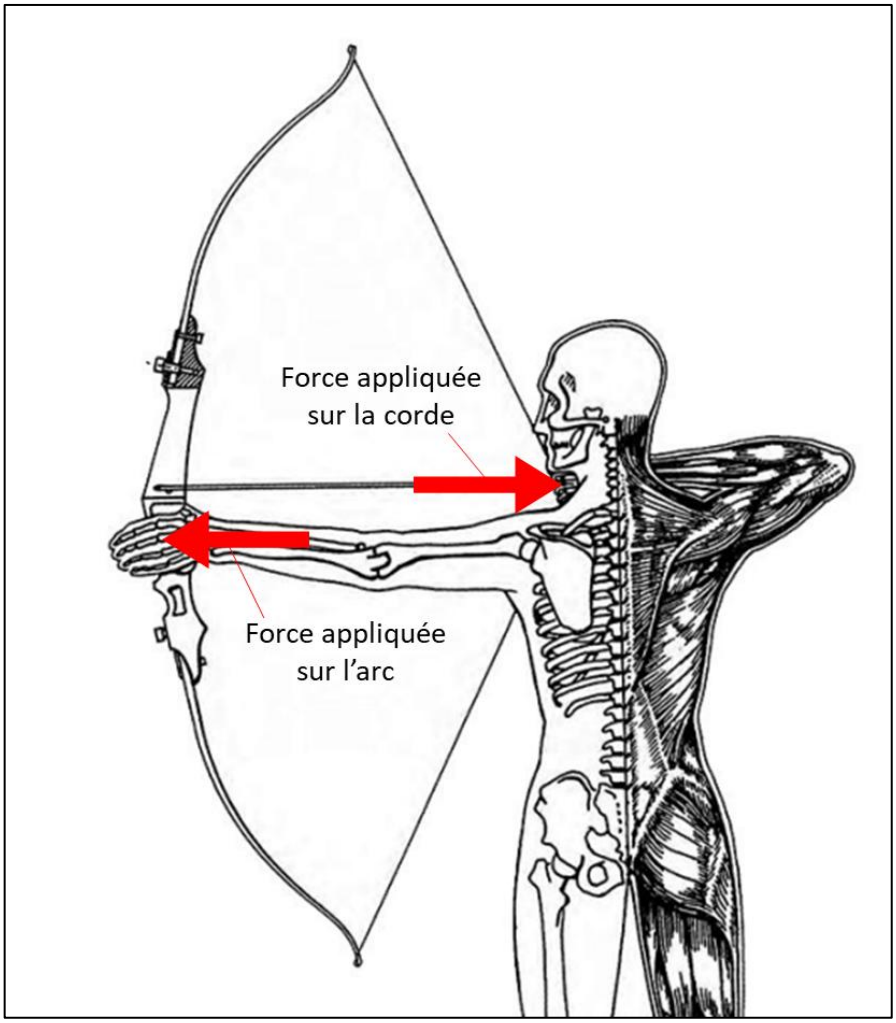


Figure 6 : Schéma des forces appliquées sur la corde et sur l'arc (adapté de Axford (1995))

2. La performance en tir à l'arc

Dans cette section, les différents paramètres qui composent la performance en tir à l'arc seront passés en revue, en s'intéressant plus en profondeur à certains de ces paramètres.

La performance en tir à l'arc est un phénomène multifactoriel, dont le résultat provient d'une synergie entre plusieurs dimensions (Figure 7). Elle requiert une maîtrise technique (configuration segmentaire), une organisation neuromusculaire efficiente, une stabilité posturale rigoureuse, et une stratégie temporelle précise. A ces composantes s'ajoutent des régulations physiologiques, notamment au niveau cardiorespiratoire et musculaire, ainsi que des facteurs cognitifs et émotionnels tels que la concentration et la gestion du stress. La maîtrise de l'ensemble de ces paramètres est essentielle pour atteindre la précision et la régularité de la performance.

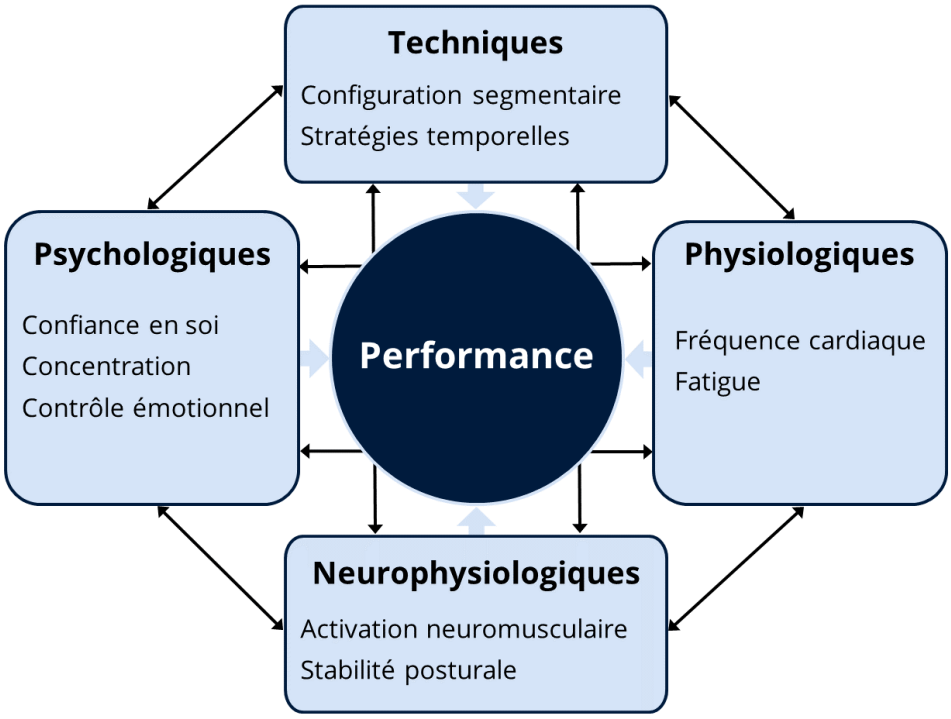


Figure 7 : Représentation des paramètres de performance au tir à l'arc

2.1. Les groupes musculaires moteurs et stabilisateurs

2.1.1. Phase de visée

2.1.1.1. Muscles du bras de corde

L'efficacité du tir à l'arc repose sur une coordination neuromusculaire optimisée, caractérisée par l'activation synergique des muscles moteur, stabilisateur et antagoniste. Cette coordination est particulièrement critique au niveau du complexe scapulo-thoraco-huméral, dont la fonction repose sur un compromis entre la mobilité nécessaire à la réalisation du geste et la stabilité indispensable au maintien postural.

Avant la phase de visée, lors de la phase d'armement, la traction est initiée non par le bras, mais par le déplacement de la scapula. Celle-ci amorce le mouvement par une rétraction, glissant sur la cage thoracique en direction de la colonne vertébrale. Ce mouvement de rétraction est couplé à une dépression active, maintenant la scapula en position basse pour garantir la stabilité de l'ensemble.

La rétraction de la scapula est effectuée par le trapèze (Figure 8) et son faisceau médian, ainsi que par le rhomboïde. Le rhomboïde est un muscle profond, qui trouve son origine sur les processus épineux des premières vertèbres thoraciques, et qui a ses terminaisons sur le bord

médial de la scapula. Son aspect profond rend difficile sa mesure par électromyographie (EMG) de surface. Il est donc difficile de connaitre son implication dans le mouvement de tir à l'arc.

Le trapèze médian s'insère également sur les processus épineux des vertèbres C7 à T4 et se termine sur l'acromion et sur l'épine de la scapula. Son activation a été étudiée par l'équipe de Simsek et ses collaborateurs dans deux études différentes (Simsek et al., 2014, 2018). Ils ont évalué 27 archers répartis selon leur niveau de performance : 9 élites (score supérieur à 1150 sur 1440, correspondant à 2 volées de 72 flèches), 9 intermédiaires (score entre 1100 et 1150) et 9 novices (score inférieur à 1100). Les auteurs ont montré que durant les 400ms précédant la chute du clicker, les archers élites présentaient une activation du trapèze médian significativement plus élevée (88% de la contraction volontaire maximale - MVC) que les archers de niveau intermédiaire (56% de la MVC) et que les archers novices (45% de la MVC).

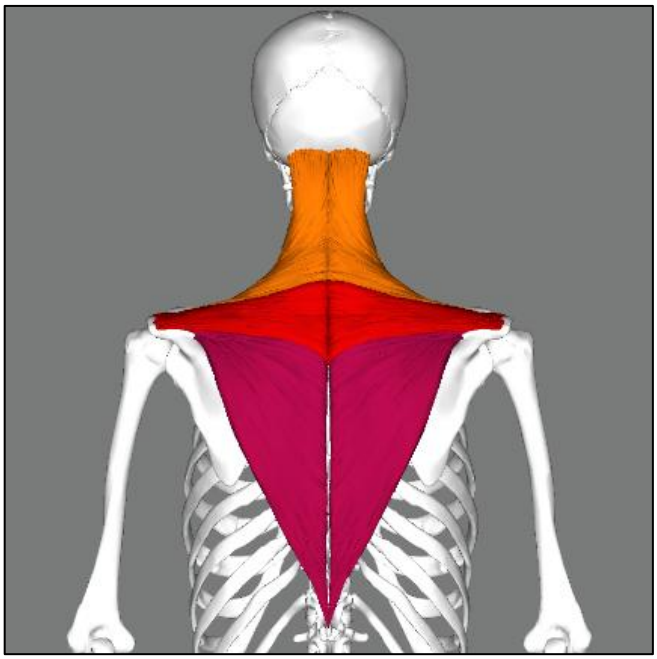


Figure 8 : Vue postérieure des trois faisceaux du trapèze : supérieur, médian, inférieur (BodyParts3D, sous licence CC BY-SA 2.1 jp)

D'un point de vue fonctionnel, cette stratégie neuromusculaire observée chez l'élite a un objectif biomécanique précis. Lors de la phase de visée, la scapula, maintenue en dépression maximale, poursuit son déplacement par un micro-mouvement de rétractation continue qui mène à la décoche.

Le faisceau inférieur du trapèze, principal muscle responsable de l'abaissement de la scapula, est un marqueur clé de l'efficacité neuromusculaire. Toutefois, son rôle exact dans la différenciation des niveaux d'expertise en tir à l'arc demeure controversé dans la littérature. En effet, Shinohara & Urabe (2018) ont montré, durant la seconde précédant la décoche, une

activation significativement plus élevée du faisceau inférieur du trapèze chez les archers élites (54 % de la MVC) comparativement aux archers pré-élites (39 % de la MVC) et débutants (34 % de la MVC). A l'inverse, Simsek et al. (2018) ont observé durant les 400ms précédant le tir, une activation environ deux fois plus faible chez les archers experts (46 % de la MVC) que chez les archers intermédiaires (80 % de la MVC) et novices (88 % de la MVC).

Cette divergence pourrait s'expliquer par les différences méthodologiques entre les deux études, notamment la distance de tir (70m et 18m), les protocoles de normalisation de l'EMG, ou encore la fenêtre temporelle d'analyse (une seconde versus 400ms avant le clicker). Néanmoins, l'interprétation des résultats de Simsek et al. (2018) demeure particulièrement pertinente : une suractivation du trapèze inférieur chez les archers non-élites suggère une stratégie neuromusculaire moins efficiente, caractérisée par un recours à la contraction musculaire pour compenser un déficit de contrôle moteur et de stabilité scapulaire, tandis que les experts atteindraient le même niveau de stabilité avec une économie d'effort et une meilleure coordination segmentaire.

Les fibres supérieures du trapèze prennent leur origine sur le tiers médial de la ligne nuchale supérieure de l'os occipital du crâne. Elles s'insèrent également sur le ligament nucal, ce ligament épais qui relie les vertèbres cervicales entre elles, et par son intermédiaire, sur les processus épineux des sept vertèbres cervicales (de C1 à C7). Elles terminent sur le bord postérieur du tiers latéral de la clavicule. Le trapèze supérieur a un rôle de stabilisation de la scapula lors de la rétraction, mais surtout un rôle d'élévation et de rotation externe de cette dernière. Ce muscle n'a fait l'objet que d'une seule étude, qui n'a pas montré de différences significatives d'activation entre les niveaux d'expertise des archers (Shinohara & Urabe, 2018).

Le mouvement scapulaire effectué grâce aux différents chefs du trapèze, dicte la cinématique de l'humérus : sa tête pivote au sein de la cavité glénoïde pour réaliser une abduction horizontale dans le plan transversal. Cette abduction horizontale est majoritairement effectuée grâce au muscle deltoïde.

Le deltoïde (Figure 9) englobe l'articulation gléno-humérale et est composé de 3 faisceaux. Chacun possède un rôle distinct pour l'action du bras de corde durant la phase de visée : le faisceau médian (en vert) est le principal abducteur de l'épaule, le faisceau antérieur (en rouge) agit comme antagoniste sur le bras de corde et le faisceau postérieur (en bleu) est un moteur essentiel de la traction grâce à ses fonctions d'extenseur, de rotateur externe et d'abducteur horizontal de l'épaule.

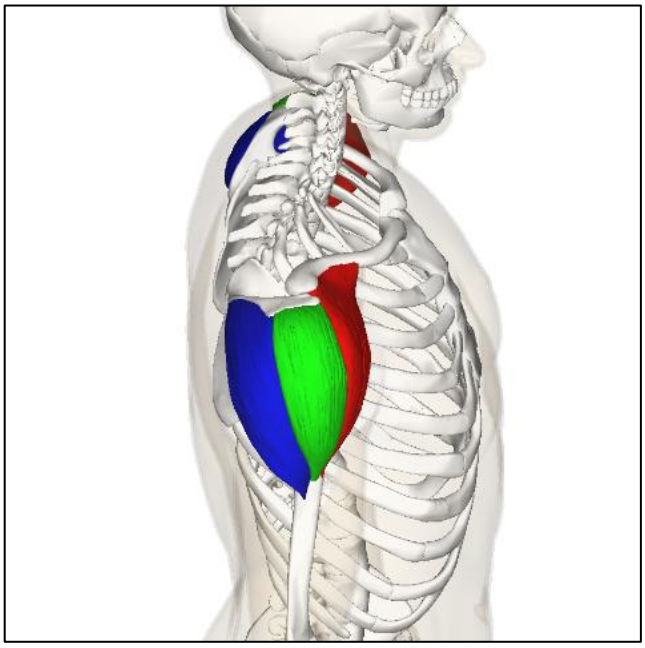


Figure 9 : Vue latérale des trois faisceaux du deltoïde : postérieur, médian et antérieur (BodyParts3D, sous licence CC BY-SA 2.1 jp)

Selon l'étude de Simsek et al. (2018), l'activation du deltoïde postérieur chez les archers élites atteint 80 % de la MVC soit une activation significativement plus élevée que chez les archers de niveau intermédiaire (60 % de la MVC) et novice (33 % de la MVC). Toujours selon la même étude (Simsek et al., 2018), le deltoïde médian présente une plus grande activité chez les élites (68 % de la MVC) par rapport au groupe intermédiaire (40 % de la MVC). Cette plus grande activité des faisceaux médians et postérieurs chez les experts témoigne de l'importance de ces deux muscles pour une meilleure stabilisation active de l'articulation de l'épaule durant la phase de visée. De plus, il a été démontré que le muscle deltoïde dans son ensemble influence passivement la translation supérieure-inférieure de la tête humérale, contribuant ainsi à la stabilité gléno-humérale (Halder et al., 2001), car sa masse et sa tension lors de l'abduction créent un effet mécanique qui s'oppose physiquement au glissement de la tête humérale.

Distalement, l'articulation du coude (huméro-ulnaire et huméro-radiale) conserve un angle de flexion constant, transformant la chaîne radius-ulna en un levier rigide qui ne fait que transmettre la force. Ce principe s'applique également au niveau du poignet pour avoir un alignement osseux strict entre l'avant-bras et la main tout au long de la traction.

Le muscle extenseur commun des doigts (Figure 10) naît d'un tendon partagé avec d'autres muscles extenseurs sur l'épicondyle latéral de l'humérus, et se termine sur les phalanges moyennes et distales de quatre doigts (de l'index à l'annulaire) grâce à un système aponévrotique. Son action principale est l'extension de ces quatre doigts, mais aussi l'extension

du poignet. L'extenseur commun des doigts est moins activé chez des archers de niveau élite (15 % de la MVC) en comparaison à des archers novices (34 % de la MVC) et des archers moyens (41 % de la MVC) dans les 400ms avant la chute du clicker (Simsek et al., 2014, 2018). Une autre investigation qui a étudié les muscles de l'avant-bras de corde 1 seconde avant la chute du clicker, n'a pas trouvé de différence significative entre les groupes de niveaux (Ertan et al., 2003).

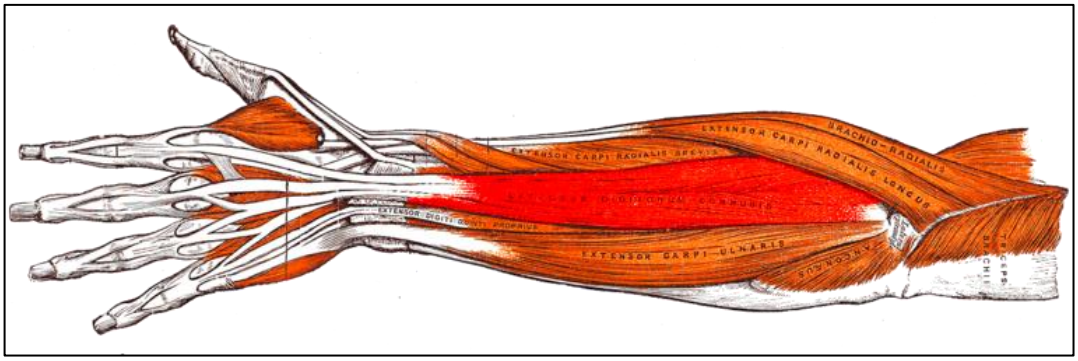


Figure 10 : Muscle extenseur commun des doigts (domaine public)

Le muscle fléchisseur superficiel des doigts (Figure 11) s'insère sur l'épicondyle médial de l'humérus et sur le processus coronoïde de l'ulna, et vient trouver sa terminaison sur les quatre phalanges moyennes des quatre doigts (de l'index à l'annulaire). Il permet de réaliser la flexion de la deuxième phalange sur la première pour les quatre doigts et il est également fléchisseur de la première phalange de ces quatre doigts sur le métacarpe.

Le fléchisseur superficiel des doigts est également moins activé chez des archers de niveau élite en comparaison à des archers novices avant le lâcher de la flèche (Simsek et al., 2014, 2018; Tinazci, 2011).

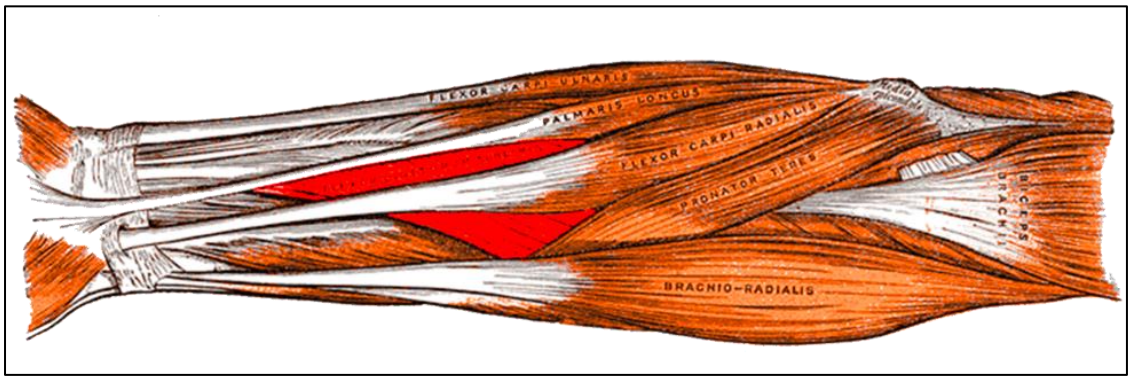


Figure 11 : Muscle fléchisseur superficiel des doigts (domaine public)

2.1.1.2. Muscles du bras d'arc

Si le bras de corde est le moteur de la traction, le bras d'arc constitue le pilier stabilisateur sur lequel repose la précision du tir. La montée de l'arc est une abduction de l'épaule qui doit s'effectuer en conservant cette base scapulaire stable et verrouillée. Durant cette abduction, le deltoïde médian agit comme le principal muscle porteur de la masse de l'arc, assurant le maintien de la position du bras (Kolayiş & Ertan, 2016).

Ensuite, à mesure que le bras de corde tire la corde vers l'arrière, une importante quantité d'énergie potentielle élastique s'emmagasine dans les branches de l'arc. Cette déformation des branches, qui cherchent à revenir à leur position de repos, exerce une force constante de l'arc sur la poignée, dirigée vers la cible. Pour maintenir l'arc stable dans la position d'allonge, le bras d'arc doit exercer une force de poussée sur la poignée. C'est cette résistance qui se traduit par une force de compression axiale exercée sur la chaîne osseuse du bras.

Cette force est dirigée le long de l'axe horizontal de la poignée et, par conséquent, le long de la chaîne osseuse du bras d'arc. L'empilement osseux de l'archer est donc pleinement sollicité pour résister à cette poussée. La force se transmet depuis la main, qui est le premier point de contact avec la poignée, et remonte le long de l'axe unifié du radius et de l'ulna de l'avant-bras. Elle traverse ensuite l'articulation du coude, qui est activement maintenue en extension pour créer une structure rigide. De là, la force est conduite le long de l'humérus jusqu'à la tête humérale, qui est solidement coaptée dans la glène de la scapula, avant d'être finalement dissipée et stabilisée par les muscles du tronc. L'efficacité de cette transmission par compression est cruciale pour maintenir la stabilité de l'arc et l'alignement, minimisant ainsi toute déperdition d'énergie latérale ou rotationnelle avant la décoche.

La littérature scientifique s'est peu attardée sur le lien entre l'activité neuromusculaire spécifique de ce bras et la performance. Seule l'étude de Ertan (2009) a mis en lumière une stratégie discriminante en fonction du niveau de pratique. La distinction la plus nette se situe au niveau de l'avant-bras, où la gestion de la poignée est cruciale.

L'étude révèle que les archers élites développent une stratégie pour éviter d'exercer une préhension active de l'arc : ils maintiennent une contraction de leurs muscles extenseurs des doigts (8% de la MVC) tout en relâchant significativement les fléchisseurs (2% de la MVC). À l'inverse, les débutants présentent une co-contraction de ces deux groupes musculaires (3% de la MVC pour le fléchisseur et 4% de la MVC pour l'extenseur), générant une prise potentiellement instable et moins performante.

Cette prise active par les débutants est un défaut technique majeur, car elle est susceptible de produire un couple de torsion sur la poignée au moment de la décoche, ce qui peut dévier la

trajectoire de la flèche. À l'inverse, la stratégie des experts consiste à utiliser une main relâchée où l'arc est simplement en appui sur la paume et non saisi activement. Cette technique de poussée, avec les doigts étendus, sécurise le mouvement vers l'avant de l'arc sans interférence, ce qui est une des raisons pour laquelle ils obtiennent de meilleurs scores.

2.1.1.3. Muscles du tronc

Le tir à l'arc est une discipline où la force est principalement générée par les membres supérieurs, mais la performance dépend aussi de la stabilité de l'ensemble du corps durant la visée. Le contrôle du tronc joue ainsi un rôle fondamental, car une stabilisation efficace du complexe lombo-pelvien est une condition préalable indispensable à la production de mouvements fins et maîtrisés par les extrémités (Bouisset, 1991).

Cette capacité à contrôler la position et le mouvement du tronc par rapport au bassin est définie comme le « *core stability* » (Kibler et al., 2006). L'objectif est de fournir une stabilité proximale pour permettre une mobilité efficace des segments distaux, assurant ainsi un transfert et une maîtrise optimale de la force. Ce contrôle repose sur l'action coordonnée de deux systèmes musculaires (Figure 12) : les stabilisateurs locaux, qui sont des muscles profonds agissant directement sur la rigidité vertébrale (tels que le transverse de l'abdomen et le multifide), et les stabilisateurs globaux, des muscles plus larges contrôlant les mouvements d'ensemble du tronc et des membres (comme les obliques internes et externes, et le droit de l'abdomen) (Comerford & Mottram, 2001; Kiefer et al., 1997).

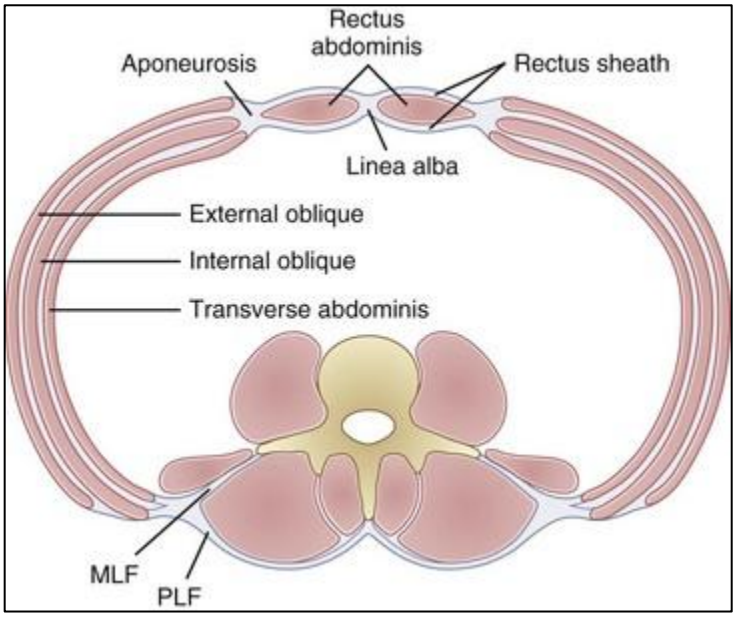


Figure 12 : Coupe transversale des muscles de l'abdomen
(https://musculoskeletalkey.com/anatomy-and-mechanics-of-the-abdominal-muscles/)

Alors que l'étude de la fonction des muscles du tronc dans le tir à l'arc semble pertinente, seulement deux études se sont intéressées à l'activation neuro-musculaire des muscles du tronc durant la pratique. Durant la phase de visée, les archers élites présentent une activation significativement plus élevée du transverse de l'abdomen et du multifide que les débutants (Azhar et al., 2021). De plus, l'indice de co-contraction entre ces deux muscles est également supérieur (Azhar et al., 2021), indiquant la création d'un bloc lombo-pelvien rigide qui sert de plateforme stable pour les mouvements des membres supérieurs.

Une étude sur le tir à l'arc traditionnel japonais, proche du tir à l'arc classique, confirme cette stratégie : les experts stabilisent leur tronc en engageant le transverse de l'abdomen, tandis que les novices, présentant une activation plus faible de ces derniers, compensent par une sur-sollicitation des obliques externes (Matsunaga et al., 2017).

Cette méthode de stabilisation utilisée par les archers novices ne semble pas optimale puisque les obliques externes sont des muscles moteurs puissants dont la fonction principale est de produire la rotation et l'inclinaison du tronc, alors que la fonction principale du transverse de l'abdomen est de générer de la stabilité en augmentant la pression intra-abdominale, ce qui rigidifie le rachis lombaire sans produire de rotation parasite.

2.1.2. Phase de suivi

2.1.2.1. Bras de corde

La phase de suivi est la période qui succède immédiatement à la décoche de la flèche. La décoche provoque une rupture brutale de l'équilibre du système créé par la force de traction sur la corde et la force de poussée exercée sur l'arc. Le mouvement lors de la phase de suivi est réactionnel et passif. Libérée de la résistance de l'arc, la scapula achève sa course par une brève et rapide rétraction. Cette impulsion finale entraîne l'ensemble de la chaîne du membre supérieur (humérus, radius, ulna) vers l'arrière. La main, toujours alignée avec l'avant-bras, est alors projetée le long du cou, sa trajectoire constituant le prolongement direct de la ligne de force établie pendant la visée.

La phase de suivi représente la continuation contrôlée du geste moteur, essentielle pour garantir une sortie de flèche sans perturbation. La maîtrise de cette phase distingue nettement l'archer élite du novice. Chez les experts (Figure 13), la contraction du muscle extenseur des doigts intervient plus rapidement après le signal du clicker (100ms contre 200 ms), et dure moins longtemps (Ertan et al., 2003).

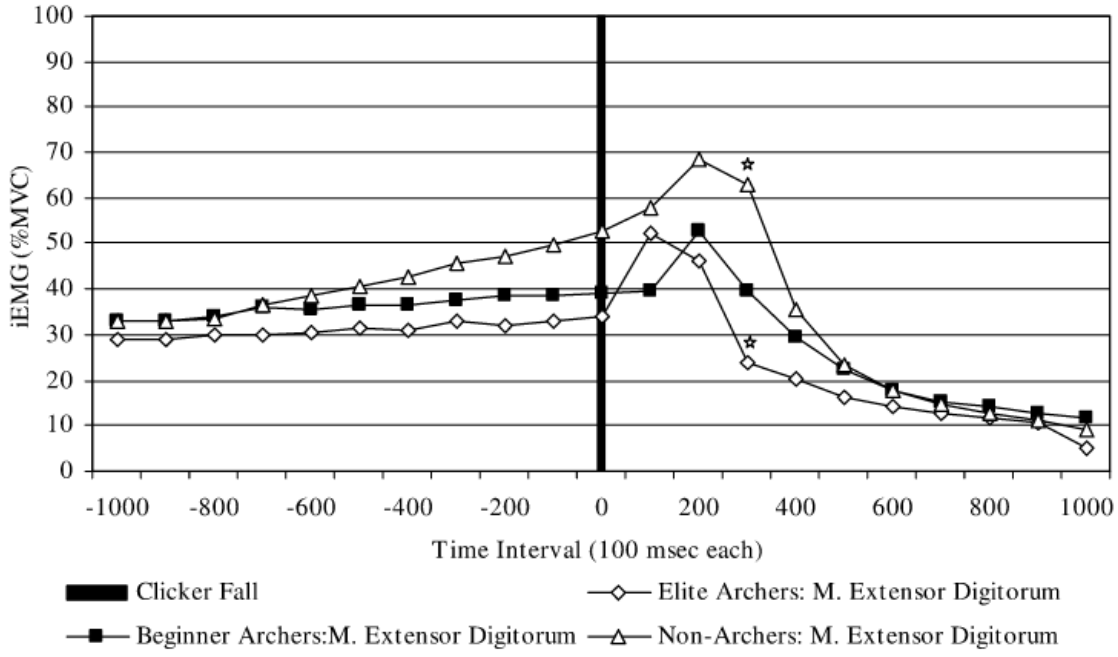


Figure 13 : Activation du muscle extensor digitorum chez trois groupes de niveau différents (Ertan et al., 2003)

Cette efficacité se double d'une économie d'effort : le muscle fléchisseur superficiel des doigts est significativement moins activé chez les archers élites (Baifa et al., 2023; Ertan et al., 2003), ce qui prévient toute crispation parasite sur la corde. Cette stratégie de relaxation s'étend à l'ensemble du bras de corde, comme en témoigne l'activité du deltoïde postérieur. Une activité plus faible de ce muscle durant le suivi est directement corrélée à un meilleur score : Tinazci, (2011) a observé des activations moyennes de 31,6% (score de 8), 30,6% (score de 9) et 29,7% (score de 10). Ainsi, le suivi d'un archer expert se caractérise par une orchestration neuromusculaire efficiente : une contraction brève et explosive des extenseurs, une inhibition des fléchisseurs, et une relaxation rapide des muscles de l'épaule pour ne pas perturber la trajectoire de la flèche.

2.1.2.2. Bras d'arc

La décoche n'est pas une action initiée par le bras d'arc, mais un événement qu'il subit. La libération soudaine de la corde par le bras de corde supprime instantanément la force de compression qui maintenait la structure osseuse en charge. Le mouvement du bras d'arc qui s'ensuit, généralement vers l'avant et/ou légèrement vers le bas, est une réaction passive et inertielle, et non une action volontaire.

L'analyse neuromusculaire du bras d'arc durant le suivi reste un domaine peu exploré, une seule étude s'y étant consacrée sans toutefois la relier à la performance (Kolayiş & Ertan, 2016).

L'analyse temporelle de l'activité musculaire du bras d'arc montre une diminution rapide et significative de l'activation du deltoïde (médian et postérieur) et du trapèze (médian et inférieur) immédiatement après la décoche (Kolayiş & Ertan, 2016). Cependant, cette relaxation n'est pas un effondrement passif, puisque le niveau d'activité résiduel maintenu suggère une fonction de contrôle actif pour stabiliser le mouvement de l'arc après la libération de la flèche.

2.1.2.3. Muscles du tronc

L'analyse des muscles du tronc lors de la phase de suivi révèle les mêmes résultats que lors de la phase de visée. En effet, les archers élites démontrent une activation significativement plus élevée des muscles profonds du tronc, essentiels au maintien de la posture. Azhar et al. (2021) rapportent ainsi une activation du transverse de l'abdomen de 30,02% chez l'élite contre 8,75% chez les débutants, et de 18,82% pour le multifide contre 8,87%. Cette plus grande activité reflète une stratégie de stabilisation active et contrôlée.

Pour accentuer cette rigidité post-décoche, le bloc lombo-pelvien maintient une rigidité élevée. L'indice de co-contraction entre le transverse de l'abdomen et le multifide, qui est un marqueur clé de la stabilité du tronc, est également significativement supérieur chez les archers élites (25,88%) par rapport aux archers novices (10,42%) (Azhar et al., 2021). Cette co-contraction assure non seulement une base stable pour le mouvement des bras, mais elle contribue aussi à absorber et à stabiliser les forces résiduelles générées par la libération de la flèche, évitant ainsi des perturbations qui pourraient impacter le départ de la flèche et la précision finale.

Il est également pertinent d'intégrer dans cette section les résultats de l'étude de Matsunaga et al. (2017) décrits dans le paragraphe 2.2.1.3. Ces auteurs, n'ayant pas distingué les phases spécifiques du tir dans leur analyse de l'activité musculaire du tronc, fournissent néanmoins des informations précieuses sur l'implication globale de ces muscles pour la performance, complétant ainsi notre compréhension de la stabilisation grâce aux muscles du tronc, essentielle au tir à l'arc.

2.2. Le contrôle postural

2.2.1. Fondements et mécanismes de régulation

Le contrôle postural est la capacité dynamique à maintenir et à rétablir activement la position du corps en s'appuyant sur les informations sensorielles (J. Paillard, 1971). Ce processus s'adapte en permanence à l'organisation du corps et aux contraintes externes qui lui sont appliquées.

Le système postural détecte les changements de posture par rapport à une référence en combinant des informations issues de diverses sources, qui sont à la fois complémentaires et partiellement redondantes (Nashner & McCollum, 1985). Les trois principales entrées sensorielles utilisées par le système nerveux central (SNC) sont les entrées visuelles, vestibulaires et somatosensorielles.

La vision est un sens clé pour la régulation posturale, car elle fournit des informations sur la position du corps et les mouvements de l'environnement grâce à ses systèmes central (ancrage spatial) et périphérique (détection de mouvement). Il est établi que la présence d'informations visuelles permet de réduire les oscillations posturales (Black et al., 1982). Cependant, cette dépendance à la vision tend à diminuer avec l'expertise sportive, les athlètes entraînés apprenant à se fier davantage à leurs sensations proprioceptives (T. Paillard, 2017).

Les afférences somatosensorielles informent le SNC de la position et du mouvement des segments corporels grâce à une multitude de récepteurs situés dans les muscles (fuseaux neuromusculaires), les tendons (organes tendineux de Golgi), les articulations et la peau. Parmi celles-ci, les informations cutanées provenant de la plante des pieds sont particulièrement cruciales pour l'équilibre, car elles permettent au SNC de délimiter la base de sustentation en contact avec le sol. L'importance de ces afférences plantaires est confirmée par le fait que leur perturbation augmente les oscillations posturales (Do et al., 1990) tandis que leur stimulation tend à les réduire (Bernard-cemanze et al., 2004; Palluel et al., 2008).

Le système vestibulaire, situé dans l'oreille interne, informe le SNC de la position et des mouvements de la tête dans l'espace (Berthoz, 2001) en détectant les accélérations linéaires (via le système otolitique) et angulaires (via les canaux semi-circulaires). Bien que sa contribution au contrôle postural statique soit limitée chez le sujet sain en raison de seuils de sensibilité élevés (Fitzpatrick & McCloskey, 1994), son importance est cruciale lorsque d'autres entrées sensorielles sont perturbées. Les études sur des patients atteints de lésions vestibulaires le confirment : une lésion, même unilatérale, provoque une augmentation des oscillations (Borel et al., 2002; Nashner & McCollum, 1985), démontrant le rôle prépondérant du système vestibulaire dans la stabilisation de ce segment.

En se basant sur ces différentes informations, le SNC régule la posture via trois modes de contrôle. Le contrôle en boucle ouverte envoie une commande motrice sans retour d'information, tandis que la boucle fermée utilise le « *feedback* » sensoriel pour corriger l'erreur en temps réel. Pour optimiser ce processus, un contrôle proactif anticipe les conséquences du mouvement. Les ajustements posturaux anticipés (APA) ont pour fonction de préparer le corps

au déséquilibre qui sera engendré par un mouvement volontaire, afin d'en minimiser l'impact sur la posture globale (Massion, 1992).

De manière générale, les athlètes experts développent un contrôle postural autonome, leur permettant de maintenir une stabilité similaire même en conditions difficiles. Cette automatisation du contrôle postural, caractéristique de l'expertise, requiert moins d'effort cognitif (Vuillerme & Nougier, 2004). Par conséquent, les experts peuvent allouer davantage de leurs ressources attentionnelles à la réalisation de la tâche sportive principale.

D'autres sports requièrent une bonne gestion du contrôle postural pour effectuer une tâche de précision, comme le biathlon et le tir sportif. La plus grande difficulté du tir debout en biathlon, qui se traduit par un taux d'erreur supérieur à celui du tir couché (Heinrich et al., 2020; Tharion et al., 1997), s'explique principalement par le contrôle postural requis par cette position. Il est ainsi bien établi dans la littérature que la capacité à minimiser les oscillations posturales est un prédicteur important de la performance, les tireurs de haut niveau étant significativement plus stables que les novices (Aalto et al., 1990; Ihalainen et al., 2016; Niinimaa & McAvoy, 1983; Sattlecker et al., 2014a, 2017). Cette stabilité est généralement quantifiée par l'analyse du centre de pression (CdP), dont l'amplitude et la vitesse des déplacements sont considérées comme des indicateurs de la qualité du contrôle postural (T. Paillard & Noé, 2015).

Plusieurs études ont cherché à identifier les variables posturales les plus discriminantes du niveau de performance juste avant le tir. Il a été démontré que la vitesse moyenne de déplacement du CdP est le prédicteur le plus puissant de la performance (Sattlecker et al., 2017). De manière plus spécifique, le contrôle du déplacement dans l'axe antéro postérieur (perpendiculaire à la ligne de tir) durant la dernière seconde s'avère déterminant, les athlètes de niveau international montrant une stabilité supérieure dans cette direction par rapport aux athlètes nationaux (Ihalainen et al., 2016; Sattlecker et al., 2014a). Enfin, la stabilité dans l'axe médio-latéral (parallèle à l'axe de tir) est également un facteur clé, étant fortement liée au pourcentage de réussite (Ihalainen et al., 2018).

2.2.2. Le contrôle postural en tir à l'arc

2.2.2.1. Phase de visée

Le contrôle postural est un pilier fondamental de la performance en tir à l'arc, la littérature scientifique s'accordant sur le fait qu'une plus grande stabilité posturale, quantifiée par l'analyse du CdP, est un marqueur distinctif des archers élites (Keast & Elliott, 1990; Sarro et al., 2021; Spratford & Campbell, 2017; Taha, Haque, et al., 2017; Tinazci, 2011; Zawi & Mohamed, 2013). Plusieurs études convergent pour montrer qu'une réduction des oscillations du CdP

durant la phase de visée est directement corrélée à un meilleur score. Plus précisément, une faible amplitude de déplacement dans l'axe antéro-postérieur (perpendiculaire à la cible) (Sarro et al., 2021), une longueur totale de déplacement du CdP plus faible (Sarro et al., 2021), ainsi qu'une diminution de l'amplitude et de la vitesse de déplacement dans l'axe du tir (Tinazci, 2011), sont identifiées comme des indicateurs de haute performance.

Au-delà de la simple réduction des oscillations posturales, la littérature suggère une stratégie de coordination plus complexe : les tirs les plus performants se distinguent par une synchronisation entre l'équilibre postural dans l'axe parallèle au tir, et la stabilité de l'arc dans l'axe parallèle au tir et dans l'axe vertical. Cette synergie est absente des tirs de moins bonne qualité (Sarro et al., 2021).

Cette importance du contrôle postural est d'ailleurs confirmée par d'autres approches instrumentales, notamment l'utilisation de centrales inertielles qui montrent également une meilleure stabilité posturale chez les archers les plus performants (Taha, Haque, et al., 2017). Ainsi, la maîtrise posturale durant la phase de visée ne se résume pas à une immobilité parfaite, mais à un contrôle dynamique minimisant les oscillations dans les axes critiques et développant une coordination fine entre le corps et l'arc.

2.2.2.2. Phase de suivi

L'importance du contrôle postural ne s'arrête pas à la décoche, elle se prolonge de manière déterminante dans la phase de suivi, qui révèle la qualité de la libération de la flèche. Il a été démontré qu'une vitesse d'oscillation maximale plus élevée après le lâcher est négativement corrélée à la performance, les archers présentant une oscillation minimale obtenant les meilleurs scores (Spratford & Campbell, 2017). Cette variable s'est même avérée être un prédicteur plus puissant de la performance que le TRC et la force de traction combinés, pouvant expliquer une variation de score allant jusqu'à 3,8 points (Spratford & Campbell, 2017). Ce phénomène peut s'expliquer par une forte corrélation ($r = 0,80$) entre la vitesse d'oscillation au moment de la décoche et celle atteinte immédiatement après : un suivi instable reflète ainsi directement une libération perturbée et un contrôle postural déficient au moment du tir.

Cette instabilité post-tir se manifeste différemment selon le niveau de pratique. Les archers débutants présentent notamment des déplacements posturaux antéro-postérieurs beaucoup plus importants que les archers élites, qui parviennent à mieux maîtriser cette perturbation (Simsek et al., 2019). Biomécaniquement, cette différence provient de la réaction du corps à la libération soudaine de la force de traction, que seuls les archers les plus expérimentés parviennent à anticiper et à neutraliser efficacement. Ainsi, un balancement postural incontrôlé durant cette

phase dégrade la stabilité durant les dernières millisecondes critiques où la flèche est encore en contact avec l'arc, empêchant l'archer d'atteindre son meilleur score possible.

2.3. L’organisation segmentaire

L'organisation neuromusculaire adoptée par l'archer a pour but de positionner les segments du membre supérieur dans une configuration cinématique à la fois stable et efficace, limitant ainsi les perturbations involontaires. Plusieurs études ont montré que l'angle d'abduction de l'épaule du bras de corde est un paramètre clé dans cette recherche d'optimisation de la performance. Par exemple, lors d'une simulation de la phase de visée, il a été démontré qu'un angle d’abduction de 90 degrés minimise le tremblement du bras par rapport à des angles plus élevés de 100 ou 110 degrés (Lin et al., 2010). Cette recherche de stabilité se reflète dans la pratique, puisque les archers élites adoptent en moyenne un angle d'abduction de l'épaule plus fermé (99,0°) que les débutants (107,2°) (Shinohara & Urabe, 2018). Ce résultat met en lumière le lien entre l’organisation segmentaire et la stabilité, et montre son importance dans la performance.

Cette tendance à une configuration plus compacte et contrôlée chez les experts se retrouve également au niveau du coude, où ils utilisent un angle de flexion significativement moins important (138,3°) que les novices (143,6°) (Shinohara & Urabe, 2018).

Cette posture plus « fermée » au niveau de l'épaule et moins fléchie au niveau du coude pourrait s’expliquer par une distribution plus efficace de la force requise pour tirer la corde, qui serait alors majoritairement supportée par les puissants muscles du dos et du tronc plutôt que par les muscles plus petits et plus fatigables du bras. Cette approche favorise un meilleur alignement du système arc-flèche et réduirait les contraintes articulaires, conduisant ainsi à une plus grande stabilité et à une meilleure reproductibilité du geste. En conclusion, la configuration cinématique adoptée par l'archer élite représente une adaptation fonctionnelle visant à réduire les instabilités physiologiques comme le tremblement, en privilégiant des angles articulaires qui optimisent le contrôle moteur et l'économie d'effort.

2.4. Les stratégies temporelles

2.4.1. Le temps de réaction au clicker

Le clicker est un dispositif mécanique, généralement une fine lame de métal ou de carbone, fixé sur la poignée de l'arc. La pointe de la flèche est positionnée sous cette lame. Lorsque l'archer atteint sa pleine allonge, la pointe est tirée au-delà de la lame, qui se relâche et vient frapper la poignée de l'arc, produisant un son « clic » distinct.

Le TRC (temps de réaction au clicker) est défini comme la latence entre le signal sonore et la réponse motrice de l'archer. Cette mesure quantifie la rapidité de l'archer à exécuter la décoche, un processus déclenché par le clicker pour optimiser le tir en minimisant le temps passé sous une tension maximale.

Lorsque la flèche fait tomber le clicker, le son du « clic » est converti en impulsion nerveuse par l'oreille et transmis au cortex auditif du cerveau. De là, le signal est traité par les aires motrices, où il est identifié comme le déclencheur de la décoche. Chez un archer expert, ce traitement est un réflexe conditionné quasi instantané. Le cortex moteur envoie alors la commande finale, qui descend le long de la moelle épinière et des nerfs pour atteindre les muscles de l'avant-bras (Latash, 2008). La dernière étape est l'action musculaire elle-même : une orchestration précise où les muscles fléchisseurs sont inhibés pendant que les muscles extenseurs se contractent activement pour ouvrir la main (Ertan et al., 2003). La durée totale de cette chaîne, de l'oreille aux doigts, correspond au temps de réaction, et sa brièveté est donc une mesure directe de l'efficacité du geste de l'archer.

Le TRC a été étudié à quatre reprises dans la littérature scientifique qui s'intéresse à la performance au tir à l'arc. Il a été démontré que les archers expérimentés réagissaient au son du clicker en contractant l'extenseur commun des doigts et en relâchant le fléchisseur superficiel des doigts plus rapidement que les non-archers (Ertan et al., 2003). De plus, Spratford & Campbell (2017) ont identifié le TRC comme un indicateur de performance, en expliquant que sa variation équivaut à une variation de 0,54 point sur le score.

Le TRC a également été étudié en termes de variabilité intra-sujet sur plusieurs tirs, de meilleures performances étant associées à une valeur plus faible de la variabilité du CRT (Callaway et al., 2017; Heller, 2012). Les deux études n'ont porté que sur des athlètes expérimentés et ont effectué une analyse de régression linéaire multiple pour identifier les facteurs influant sur la performance. Cette relation peut notamment être expliquée par le fait qu'un temps de réaction plus court réduit le temps pendant lequel des erreurs de visée peuvent survenir, mais également par le fait que la réaction au clicker est devenue automatique chez des archers avec une plus grande expertise.

Ce temps de réaction ne peut cependant pas être réduit indéfiniment. En effet, même pour un stimulus attendu et une réponse connue à l'avance, un temps de traitement incompressible est nécessaire à la prise de décision (Hick, 1952).

2.4.2. La durée de la phase de visée

La durée de la phase de visée est un paramètre temporel dont l'impact sur la performance en tir à l'arc est à la fois crucial et débattu dans la littérature scientifique. Cette phase représente un compromis complexe entre la nécessité d'un temps suffisant pour un alignement précis et le risque de dégradation de la stabilité due à la fatigue et au tremblement physiologique. La majorité des études converge vers une corrélation négative, où une phase de visée plus courte est associée à de meilleurs scores (Sarro et al., 2021; Taha, Haque, et al., 2017; Tinazci, 2011).

Cette conclusion est soutenue par l'observation que le maintien prolongé d'une contraction isométrique tend à intensifier le tremblement des membres (Gottlieb & Lippold, 1983), ce qui peut perturber la stabilité de l'archer et de l'arc et par conséquent réduire la précision du tir. A cet égard, Sarro et al. (2021) ont montré qu'un temps de visée moyen de 2,07 secondes était observé pour les tirs les plus performants, contre 3,55 secondes pour les moins performants. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt d'une exécution rapide et automatisée du geste permettant de limiter l'influence de la fatigue neuromusculaire et des fluctuations posturales sur la performance.

Cependant, ce consensus est remis en question par d'autres travaux qui ont trouvé des résultats inverses, suggérant qu'une phase de visée plus longue pourrait, au contraire, favoriser la performance (Callaway et al., 2017). Également, Tinazci (2011) a observé, chez quatre archers élite, des profils contrastés : deux d'entre eux obtenaient de meilleurs scores lorsque la durée de visée était prolongée, tandis que les autres archers performent davantage avec une visée plus courte. Ces différents résultats suggèrent que la durée idéale de la visée n'est probablement pas universelle, mais plutôt une stratégie individualisée qui dépend de chaque archer.

Une visée plus longue pourrait permettre à un athlète de mieux percevoir et corriger les micro-oscillations ou d'atteindre un état de stabilité optimal avant la décoche. Cette divergence dans les résultats indique que la relation entre le temps de visée et la précision est complexe. Elle dépend probablement de la capacité de l'archer à gérer efficacement la fatigue musculaire et le contrôle postural pendant cette fenêtre temporelle, justifiant ainsi des investigations supplémentaires pour mieux comprendre les stratégies temporelles individuelles.

2.5. Les paramètres physiologiques et psychologiques

2.5.1. Les paramètres physiologiques

L'influence des paramètres physiologiques comme la fréquence cardiaque, sur la performance en tir à l'arc, présente des résultats nuancés. Plusieurs études sur des archers élites n'ont trouvé aucune corrélation significative entre la fréquence cardiaque et le score (Açıkada et al., 2019;

Keast & Elliott, 1990; Salazar et al., 1990; Taha, Muazu Musa, et al., 2017). Cependant, une distinction apparaît lorsque les niveaux de compétence sont comparés, les archers experts présentent une fréquence cardiaque plus faible que les novices (Clemente et al., 2011).

Un autre paramètre qui apparaît pertinent, mais encore peu exploré par la littérature à ce jour, concerne l'effet de la respiration sur la cinématique du haut du corps. Une seule étude a montré que le schéma respiratoire influence significativement la performance de tir, surtout au moment du lâcher (Mohamed et al., 2014). L'expansion de la cage thoracique causée par la respiration pourrait en effet avoir un impact sur la cinématique du haut du corps de l'archer. Ce phénomène mérite une investigation approfondie pour mieux comprendre son rôle dans la performance des archers.

2.5.2. Les facteurs psychologiques

La maîtrise psychologique constitue également un facteur déterminant de la performance en tir à l'arc, en particulier chez les athlètes de haut niveau, où les différences techniques sont minimes. La capacité à exécuter un geste d'une grande précision sous une pression compétitive intense dépend étroitement de la force mentale de l'athlète (Chen & Hung, 2010; Robazza et al., 1998). Une étude hiérarchique menée sur des archers élites coréens a démontré que les facteurs psychologiques pesaient plus lourds que les facteurs techniques et physiques dans la prédiction de la performance (Kim et al., 2015). Au sein de cette dimension, la confiance en soi, définie comme la conviction de l'athlète en sa propre capacité à réussir, a été identifiée comme le facteur le plus déterminant.

Viennent ensuite la concentration, soit la capacité à maintenir son attention sur les aspects pertinents du tir tout en ignorant les distractions, et le contrôle émotionnel, qui permet de gérer l'anxiété compétitive (Kim et al., 2015). D'autres études confirment que la stabilité attentionnelle et un haut niveau de confiance constituent des caractéristiques distinctives des archers les plus performants, particulièrement dans les situations de haute pression comme les phases de duels (D. Wang et al., 2022). La capacité à maintenir un état psychologique optimal, souvent soutenue par des routines de préparation mentale, apparait ainsi comme une condition essentielle pour traduire la maîtrise technique en succès compétitif (Kim et al., 2021).

2.6. Conclusion

Bien que l'influence des paramètres physiologiques et psychologiques sur la performance soit avérée, ces aspects ne feront pas l'objet d'une analyse approfondie dans notre travail. Les évaluations de la fréquence cardiaque montrent des corrélations trop nuancées pour être un indicateur fiable. Quant aux facteurs psychologiques, bien que leur rôle soit reconnu comme

essentiel, ils constituent un champ d'étude à part entière et hors du périmètre de notre travail. Le présent travail se concentrera sur les paramètres cinématiques, neurophysiologiques, posturaux et temporels de la performance en tir à l'arc.

Cette vue d'ensemble démontre que la performance en tir à l'arc est le fruit d'une interaction complexe entre de multiples systèmes. Quatre domaines interconnectés émergent comme les piliers de l'exécution motrice et formeront le cœur de notre analyse approfondie : la cinématique des segments, qui assure le mouvement nécessaire à la réalisation sportive ; l'activité neuromusculaire, qui permet le déplacement et l'alignement des segments ; la stabilité posturale, qui constitue le socle indispensable à la précision ; et enfin, les stratégies temporelles, qui organisent dans le temps l'exécution motrice basée sur les trois premiers paramètres.

3. Les méthodologies d'analyse de la performance en tir à l'arc

3.1. L'évaluation des différentes dimensions de la performance

3.1.1. Les études uni-dimensionnelles

La littérature sur la performance en tir à l'arc révèle une tendance à examiner les facteurs de manière isolée. Ainsi, de nombreuses études se sont focalisées sur une dimension unique pour caractériser la performance, qu'il s'agisse de l'activité neuromusculaire (Baifa et al., 2023; Clarys et al., 1990; Ertan, 2009; Ertan et al., 2003, 2005; Kolayiş & Ertan, 2016; Nishizono et al., 1987; Simsek et al., 2018; Soylu et al., 2006), du contrôle postural (Simsek et al., 2019; Suppiah et al., 2017; Zawi & Mohamed, 2013), de la cinématique des membres supérieurs, (Lin et al., 2010; Stuart & Atha, 1990) ou encore des stratégies temporelles (Callaway et al., 2017; Heller, 2012). Bien que ces travaux apportent des connaissances précieuses sur l'influence spécifique de chaque paramètre, ils ne permettent pas de saisir les interactions et les synergies entre ces différents aspects qui, ensemble, déterminent la performance globale en tir à l'arc.

3.1.2. Les études multidimensionnelles

Dans d'autres sports, les interactions entre les paramètres ont été évaluées, par exemple en biathlon, ou la partie « tir » requiert également de la précision. La logique interne de ce sport est guidée par l'interaction entre différents déterminants de la performance, où l'état physiologique de l'athlète influence directement sa maîtrise biomécanique. La littérature scientifique montre de manière unanime que la fatigue induite par l'effort intense du ski a un impact négatif et quantifiable sur la stabilité posturale du tireur. Des études ont mesuré une augmentation de l'amplitude du déplacement du CdP de 57% et de sa vitesse de 65% après un effort à haute intensité (Sadowska et al., 2019). Au-delà de ce simple lien de cause à effet, il a

été aussi établi une forte corrélation entre la stabilité posturale et la stabilité de l'arme : le déplacement du CdP dans l'axe du tir est directement corrélé au balancement vertical de la carabine, surtout en état de fatigue (Sadowska et al., 2019). Ainsi, la compréhension de la performance en biathlon passe essentiellement à travers cette cascade d'interactions (la fatigue dégradant la stabilité posturale, qui, à son tour, influence la stabilité de l'arme). Cet exemple met en évidence que les résultats au tir sont dépendants des contraintes internes ou externes imposées à l'athlète.

Les interactions entre paramètres de performance existent aussi dans d'autres domaines que les sports de précision, comme au tennis, où la fatigue a un effet sur plusieurs autres paramètres, comme la vitesse de service (Lambrich & Muehlbauer, 2025). En volleyball, la fatigue affecte les composantes de la perception visuelle, de la concentration et du temps de réaction chez les joueuses professionnelles (Valayi et al., 2024).

Ces exemples issus de divers contextes sportifs soulignent l'interdépendance des facteurs de performance, renforçant l'idée qu'une approche isolée est insuffisante pour la compréhension globale de la performance sportive.

En tir à l'arc, il existe des études multifactorielles, mais qui ont uniquement utilisé un modèle de régression linéaire pas à pas pour définir les paramètres de performance (Callaway et al., 2017; Spratford & Campbell, 2017). De plus, ces travaux n'ont pas toujours couvert l'ensemble des principaux indicateurs clés d'une performance complète. Par exemple, Callaway et al., (2017) se sont concentrés sur la vitesse de la flèche, les durées des différentes phases du tir et le TRC. Quant à Spratford & Campbell (2017), leur analyse a porté sur des variables de stabilité posturale avant et après le lâcher de la flèche, la force de traction, le temps de vol, la longueur de la flèche et le TRC. Malgré leur approche multifactorielle, aucune de ces études n'a intégré simultanément toutes les dimensions fondamentales que sont le contrôle postural, la cinématique des membres supérieurs, l'activité neuromusculaire et les stratégies temporelles.

À notre connaissance, en tir à l'arc, seule l'étude de Tinazci (2011) a adopté une approche multidimensionnelle en analysant simultanément l'activité neuromusculaire de 4 muscles, le contrôle postural, le mouvement de l'arc, le TRC, et la durée de la visée.

Les résultats ont mis en évidence des corrélations entre ces différentes mesures et le score de performance. Par exemple, l'étude a montré que les archers élites ont une réduction des vitesses (5.0 mm/s contre 4.3 mm/s) et amplitudes (31,7 mm contre 16,7 mm) de déplacement du CdP sur l'axe médio latéral (parallèle au tir) durant la visée lors des meilleurs scores par rapport aux moins bons, indiquant une meilleure stabilité posturale lors des meilleures performances. Concernant l'activité musculaire, Tinazci (2011) a notamment observé une activité réduite du

deltoïde postérieur chez les archers les plus performants durant la phase de suivi (31,6 % contre 29,7 %), ainsi qu'une activité réduite du fléchisseur des doigts chez les archers les plus performants durant la phase de visée (85, 6% contre 80,0 %). Ces deux résultats suggèrent des stratégies de relaxation musculaire qui sont efficaces, puisque associées à des meilleures performances. Pour la durée de la phase de visée, deux des quatre archers mesurés sont meilleurs lorsqu'elle est plus longue, à l'inverse d'un autre archer, meilleur lorsqu'elle est plus courte.

Cependant, la portée de cette étude reste limitée par sa méthodologie. Elle repose notamment sur un échantillon très restreint de seulement quatre archers et trente tirs chacun, ce qui affecte la généralisation des résultats. De plus, bien qu'elle mesure simultanément plusieurs dimensions, elle ne fait pas une analyse approfondie des interactions potentielles entre ces variables, ce qui pourrait améliorer la compréhension de la complexité du geste. Malgré ces limites, l'intérêt majeur de l'approche de Tinazci (2011) réside dans son protocole de mesure à plusieurs facteurs, qui ouvre la voie à la formulation d'hypothèses sur les liens entre les différentes dimensions de la performance.

Le fait d'étudier plusieurs dimensions de la performance en simultané peut aussi permettre de comprendre l'interaction entre ces différents paramètres. Sarro et al. (2021) ont étudié le lien entre le contrôle postural et la stabilité de l'arc, et ont montré un lien entre le contrôle postural dans l'axe médio latéral de l'archer et le déplacement de l'arc sur le même axe ainsi que sur l'axe vertical.

Ces observations méthodologiques montrent la nécessité de mener des études plus complètes, capables de quantifier la contribution spécifique de chaque paramètre, mais aussi de comprendre leurs interactions dynamiques au sein de la performance globale en tir à l'arc.

3.2. Modalités d'évaluation de la performance

3.2.1. La comparaison de groupes de différents niveaux

Une approche méthodologique dominante dans l'étude de la performance en tir à l'arc consiste à comparer des groupes d'athlètes de niveaux différents (élite, intermédiaire, novice). Cette méthode, utilisée par près de la moitié des 41 études incluses dans une récente revue de littérature (Vendrame et al., 2022), s'est avérée efficace pour identifier les tendances générales et les marqueurs clés qui différencient les niveaux de performance.

En opposant les caractéristiques des archers experts à celles d'archers moins expérimentés, les précédentes études ont pu observer des principes fondamentaux qui expliquent la performance en tir à l'arc. Ces comparaisons permettent de comprendre les stratégies et adaptations propres

à chaque niveau, donnant ainsi des outils précieux pour l'entraînement et l'optimisation de la performance.

Cependant, malgré son utilité pour comprendre les différences entre les divers niveaux de performance, cette approche comparative par groupes présente des limites. En se concentrant sur les moyennes de groupe, elle ne prend pas en compte la variabilité intra-individuelle ni les stratégies spécifiques que les archers peuvent développer. Si elle fournit une vision à grande échelle de la performance en comparant des niveaux très distincts, elle ne permet pas de différencier les nuances entre deux archers de niveau proche, ou même à analyser les fluctuations de performance chez un même archer au cours de ses tirs. Cette lacune souligne la nécessité d'approches complémentaires, capables d'analyser plus précisément les mécanismes qui expliquent des petites différences de performance.

3.2.2. L’analyse d’un seul niveau de population

Une autre approche courante dans la littérature se focalise sur l'analyse d'une seule population, quasi exclusivement de niveau élite. Plusieurs de ces travaux font partie des premières études sur le tir à l’arc, et visaient à caractériser des détails techniques fins. Par exemple, l’étude de Martin et al. (1990) a cherché à déterminer si la décoche résultait d'une simple relaxation des muscles fléchisseurs des doigts ou d'une contraction active des extenseurs chez 15 archers de haut niveau, et à identifier deux stratégies distinctes. 8 archers ont montré une relaxation des fléchisseurs-extenseurs juste avant la décoche, et 7 archers ont activé les extenseurs pour un lâcher forcé.

L’étude de Clarys et al. (1990) a analysé l’activité musculaire selon trois conditions : selon la distance de tir (18m, 25m, 50m, 70m, 90m), selon différentes prises de corde, et selon la présence ou non de stabilisateurs. Ces trois questions de recherches révèlent que l'activité musculaire au tir à l'arc ne varie pas linéairement avec la distance (ils ont observé un saut entre 25m et 50m), suggèrent que la prise avec le pouce est potentiellement la plus économique, et montrent qu'une pratique sans stabilisateurs peut réduire la fatigue et améliorer la précision à terme.

Une autre étude qui s’est focalisée uniquement sur une population élite a adopté une approche plus descriptive, en se focalisant sur l'évolution chronologique des paramètres plutôt que sur leur lien direct avec la performance en comparant plusieurs indicateurs du contrôle postural au fil des différentes phases du tir (Kolayiş & Ertan, 2016). Pour le bras de corde, les muscles deltoïde moyen et deltoïde postérieur ont montré une activité plus faible pendant la phase de décoche que pendant les phases de pleine allonge et de visée. L’activité des muscles trapèze

moyen et trapèze inférieur du bras de corde est plus élevée pendant la visée, tandis que les deltoïde médian, deltoïde postérieur, trapèze médian et trapèze inférieur du bras d'arc présentent une activité plus basse lors de la décoche.

Cependant, bien que ces études sur des populations de niveau élite soient précieuses, des limites méthodologiques peuvent inviter à la prudence quant à l'interprétation de leurs résultats. Sarro et al. (2021) ont fait le lien entre les paramètres biomécaniques et le score sur la base de critères discutables. Ils ont comparé uniquement le meilleur et le plus mauvais tir de huit archers, une méthode qui, bien qu'innovante, ne protège pas contre l'analyse de cas extrêmes pouvant être des exceptions statistiques plutôt que des tirs représentatifs.

Également, une limite fréquente dans la littérature concerne le critère de définition des populations étudiées. Par exemple, Zawi & Mohamed (2013) ont qualifié d'archers « d'élite » des athlètes dont le niveau correspondrait en France à un classement national modeste (autour de la 400ème position). Cet exemple montre qu'il est pertinent de se questionner sur la généralisation des conclusions à l'élite mondiale.

D'autres travaux, bien que robustes, se sont concentrés sur l'établissement de modèles de performance globaux sans toujours détailler les mécanismes intra-individuels qui expliquent la différence entre un bon et un mauvais tir pour un même athlète (Spratford & Campbell, 2017). Les auteurs ont identifié qu'un temps de réaction au clicker rapide, une force d'allonge élevée et une faible vitesse de balancement postural après la décoche, sont les principaux prédicteurs d'une meilleure performance au tir.

Cette hétérogénéité dans les méthodologies et la définition des populations souligne la difficulté à établir des conclusions solides sur les déterminants fins de la performance au sein même du plus haut niveau.

3.3. Les indicateurs de la performance

3.3.1. La valeur moyenne

Dans la grande majorité des études portant sur la performance en tir à l'arc, les indicateurs mesurés sont exprimés sous forme de valeurs moyennes. Cette approche consiste à moyenner les données recueillies pour un groupe donné, sur une plage temporelle définie par la méthodologie de l'étude, afin d'obtenir une mesure représentative d'un phénomène donné. Par exemple, l'activité neuromusculaire d'un muscle est souvent moyennée par périodes temporelles de 100ms (Ertan, 2009; Ertan et al., 2003; Simsek et al., 2018) , 1 seconde (Shinohara & Urabe, 2018; Tinazci, 2011), ou les phases entières (Azhar et al., 2021). De plus, ces données sont également moyennées sur un nombre de répétitions définies par la méthodologie.

L'intérêt principal de l'utilisation de la valeur moyenne est de dégager des tendances générales et de faciliter les comparaisons entre différents groupes d'archers (par exemple experts et novices) ou entre diverses conditions expérimentales (par exemple différentes distances de tir). Cependant, cette méthode, bien que fondamentale, présente des limites. En effet, la moyenne peut masquer des informations sur la dynamique interne du mouvement et sur les ajustements fins que l'archer effectue d'un instant à l'autre ou d'un tir à l'autre. Un archer peut avoir une excellente moyenne mais une grande variabilité de son geste, ce qui n'est pas idéal pour la performance. C'est pourquoi, comme nous allons le voir, il est préférable de compléter la simple valeur moyenne par un critère de variabilité.

3.3.2. Le critère de variabilité

Dans sa revue de littérature sur la performance en tir à l'arc, Vendrame et al. (2022) concluent que la maîtrise ne réside pas tant dans l'atteinte de valeurs moyennes optimales, mais plutôt dans la capacité à reproduire le geste avec une constance et une régularité extrême. La reproductibilité du geste, c'est-à-dire la capacité à le refaire à l'identique, est un élément clé pour distinguer les différents niveaux de pratique.

Deux études ont démontré que le meilleur prédicteur de la performance n'est pas le TRC moyen, mais sa faible variabilité d'un tir à l'autre (Callaway et al., 2017; Heller, 2012). Le coefficient de variation du TRC peut à lui seul expliquer jusqu'à 66% de la variabilité du score, là où la vitesse de réaction moyenne n'a pas d'influence significative (Heller, 2012).

Cette exigence de constance s'étend à l'ensemble de l'exécution motrice. Sur le plan neuromusculaire, le principal facteur discriminant la performance est la capacité à reproduire des schémas d'activation musculaire identiques à chaque tir (Clarys et al., 1990; Soylu et al., 2006). L'étude de Soylu et al. (2006) a calculé le « *variance ratio* » (VR), qui quantifie la répétabilité des formes d'onde et a été utilisé avec succès dans d'autres études sur l'électromyographie (EMG) (Granata et al., 2005). Pour cet indicateur compris entre 0 et 1, 0 indique exactement les mêmes formes d'onde alors que 1 correspond à la discordance des formes d'onde.

Ils ont évalué l'activité EMG des muscles extenseurs des doigts et fléchisseur superficiel des doigts du bras de corde chez trois groupes d'archers : non-archers, débutants, et élites. Leur analyse a porté sur la période entre 1500ms et 900ms avant la chute du clicker, pendant 12 flèches. Pour l'ensemble des flèches mesurées (sans prendre en compte le niveau de l'athlète), ils ont réalisé des corrélations entre le score et l'indice de répétabilité, qui se sont avérées significatives pour les deux muscles. De plus, lors de la comparaison entre les différents groupes

de niveau (Figure 14), cette répétabilité est significativement plus élevée chez les archers élites (VR de 0,12 pour l'extenseur et 0,13 pour le fléchisseur), dont les *patterns* EMG sont moins variables que ceux des non-archers (VR de 0,32 pour l'extenseur et 0,48 pour le fléchisseur).

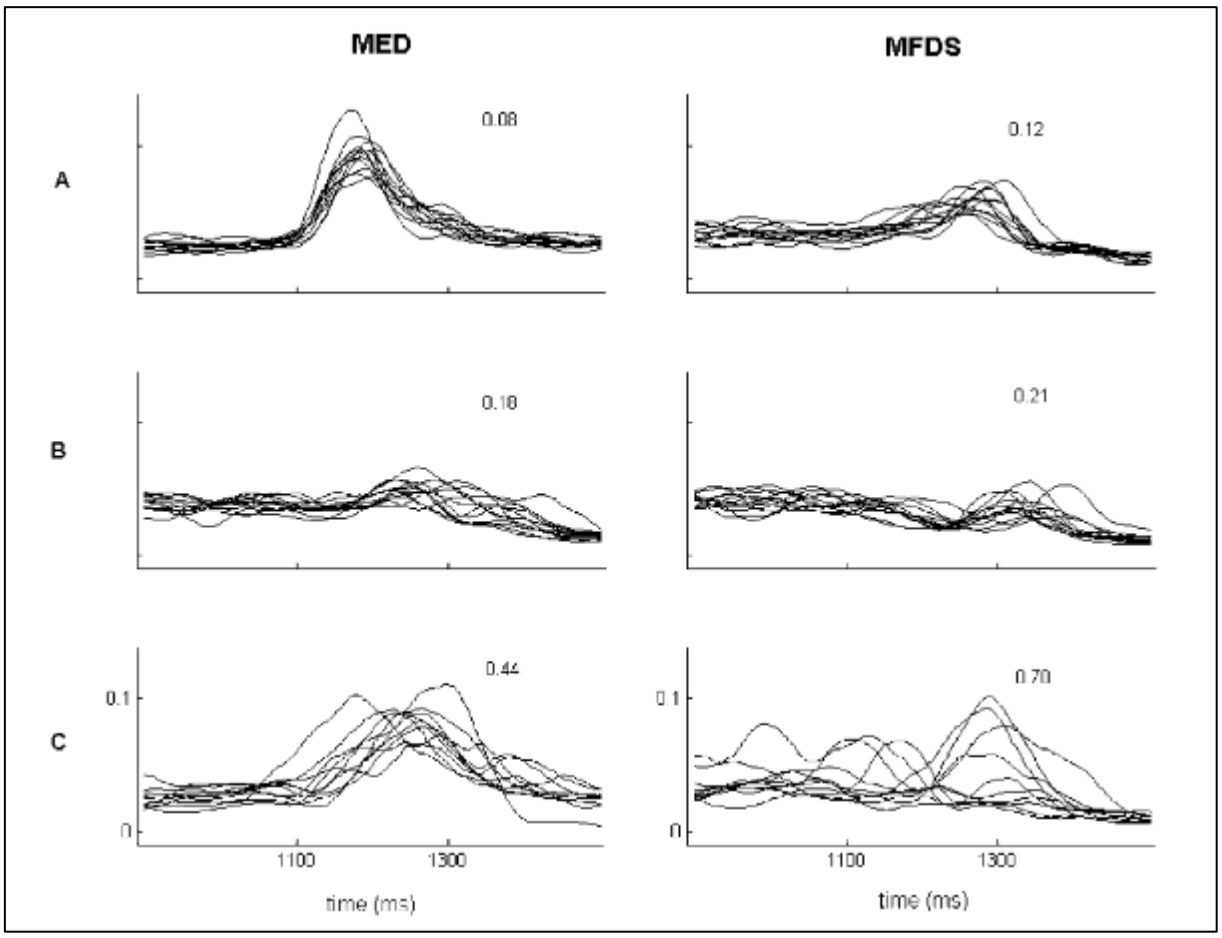


Figure 14 : Graphiques de l'enveloppe EMG de l'extenseur des doigts (MED) et du fléchisseur des doigts superficiel (MFDS) normalisée en fonction du temps pour un athlète élite (A), un débutant (B) et un non-archer (C) (Soylu et al., 2006)

Au niveau de la cinématique, l'analyse de l'avant-bras d'arc, confirme que les tirs les plus performants sont ceux qui présentent le plus haut degré de régularité dans leur séquence de mouvement (Quan et al., 2017).

Cependant, une étude sur la synergie posturale affine ce postulat (Serrien et al., 2018). Elle suggère que les meilleurs tirs ne sont pas ceux où le corps est parfaitement immobile, mais ceux où les micromouvements des différents segments se compensent mutuellement pour maintenir l'orientation de la flèche stable. La variabilité n'est donc pas seulement un « bruit » à minimiser, mais peut aussi être l'expression d'une stratégie de contrôle actif et dynamique. En somme, la littérature converge vers l'idée que l'expertise en tir à l'arc se manifeste par la capacité à

minimiser la variabilité non fonctionnelle pour produire un résultat constant, potentiellement en exploitant une synergie de micromouvements compensatoires.

3.4. L'individualisation

Le principe selon lequel des athlètes peuvent atteindre des performances similaires par des voies différentes trouve ses racines dans les travaux précurseurs de Bernstein (1967). Il a décrit le corps non pas comme un système exécutant un programme moteur unique, mais comme un ensemble de « degrés de liberté » qui s'auto-organise pour trouver une solution fonctionnelle. Cette individualisation de la performance s'observe dans de nombreux domaines, notamment en biomécanique et en physiologie.

En natation, par exemple, l'analyse biomécanique révèle une grande diversité de stratégies efficaces. Des nageurs élites peuvent adopter des trajectoires de main sous-marines très différentes, comme la classique forme en « S » ou une traction plus directe et profonde (« *deep catch* »), pour générer une propulsion équivalente (Barbosa et al., 2011). De même, la vitesse est souvent le fruit d'un compromis unique entre la fréquence et l'amplitude des mouvements, certains privilégiant une cadence rapide tandis que d'autres optent pour une nage plus ample, en fonction de leur profil de force et de leur morphologie (Figueiredo et al., 2013). Cette diversité montre qu'il n'existe pas de technique universellement supérieure, mais plutôt une solution optimale propre à chaque athlète.

Ce principe se vérifie également sur le plan physiologique. Une étude comparant deux marathoniens *recordmen* du monde a montré que, bien que leurs $\dot{V}O2max$ soient presque identiques, la différence clé résidait dans l'économie de course, bien meilleure chez l'un d'eux (Van Hooren & Lepers, 2023). Cette efficacité supérieure lui a permis de courir à la même vitesse en utilisant une fraction plus faible de sa capacité aérobie, illustrant parfaitement comment une qualité physiologique peut en compenser une autre pour atteindre un résultat presque similaire.

Ces exemples, issus de la biomécanique comme de la physiologie, démontrent qu'il n'existe pas de modèle unique de la performance, mais plutôt une multitude de solutions optimales propres à chaque athlète. Ce principe de l'individualisation se vérifie en tir à l'arc. Une revue de littérature de Vendrame et al. (2022) conclut que les athlètes experts tendent à développer des stratégies personnelles, notamment en termes d'activation musculaire et de gestion du temps. De plus, Tinazci (2011) a montré que la phase de visée était corrélée au score pour 3 archers élite, dont deux d'entre eux sont meilleurs lorsqu'elle est plus longue, à l'inverse d'un autre archer, meilleur lorsqu'elle est plus courte.

Les meilleurs archers sont capables d'adapter leur geste technique à leurs propres caractéristiques internes, comme leur morphologie et leur mobilité, ce qui leur permet non seulement de bien gérer les éléments extérieurs, mais aussi de tirer de façon régulière. Ces perspectives remettent en question la recherche d'une « technique parfaite » universelle et soulignent l'importance d'étudier les variations inter-individuelles pour une compréhension complète de l'expertise.

3.5. Les différences de protocoles et d'outils de mesure

Dans les différentes études sur la performance au tir à l'arc, il y a une grande diversité de protocoles de mesures (Vendrame et al., 2022). Au niveau des outils de mesure : la durée des phases et la configuration corporelle sont ainsi mesurées par des systèmes de capture du mouvement (T.-W. Kim et al., 2021; Lin et al., 2010; Stuart & Atha, 1990), des caméras 2D (Callaway et al., 2017; Sarro et al., 2021; Tinazci, 2011) ou des centrales inertielles (Taha, Haque, et al., 2017). Les oscillations de l'archer et de l'arc sont mesurées via des plateformes de force (Keast & Elliott, 1990; Sarro et al., 2021; Simsek et al., 2019; Spratford & Campbell, 2017; Tinazci, 2011), des systèmes optoélectroniques (T.-W. Kim et al., 2021) ou des centrales inertielles (Taha, Haque, et al., 2017; Zawi & Mohamed, 2013). Enfin, le TRC a été mesuré par des microphones (Callaway et al., 2017; Heller, 2012; Spratford & Campbell, 2017), ou encore un interrupteur mécanique (Ertan et al., 2003).

Les études sur le tir à l'arc présentent une très grande variété de conditions expérimentales. Par exemple, la plupart des études utilisent l'arc olympique classique, mais certaines se penchent sur l'arc à poulies ou l'arc traditionnel japonais. Les distances de tir évaluées sont également nombreuses : sur 41 études, seules six ont été faites à la distance olympique de 70m. La plupart des mesures se déroulent en intérieur à 18m. D'autres distances comme 10m, 30m ou 50m sont également utilisées. On peut émettre l'hypothèse que les études privilégient la distance de 18m car elle offre un meilleur contrôle expérimental et une plus grande facilité logistique, mais cette distance n'est pas la distance officielle de compétition en extérieur.

La taille des échantillons est également très variable. Certaines n'analysent qu'un seul archer, tandis que d'autres en incluent jusqu'à 39. Le nombre de flèches tirées par chaque archer est aussi très différent, allant de 6 à 96. Seulement 5 études ont tiré plus de 36 flèches par archers, sachant qu'un tir de classement de compétition est composé de 72 flèches.

Cette hétérogénéité des protocoles expérimentaux, bien que souvent justifiée par des contraintes techniques, a des conséquences sur la littérature de la performance en tir à l'arc. Elle rend la comparaison directe des résultats entre les études particulièrement complexe et limite la

capacité à généraliser les conclusions. En effet, les déterminants de la performance identifiés lors d'un tir en salle à 18m ne sont pas nécessairement transposables aux conditions réelles d'une compétition olympique à 70m en extérieur, où la fatigue sur 72 flèches et les facteurs environnementaux sont des paramètres à part entière. À cause de cette diversité méthodologique, il est donc difficile de généraliser les résultats des multiples études. Également, cela montre le besoin d'avoir des conditions expérimentales plus uniformes et plus proches des vraies conditions de compétition pour mieux comprendre la performance en tir à l'arc.

4. Problématique et objectifs généraux de la thèse

L'analyse de la littérature scientifique sur la performance en tir à l'arc dresse le portrait d'un geste multifactoriel complexe, où la stabilité posturale, l'organisation musculaire, la configuration cinématique et les stratégies temporelles apparaissent comme des piliers fondamentaux.

Les différentes études ont permis d'identifier des marqueurs clés de l'expertise, reposant principalement sur une approche méthodologique comparative entre des groupes d'athlètes de niveaux différents. Cette méthode a notamment mis en lumière un paradigme central : la maîtrise ne réside pas seulement dans l'atteinte de valeurs moyennes optimales, mais aussi dans la capacité à reproduire le geste avec une constance et une régularité extrême, c'est-à-dire avec une faible variabilité.

Cette vue d'ensemble révèle plusieurs interrogations. Premièrement, la tendance à évaluer les facteurs de manière isolée et la grande hétérogénéité des protocoles expérimentaux rendent la généralisation délicate des conclusions, et échouent à expliquer la synergie de l'ensemble des paramètres qui composent la performance. Deuxièmement, en se focalisant sur ce qui différencie un expert d'un novice, les études expliquent rarement ce qui différencie deux flèches avec des scores différents pour un même archer élite. Le principe d'individualisation, qui suggère que des performances similaires peuvent être atteintes par des voies différentes, reste largement inexploré.

Au regard de l'état actuel de la littérature, il ressort un besoin d'une nouvelle méthode d'évaluation multidimensionnelle et plus proche de la réalité des compétitions. Cette approche devrait analyser deux éléments : la capacité d'un archer à refaire toujours le même geste, et ce qui explique la différence entre un bon et un mauvais tir pour un même athlète de haut niveau.

Le premier objectif de notre travail sera d'identifier les paramètres différents entre deux niveaux de performance, ainsi que de quantifier et de confirmer l'importance de la variabilité des

paramètres de performance comme marqueur principal de l'expertise. Pour ce faire, une première étude comparative sera menée entre un groupe d'archers élites et un groupe d'archers intermédiaires. En utilisant une approche multidimensionnelle qui mesure simultanément le contrôle postural, la cinématique des membres supérieurs, l'activité neuromusculaire et les stratégies temporelles, nous chercherons à démontrer que la différence la plus significative entre les deux groupes ne réside pas que dans les valeurs moyennes de ces paramètres, mais aussi dans la faible variabilité de ces paramètres. Cette étude identifiera de manière fiable les indicateurs explicatifs de la performance en tir à l'arc.

Le second objectif sera d'aller au-delà de la comparaison de groupe pour identifier les stratégies individuelles et les déterminants de la performance au sein même de la population de niveau élite. Une seconde étude sera menée sur un groupe d'archers experts, combinant une analyse intra-sujet et une analyse sur l'ensemble du groupe. En comparant les paramètres clés en fonction du score, à la fois pour chaque athlète, mais aussi à l'échelle du groupe, cette démarche permettra d'identifier à la fois les stratégies communes au haut niveau et celles qui relèvent de l'optimisation individuelle.

En combinant ces deux approches, cette thèse ambitionne de fournir une compréhension plus fine et nuancée de la performance en tir à l'arc.

CHAPITRE 2 : ETUDES

5. Etude 1 : Etude multiparamétrique du tir à l'arc inter-niveau : comparer les stratégies de performance

5.1. Introduction

Le tir à l'arc de haut niveau est un sport de précision où la performance dépend d'une synergie complexe de nombreux paramètres. La littérature actuelle a permis d'identifier plusieurs déterminants clés de la performance, couvrant différents aspects tels que la stabilité posturale (Edelmann-Nusser et al., 2006; Keast & Elliott, 1990; Sarro et al., 2021; Simsek et al., 2019; Spratford & Campbell, 2017; Taha, Haque, et al., 2017; Zawi & Mohamed, 2013), l'activation neuromusculaire (Azhar et al., 2021; Baifa et al., 2023; Ertan, 2009; Ertan et al., 2003; Hennessy & Parker, 1990; Kolayiş & Ertan, 2016, 2016; Matsunaga et al., 2017; Nishizono et al., 1987; Shinohara & Urabe, 2018; Simsek et al., 2018; Taha, Haque, et al., 2017; Tinazci, 2011), l'organisation segmentaire du bras de corde (Lin et al., 2010; Shinohara & Urabe, 2018), ou encore les stratégies temporelles (Callaway et al., 2017; Ertan et al., 2003; Sarro et al., 2021; Spratford & Campbell, 2017; Taha, Haque, et al., 2017; Tinazci, 2011).

Malgré l'intérêt que représente une analyse globale du mouvement, intégrant l'ensemble de ces aspects pour mieux comprendre et optimiser les stratégies globales mise en œuvre lors de la tâche de tir à l'arc, la plupart des études s'est concentrée sur l'analyse isolée d'une seule dimension de la performance, évaluant ces déterminants de manière indépendante (Baifa et al., 2023; Callaway et al., 2017; Ertan et al., 2005; Sarro et al., 2021; Simsek et al., 2018; Zawi & Mohamed, 2013). Ainsi, l'étude simultanée des différents aspects de la performance constitue une carence importante dans la littérature actuelle. De plus, les protocoles existants présentent une grande disparité méthodologique (Vendrame et al., 2022), ce qui complique la comparaison des résultats et limite la généralisation des conclusions. Ces disparités tendent également à masquer la synergie complexe entre les différents déterminants de la performance.

Par ailleurs, plusieurs études ont montré que la performance en tir à l'arc ne dépend pas uniquement de l'atteinte de valeurs cibles des paramètres clés, mais aussi de la capacité de l'archer à reproduire son geste avec une grande régularité, traduite par une faible variabilité intra-individuelle au cours des tirs successifs (Callaway et al., 2017; Clarys et al., 1990; Heller, 2012; Quan et al., 2017; Soylu et al., 2006; Vendrame et al., 2022).

Il apparaît donc essentiel de développer une méthode d'évaluation plus complète et fidèle à la réalité des compétitions. Pour ce faire, une telle approche devrait permettre la mesure simultanée de l'ensemble des paramètres clés (neuromusculaires, posturaux, cinématiques,

temporels), afin de mieux appréhender leur synergie complexe. De plus, elle devrait non seulement analyser les indicateurs bruts pour comparer des groupes de niveaux différents, mais aussi la variabilité intra-individuelle de ces paramètres au cours de plusieurs tirs, un aspect important pour discriminer l'expertise et refléter la régularité requise en situation de compétition.

Par conséquent, cette étude vise à approfondir la compréhension des déterminants de l'expertise en tir à l'arc, en se fixant un objectif : identifier les indicateurs explicatifs de la performance en tir à l'arc et évaluer l'importance de l'indice de variabilité comme marqueur de l'expertise, en comparant un groupe d'archers élites à un groupe de niveau intermédiaire. En adoptant une approche multidimensionnelle qui intègre simultanément le contrôle postural, la cinématique du bras de corde, l'activité neuromusculaire et les stratégies temporelles, notre hypothèse est que la différence entre les deux groupes se situe dans les valeurs moyennes des paramètres énoncés précédemment, mais aussi dans une variabilité plus faible dans ces mêmes paramètres chez les archers experts en comparaison aux archers intermédiaires.

5.2. Matériel et méthodes

5.2.1. Participants

Deux groupes d'archers ont été recrutés. Un premier groupe, que nous appellerons le groupe « élite », était composé de huit archers français de haut niveau, sains et volontaires (4 femmes et 4 hommes ; âgés de 19,1 ± 2,7 ans ; 63,6 ± 7,3 kilogrammes ; 171,5 ± 7,0 centimètres). En 2024, tous étaient classés dans le top 20 du classement français de tir à l'arc classique scratch à 70 mètres. Ils concourent sur le circuit national français, avec un meilleur score moyen de 654,62 ± 14,25 points sur 720. Leur volume d'entraînement est d'environ 21 heures par semaine. Le deuxième groupe, que nous appellerons le groupe « intermédiaire », était composé de 7 archers (3 hommes et 4 femmes ; âgés de 28,8 ± 11,6 ans ; 78,4 ± 22,1 kilogrammes ; 174,0 ± 11,6 centimètres). Ils concourent sur le circuit régional, avec un meilleur score moyen de 523,3 ± 37,7 points sur 720. Leur volume d'entraînement est d'environ 6 heures par semaine. Aucun des participants n'avait subi de blessure dans les six mois précédant l'étude.

Tous les participants ont été informés des mesures, de l'objectif et des risques associés au dispositif expérimental, et ont donné leur consentement écrit et éclairé avant la collecte des données. L'étude a été menée conformément aux directives de la Déclaration d'Helsinki et a été approuvée par le Comité d'Éthique pour la Recherche en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (CER STAPS, n°IRB00012476-2024-20-11-356).

5.2.2. Protocole expérimental

Après avoir effectué un échauffement de 15 minutes selon leur routine habituelle, chaque archer a été équipé d'un ensemble de capteurs. Les participants ont réalisé quatre volées de neuf flèches, en conservant leur rythme de tir habituel. L'intervalle entre les volées correspondait au temps nécessaire pour récupérer les flèches sur la cible (environ 2 minutes). Durant tout le protocole, les participants ont utilisé leur propre arc et leurs propres flèches.

L'expérience s'est déroulée sur un terrain de tir à l'arc en extérieur. Les archers se tenaient à l'intérieur d'une cabine aux fenêtres ouvertes, tandis que les cibles étaient placées à 70 mètres du participant, ce qui correspond à la distance standard utilisée dans les compétitions olympiques et internationales. La cible utilisée était le blason officiel FITA de 122 cm pour la distance de 70 mètres.

5.2.3. Outils de mesures et analyse des données

5.2.3.1. Capteurs électromyographiques

Un système EMG de surface sans fil (Ultium EMG, Noraxon USA., Inc., Scottsdale, AZ, USA), avec une fréquence d'échantillonnage de 2 000 Hz, a été utilisé pour mesurer l'activité neuromusculaire de 14 muscles du tronc et des membres supérieurs (Figure 15). Un précédent méthodologique pour l'utilisation de cet instrument afin d'évaluer ces variables a été établi par Darendeli et al. (2023). Le choix des 14 muscles repose sur leur rôle dans la performance en tir à l'arc, comme démontré dans des études antérieures (Azhar et al., 2021; Baifa et al., 2023; Ertan, 2009; Ertan et al., 2003; Kolayiş & Ertan, 2016; Matsunaga et al., 2017; Taha, Haque, et al., 2017; Tinazci, 2011). Avant les mesures, la peau a été rasée, abrasée et nettoyée pour assurer une faible impédance, avec un seuil inférieur à 5 kΩ considéré comme acceptable pour la qualité du signal. Des électrodes de surface (Ambu® Blue-Sensor SP, Ambu A/S, Ballerup, Danemark) ont été placées parallèlement aux fibres musculaires. Un seul expérimentateur a placé toutes les électrodes afin de garantir la cohérence inter-évaluateur.

Du côté du bras de corde, les électrodes ont été positionnées sur l'extenseur des doigts (ED-c), le fléchisseur superficiel des doigts (FSD-c), les deltoïdes médian et postérieur (respectivement DM-c et DP-c), ainsi que sur les trapèzes médian et supérieur (respectivement TM-c et TS-c). Du côté du bras d'arc, le fléchisseur superficiel des doigts (FSD-a) et l'extenseur des doigts (ED-a) ont été enregistrés, ainsi que le deltoïde médian (MD-a). De plus, cinq muscles du tronc ont été mesurés : le transverse de l'abdomen (TA), le multifide des deux côtés (MF-c et MF-a), et l'oblique externe des deux côtés (EO-c et EO-a). Le placement des électrodes a suivi les recommandations établies (Hermens et al., 2000; Matsunaga et al., 2017). Pour les muscles

ED-c, ED-a, FDS-c, FDS-a, les sites des électrodes ont été identifiés par palpation des muscles pendant que les sujets simulaient la phase préparatoire de la position de tir (Ertan et al., 2003).

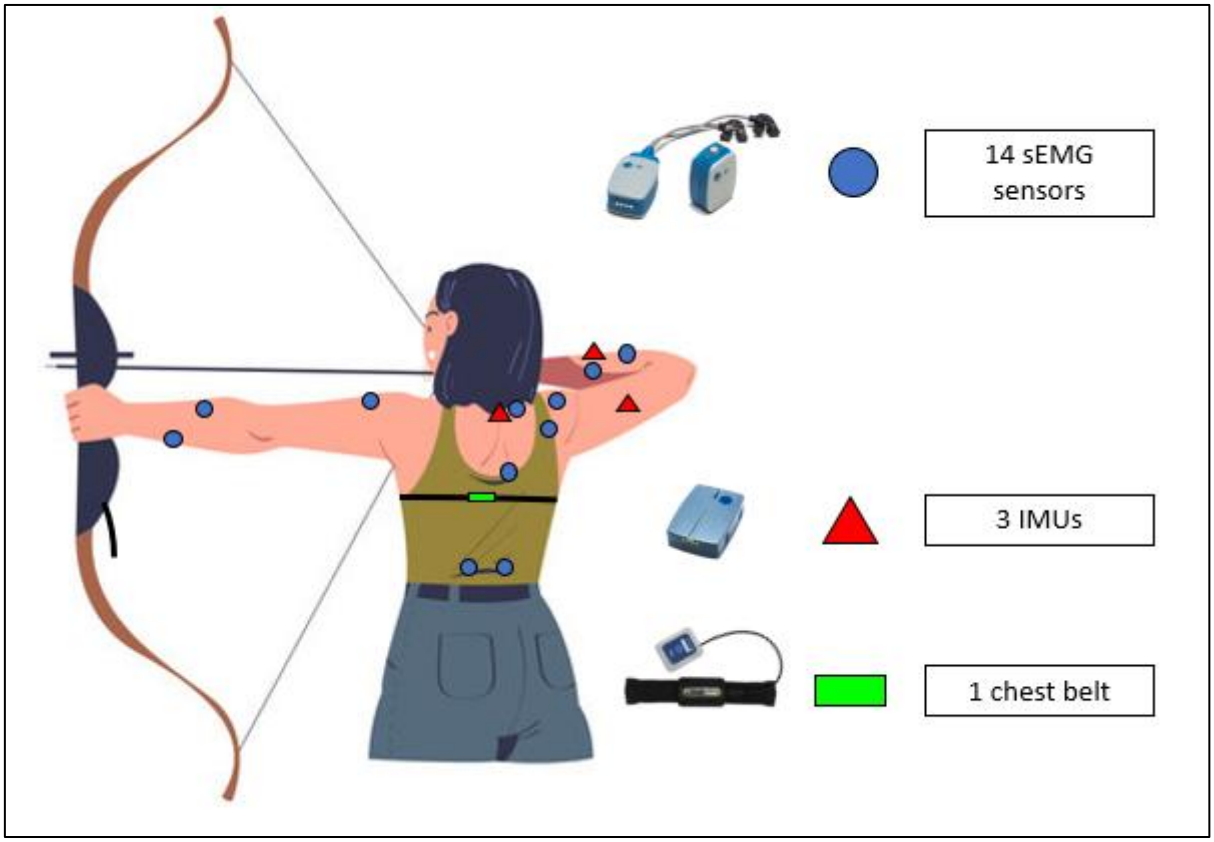


Figure 15 : Schéma du placement des électrodes electromyographiques, des centrales inertielles, et de la ceinture thoracique

Avant la première volée de flèches, des mesures de la contraction volontaire maximale (MVC) ont été obtenues pour chaque muscle contre une résistance statique, en suivant le protocole décrit par Matsunaga et al. (2017) et Rota et al. (2013). Ainsi, les protocoles suivants ont été utilisés :

- ED (Extenseur des Doigts) : avant-bras reposant sur une table et main en position neutre, extension maximale des quatre doigts contre une résistance appliquée sur le dos des doigts.
- FDS (Fléchisseur Superficiel des Doigts) : préhension maximale d'une poignée d'aviron d'un diamètre de 4 cm.
- DM (Deltoïde Moyen) : élévation latérale du bras à 90° d'abduction dans le plan frontal, avec l'avant-bras en pronation, contre une résistance appliquée vers le bas sur le bras.
- DP (Deltoïde Postérieur) : abduction horizontale dans le plan sagittal à 90° d'abduction de l'épaule, avec l'avant-bras en pronation, contre une résistance appliquée sur le coude.

- TS (Trapèze Supérieur) : debout, bras le long du corps, élévation maximale de l'épaule (haussement d'épaules) contre une résistance appliquée vers le bas sur l'acromion.
- TM (Trapèze Moyen) : en position allongée, avec le bras étendu en abduction à 90° et le pouce pointant vers le haut, effectuer une rétraction scapulaire maximale contre une résistance vers le bas appliquée sur les bras.
- OE (Oblique Externe) : allongé sur le dos avec les genoux pliés et les pieds à plat sur le sol, effectuer un mouvement de flexion du tronc combiné à une rotation, en soulevant une épaule vers le genou opposé contre une résistance manuelle.
- TA (Transverse de l'Abdomen) : debout, effectuer à l'aide d'une expiration, une contraction abdominale maximale ou une « rentrée » du ventre en amenant le nombril vers la colonne vertébrale sans bouger le bassin ou la cage thoracique.
- MF (Multifides) : en position allongée sur le ventre, effectuer une extension maximale du tronc (en soulevant la poitrine) avec une résistance manuelle appliquée sur le haut du dos.

Les signaux EMG ont été filtrés en passe-bande à l'aide d'un filtre Butterworth du 4ème ordre, avec des fréquences de coupure de 20-500 Hz, puis rectifiés et normalisés par rapport aux valeurs de MVC correspondantes. Ces étapes de traitement ont été effectuées avec le logiciel MATLAB (R2022b, The MathWorks Inc., Natick, USA). Pour chaque muscle et chaque tir, les données EMG ont été moyennées sur la durée de chacune des deux phases.

5.2.3.2. Plateforme de force

Les paramètres liés au Centre de Pression (CdP) ont été enregistrés à l'aide d'une plateforme de forces AccuPower (AccuPower-O ; AMTI, Watertown, MA, USA) à une fréquence d'échantillonnage de 1 000 Hz. Le choix méthodologique de cet instrument est appuyé par une recherche antérieure (Gómez-Landero et al., 2021), dans laquelle il a été utilisé avec succès pour évaluer les mêmes variables posturales. L'axe Y (médiolatéral) était aligné avec la direction du tir, tandis que l'axe X (antéropostérieur) était perpendiculaire à la direction du tir (Figure 16). Les archers devaient garder leurs pieds immobiles pendant le tir. Les coordonnées brutes du CdP ont été filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas Butterworth du 4ème ordre avec une fréquence de coupure de 10 Hz. Cette étape de traitement a été effectuée avec le logiciel MATLAB (R2022b, The MathWorks Inc., Natick, USA).

Pour chaque phase analysée, les variables suivantes ont été calculées : la vitesse de déplacement du CdP le long de l'axe antéropostérieur (Vx) et de l'axe médiolatéral (Vy), la vitesse résultante du CdP (V), l'amplitude de déplacement du CdP le long de l'axe antéropostérieur (Rx) et de

l'axe médiolatéral (Ry), ainsi que la surface de déplacement du CdP (S). De plus, la vitesse maximale du CdP (Vmax) a également été calculée pour chaque phase.



Figure 16 : Archer intermédiaire sur la plateforme de force durant une mesure

5.2.3.3. Centrales inertielles

Un système de centrales inertielles (Ultium Motion, Noraxon USA., Inc., Scottsdale, AZ, USA), avec une fréquence d'échantillonnage de 200 Hz, a été utilisé pour mesurer les angles articulaires du bras de corde. Les capteurs ont été positionnés sur l'avant-bras (entre l'ulna et le radius), sur la face latérale du bras, et au niveau de la vertèbre C7. Le système IMU (*Inertial Measurement Units*) de Noraxon a été validé pour l'évaluation de la cinématique de l'épaule (Yoon, 2017a). Les données des IMU ont été filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas du quatrième ordre à 10 Hz. Cette étape de traitement a été effectuée avec le logiciel MATLAB (R2022b, The MathWorks Inc., Natick, USA). Les valeurs moyennes de l'abduction de l'épaule et de la flexion du coude sur le bras de corde ont été calculées pour chacune des deux phases.

Les signaux cinématiques et EMG ont été synchronisés à l'aide du système Noraxon (Ultium Portable Lab, Noraxon USA, Inc., Scottsdale, AZ, USA).

5.2.3.4. Ceinture thoracique

Une ceinture thoracique (T-Sens Respiration, Technology Ergonomics Applications, Vandoeuvre-lès-Nancy, France), avec une fréquence d'échantillonnage de 32 Hz, a été placée au niveau de la dixième vertèbre du participant, comme indiqué par Decker et al. (2024). L'amplitude du mouvement thoracique (différence entre les valeurs maximales et minimales pendant la phase) a été calculée durant les deux phases.

5.2.3.5. Caméras

Deux caméras (GoPro Hero 9 Black, GoPro, San Mateo, CA, USA), avec une fréquence d'échantillonnage de 240 Hz et une résolution de 1080p, ont été utilisées dans ce protocole. L'une était positionnée pour offrir un large champ de vision, capturant l'intégralité du participant afin d'identifier les phases de visée et de suivi, et de déterminer la durée de la phase de visée. Cette identification a permis le calcul indépendant des différentes variables pour les deux phases du mouvement de tir à l'arc. La phase de visée commence lorsque le bras de corde est immobile et se termine au lâcher de la corde, lorsque la corde entame un déplacement (Callaway et al., 2017). La phase de suivi correspond à 0,5s après le lâcher de la corde, comme dans plusieurs études (Baifa et al., 2023; Spratford & Campbell, 2017).

La seconde caméra était focalisée sur le clicker de l'arc du participant pour mesurer le TRC à l'aide d'une analyse vidéo et du logiciel d'analyse de mouvement 2D Kinovea (version 2023.1.2).

5.2.4. Indices de variabilité

La variabilité intra-individuelle de chaque paramètre a été quantifiée pour chaque participant en calculant l'écart-type sur l'ensemble de ses flèches. Afin de comparer les deux groupes, la médiane de ces écarts-types a ensuite été calculée pour chaque groupe.

5.2.5. Statistiques

Tout d’abord, la normalité des données a été testée avec un test de Shapiro-Wilk. Puisque la grande majorité de résultats indiquait des données qui ne suivaient pas la loi normale, alors des tests non paramétriques ont été utilisés pour l’ensemble de l’étude, pour éviter une disparité de tests entre les variables. Pour comparer les deux niveaux de pratique, des tests U de

Mann-Whitney ont été réalisés. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées sur RStudio version 2024.12.1 (R Core Team, Vienne, Autriche). Les analyses ont été appliquées à tous les paramètres mesurés : l'activité neuromusculaire (14 paramètres), la configuration corporelle (3 paramètres), les stratégies temporelles (2 paramètres) et le contrôle postural (7 paramètres). Pour chaque variable, un premier test est effectué pour comparer les médianes de chaque groupe, et un second test pour comparer les écarts-types de chaque participant pour chaque groupe. Le seuil de significativité a été placé à 5% ($p<0.05$).

5.3. Résultats

5.3.1. Comparaison des scores

Le groupe « élite », était composé de huit archers français qui ont un meilleur score moyen de 654,62 ± 14,25 points sur 720. Le groupe « intermédiaire », était composé de 7 archers qui ont un meilleur score moyen de 523,3 ± 37,7 points sur 720. Pour évaluer la différence du meilleur niveau de performance de chaque groupe d'archers, les meilleurs scores de chaque archer (calculés sur l'ensemble de leurs tirs respectifs) ont été comparés à l'aide d'un test U de Mann-Whitney, au vu de la faible taille des échantillons. Les meilleurs scores des archers de niveau élite sont statistiquement supérieurs ($p<0,001$) aux meilleurs scores des archers de niveau intermédiaire.

D’autre part, les scores réalisés lors des mesures ont également été comparés pour vérifier les différences de niveaux. Pour évaluer la différence de niveau de performance entre les deux groupes d'archers, les scores moyens de chaque archer (calculés sur l'ensemble de leurs tirs respectifs) ont été comparés à l'aide d'un test U de Mann-Whitney, au vu de la faible taille des échantillons. Les scores réalisés par les archers de niveau élite (8,87) sont statistiquement supérieurs ($p<0,001$) aux scores réalisés par le groupe intermédiaire (6,94).

5.3.2. Comparaison des indicateurs médians

5.3.2.1. Activité neuro-musculaire

5.3.2.1.1. Phase de visée

Lors de la phase de visée, 5 muscles sur les 6 mesurés du bras de corde étaient activés différemment entre les deux populations (Figure 17). Les archers élites activaient davantage le trapèze médian que les archers intermédiaires ($p<0,001$), mais ils activaient moins le fléchisseur superficiel des doigts ($p<0,01$), le deltoïde médian ($p<0,001$), le deltoïde postérieur ($p<0,001$), et le trapèze supérieur ($p<0,001$). Il n’y avait pas de différences pour l’extenseur des doigts ($p=0,082$).

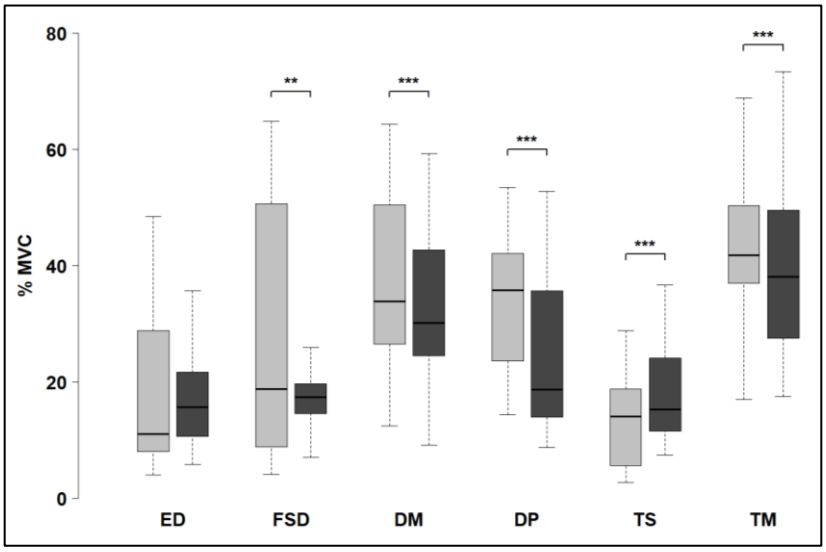


Figure 17 : Valeurs de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de visée pour les muscles du bras de corde (ED : extenseur des doigts, FSD : fléchisseur superficiel des doigts, DM : deltoïde médian, DP : deltoïde postérieur, TS : trapèze supérieur, TM : trapèze moyen) * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001

Du côté du bras d'arc (Figure 18), l'extenseur des doigts était moins activé par les archers élites que les archers intermédiaires (p<0,001), à l'inverse du deltoïde médian qui était plus activé par les archers intermédiaires que par les archers élites (p<0,01). Pour le fléchisseur superficiel des doigts, il n'y avait pas de différences entre les deux groupes (p=0,055).

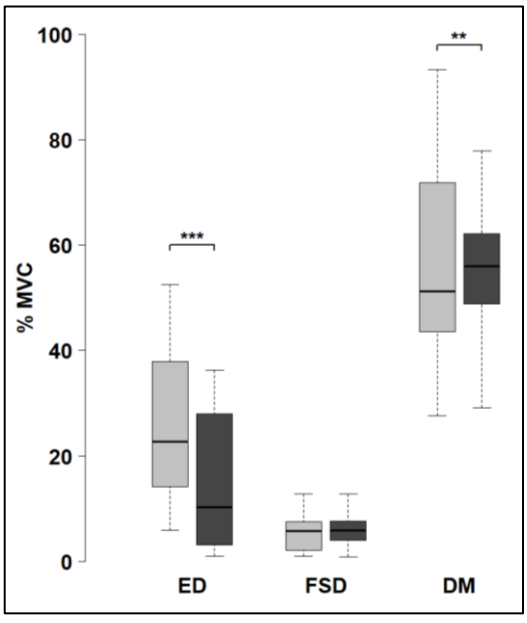


Figure 18 : Valeurs de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de visée pour les muscles du bras d'arc (ED : extenseur des doigts, FSD : fléchisseur superficiel des doigts, DM : deltoïde médian) * p<0.05, ** p<0.01, *** p<0,001

L'ensemble des muscles abdominaux (Figure 19) mesurés affichait une activation plus importante chez les archers de niveau intermédiaire que chez les archers élites (MF_a : p<0,001, MF_c : p<0,001, OE_a : p<0,001, OE_c : p<0,001, TA : p<0,001).

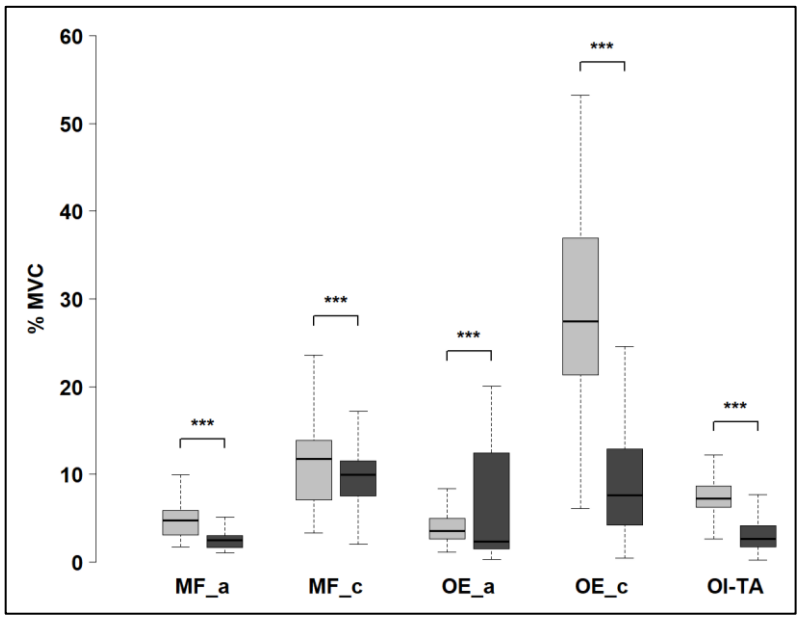


Figure 19 : Valeurs de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de visée pour les muscles du tronc (MF_a : multifides côté arc, MF_c : multifides côté corde, OE_a : oblique externe côté arc, OE_c : oblique externe côté corde, OI-TA : oblique interne et transverse de l'abdomen) * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001

5.3.2.1.2. Phase de suivi

Lors de la phase de suivi, trois muscles du bras de corde (l'extenseur des doigts p<0,05, le trapèze médian p<0,001 et le trapèze supérieur p<0,001) avaient une activité moyenne supérieure chez les archers élites que chez les archers intermédiaires (Figure 20). A l'inverse, l'activation des muscles fléchisseurs des doigts (p<0,001), et déltoide médian (p<0,05) avait une activité moyenne inférieure chez les archers élites que chez les archers intermédiaires. L'activation médiane du deltoïde postérieur n'était pas différente entre les deux groupes (p=0,175).

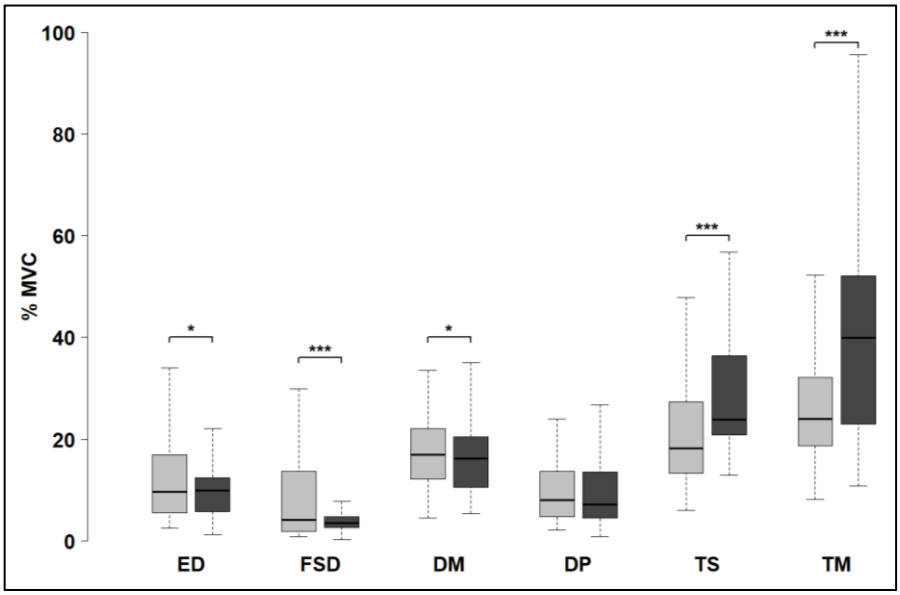


Figure 20 : Valeurs de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de suivi pour les muscles du bras de corde (ED : extenseur des doigts, FSD : fléchisseur superficiel des doigts, DM : deltoïde médian, DP : deltoïde postérieur, TS : trapèze supérieur, TM : trapèze moyen) * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001

Pour le bras d'arc (Figure 21), les trois muscles mesurés (extenseur des doigts p<0 ,005, fléchisseur des doigts p<0,005, et deltoïde médian p<0,005) étaient plus activés chez les archers intermédiaires que chez les archers élites.

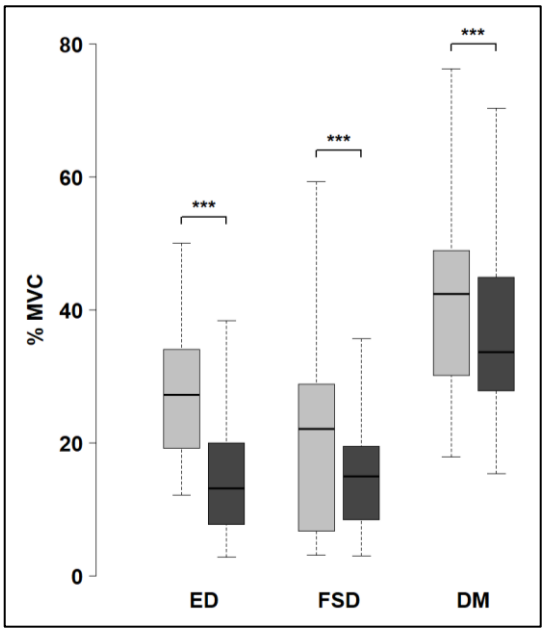


Figure 21 : Valeurs de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de suivi pour les muscles du bras d'arc (ED : extenseur des doigts, FSD : fléchisseur superficiel des doigts, DM : deltoïde médian) * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001

Pour les muscles abdominaux (Figure 22), le résultat est identique à celui de la phase de visée, puisque les muscles abdominaux des archers intermédiaires avaient une activation plus élevée que chez les archers élites (MF_a : p<0,001, MF_c : p<0,001, OE_a : p<0,001, OE_c : p<0,001, TA : p<0,001).

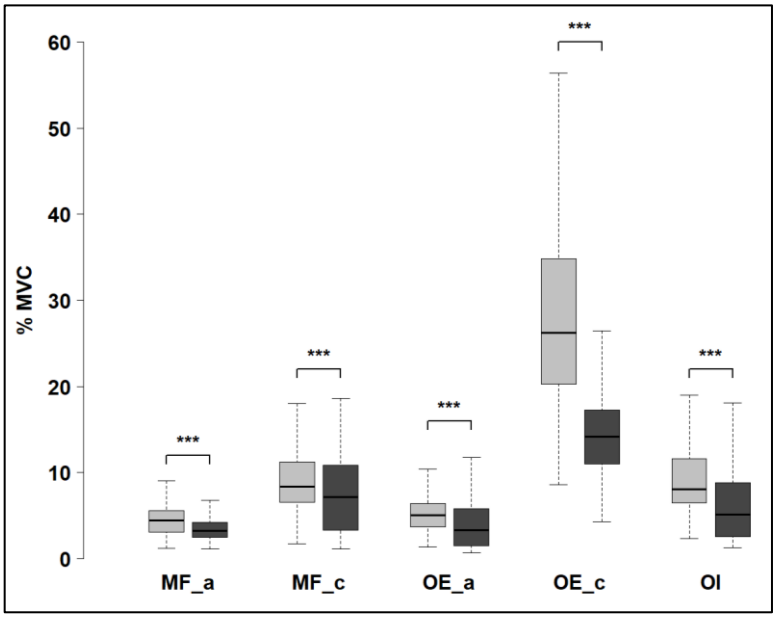


Figure 22 : Valeurs de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de visée pour muscles du tronc (MF_a : multifides côté arc, MF_c : multifides côté corde, OE_a : oblique externe côté arc, OE_c : oblique externe côté corde, OI-TA : oblique interne et transverse de l'abdomen) * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001

5.3.2.2. Contrôle postural

5.3.2.2.1. Phase de visée

Au niveau du contrôle postural lors de la phase de visée, les variables de surface (p<0,001) et d'amplitude dans les axes X (p<0,001) et Y (p<0,001) étaient plus élevées chez les archers de niveau intermédiaire que chez les archers de niveau élite (Figure 23). A l'inverse, toutes les variables des vitesses (vitesse moyenne (p<0,001), vitesse axe X (p<0,001), vitesse axe Y (p<0,001), vitesse maximale (p<0,001)) étaient plus élevées chez les archers de niveau élite que chez les archers de niveau intermédiaire.

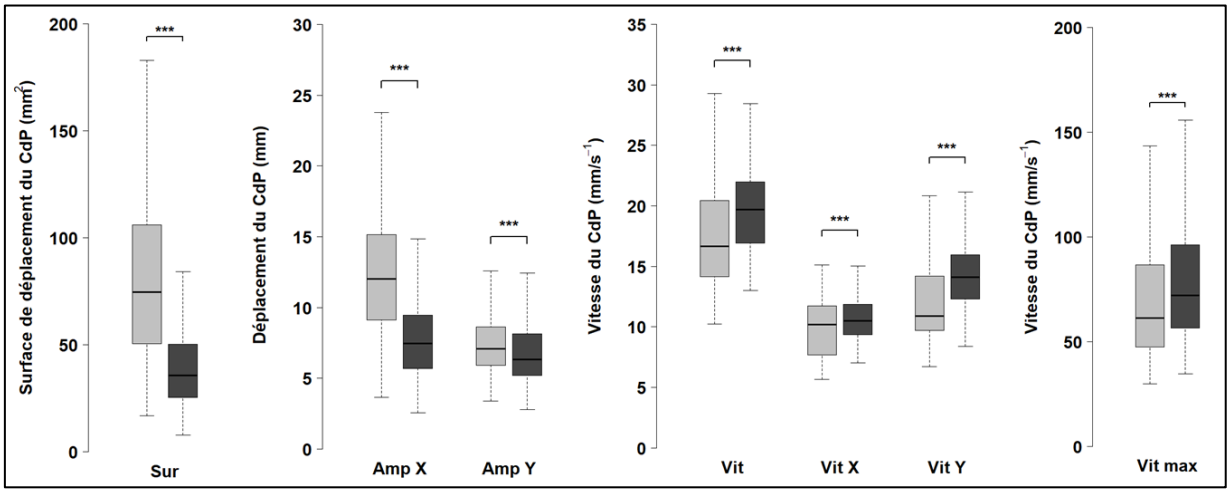


Figure 23 : Valeurs des variables du contrôle postural en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de visée (Sur : surface totale du déplacement du CdP, Amp X : amplitude du déplacement du CdP sur l'axe antéro-postérieur, amp Y : amplitude du déplacement du CdP sur l'axe médio-latéral, Vit : vitesse globale du déplacement du CdP, Vit X : vitesse globale du déplacement du CdP sur l'axe antéro-postérieur, Vit Y : vitesse du déplacement du CdP sur l'axe médio-latéral, Vit Max : vitesse maximale de déplacement du centre de pression)
* p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001

5.3.2.2.2. Phase de suivi

Durant la phase de suivi (Figure 24), l'ensemble des variables du contrôle postural affichait des valeurs plus élevées chez les archers de niveau élite par rapport aux archers de niveau intermédiaire (Surface : p<0,001, Amplitude axe X p<0,05, Amplitude axe Y p<0,001, Vitesse globale p<0,001, Vitesse axe X p<0,001, Vitesse axe Y p<0,001, Vitesse maximale p<0,001).

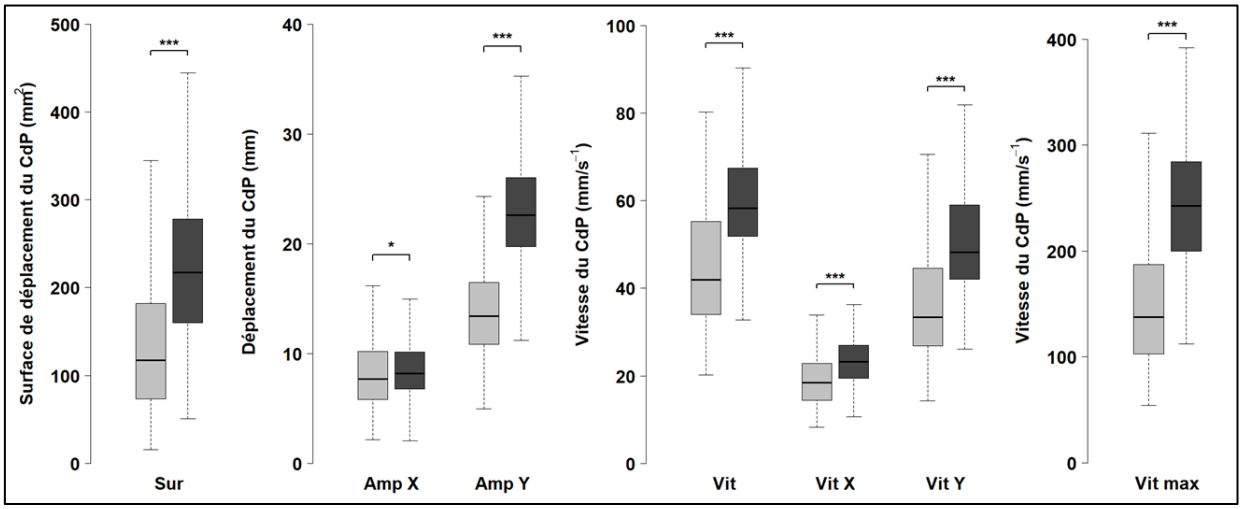


Figure 24 : Valeurs des variables du contrôle postural en fonction du niveau du groupe (gris clair : intermédiaire ; gris foncé : élite) durant la phase de suivi (Sur : surface totale du déplacement du CdP, Amp X : amplitude du déplacement du CdP sur l'axe antéro-postérieur, amp Y : amplitude du déplacement du CdP sur l'axe médio-latéral, Vit : vitesse globale du déplacement du CdP, Vit X : vitesse globale du déplacement du CdP sur l'axe antéro-postérieur, Vit Y : vitesse du déplacement du CdP sur l'axe médio-latéral, Vit Max : vitesse maximale de déplacement du centre de pression).
* p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001

5.3.2.3. Cinématique

Lors de la phase de visée, l'angle d'abduction de l'épaule (p<0,05) était plus grand chez les archers élites (121,1 degrés ± 9,21) que chez les archers intermédiaires (116,8 degrés ± 30,7). L'angle de flexion du coude (p<0,001) était également plus grand chez les archers élites (64,4 degrés ± 20,16) que chez les archers intermédiaires (50,5 degrés ± 19,7).

Lors de la phase de suivi, l'angle d'abduction de l'épaule (p<0,001) était plus petit chez les archers élites (91,5 degrés ± 8,1) que chez les archers intermédiaires (102,3 degrés ± 14,1). L'angle de flexion du coude (p<0,001) était plus grand chez les archers élites (56,5 degrés ± 12,9) que chez les archers intermédiaires (45,4 degrés ± 20,0).

5.3.2.4. Amplitude thoracique

L'amplitude du mouvement thoracique pendant la phase de visée était plus élevée (p<0,001) chez les archers intermédiaires (5,9 U.A ± 6,8) que chez les archers de niveau élite (3,4 U.A ± 3,7). Elle n'était pas différente entre les deux groupes lors de la phase de suivi (p=0,121).

5.3.2.5. Durée de la phase de visée et TRC

La durée de la phase de visée était plus courte (p<0,001) chez les archers élites (2,62 secondes ± 1,85) que chez les archers intermédiaires (3,36 secondes ± 2,26). Le TRC n'était pas différent entre les deux groupes (p=0,216).

5.3.3. Comparaison des indicateurs de variabilité

En comparant les écarts types entre les deux groupes de niveaux différents, lors de la phase de visée, les variabilités des scores (écart-type de 0,91 contre 2,02), de l'oblique externe côté corde (ET de 1,09 contre 3,16), de la surface (ET de 16,16 contre 34,38), de l'amplitude sur l'axe X (ET de 2,52 contre 3,99), et de l'épaule (ET de 3,63 contre 11,21) étaient différentes, et lors de la phase de suivi, les variabilités de l'oblique externe côté corde (ET de 1,97 contre 4,20), et de la vitesse maximale (ET de 47,70 contre 33,84) étaient différentes également.

5.4. Discussion

L'objectif principal de cette étude est d'analyser de manière multidimensionnelle les déterminants de la performance au tir à l'arc, en comparant deux groupes d'archers de niveau différents (un groupe « élite » et un groupe « intermédiaire »). Cette comparaison s'est appuyée sur l'évaluation de l'activité neuromusculaire, du contrôle postural, de la cinématique du bras de corde, du mouvement thoracique et des stratégies temporelles, ainsi que leur variabilité au cours des tirs.

5.4.1. Récapitulatif des résultats

Les résultats de cette étude ont révélé des différences significatives entre les archers élites et intermédiaires. En phase de visée, les élites se caractérisaient majoritairement par une moindre activation musculaire générale du bras de corde (fléchisseur superficiel des doigts, deltoïde médian et postérieur, trapèze supérieur) et des muscles centraux (multifides bilatéraux, obliques externes bilatéraux, transverse de l'abdomen), ainsi qu'un contrôle postural plus stable (surface et amplitudes réduites du déplacement du CdP), une moindre amplitude respiratoire et une durée de visée plus courte. Cependant, ils affichaient une activation supérieure du trapèze médian du bras de corde et du deltoïde médian du bras d'arc, ainsi qu'une plus grande vitesse de déplacement du CdP, et des angles d'abduction de l'épaule et de flexion du coude plus grands. En phase de suivi, des tendances similaires ont été observées avec une activation musculaire globalement inférieure chez les élites pour le bras de corde (fléchisseur superficiel, deltoïde médian et postérieur) et le bras d'arc (extenseur, fléchisseur superficiel, deltoïde médian), ainsi

que pour les muscles centraux. Néanmoins, l'extenseur des doigts et les trapèzes médian et supérieur du bras de corde montraient une activation supérieure, tandis que l'ensemble des variables du contrôle postural (surface, amplitudes et vitesses du CdP) étaient plus élevées chez les élites.

Les résultats des indices de variabilité ont montré une variabilité inférieure chez les archers élites pour l'oblique externe du bras de corde, de la surface du CdP, l'amplitude sur l'axe X, et de l'angle de l'épaule lors de la phase de visée. Pour la phase de suivi, les résultats ont montré une variabilité inférieure pour l'oblique externe du bras de corde chez les archers élites, et une variabilité supérieure pour la vitesse maximale de déplacement du CdP.

5.4.2. Comparaison des indicateurs médians

5.4.2.1. Activité neuromusculaire

5.4.2.1.1. Phase de visée

La phase de visée, importante pour la stabilité de l'archer et l'alignement de la flèche, révèle des stratégies neuromusculaires distinctes entre archers élites et intermédiaires, qui convergent et parfois divergent de la littérature.

5.4.2.1.1.1. Bras de corde

Les résultats de cette étude ont montré de nombreuses différences entre les deux groupes au niveau des muscles du bras de corde.

Tout d'abord, le trapèze médian (adducteur principal de la scapula) était moins activé pendant la phase de visée chez le groupe d'archers élites (38,1%) que chez le groupe d'archers intermédiaires (41,8%). De plus, le trapèze supérieur, qui joue un rôle dans la stabilisation, l'élévation et la rotation externe de la scapula, a été légèrement plus activé chez le groupe d'archers élites (15,2%) que chez le groupe d'archers intermédiaires (14,0%). Ces stratégies auraient pour but d'éviter une suractivation ponctuelle des muscles pour maintenir un positionnement optimal de la scapula et un niveau de tension optimal sans pic d'effort. Cependant, ces résultats semblent être en contradiction avec ceux de la littérature (Shinohara & Urabe, 2018; Simsek et al., 2014, 2018). En effet, les groupes d'archers élites avaient une activation supérieure du trapèze médian aux groupes de niveaux inférieurs (Simsek et al., 2014, 2018), où aucune différence n'avait été montrée pour le trapèze supérieur (Shinohara & Urabe, 2018). Ces divergences avec les résultats de la littérature peuvent s'expliquer par des niveaux de populations qui ne sont pas rigoureusement identiques.

Concernant la stabilisation, l'abduction et l'abduction horizontale du bras de corde lors de la phase de visée, les résultats ont montré des activations musculaires plus faibles chez le groupe d'archers élites que chez le groupe d'archers intermédiaires, notamment pour les deltoïdes postérieur et médian. Cette stratégie permettrait de réduire la dépense énergétique et la co-contraction musculaire, pour éviter une fatigue ou des micro-oscillations qui affecteraient la précision. Elle pourrait également indiquer une meilleure synergie avec d'autres muscles stabilisateurs profonds. Cependant, ces résultats semblent être contradictoires avec ceux d'une étude antérieure (Simsek et al., 2018).

Enfin, au niveau de l'avant-bras, seul le fléchisseur superficiel des doigts a été moins activé chez le groupe d'archers élites que le groupe d'archers intermédiaires, comme dans les études de Simsek et al. (2014, 2018) et Tinazci (2011). De plus, aucune différence n'a été observée pour l'extenseur des doigts comme dans l'étude d'Ertan et al. (2003), contrairement à celles de Simsek et al. (2014, 2018) qui ont montré une activation plus faible pour le groupe d'archers élites. Ainsi cette stratégie permettrait une gestion plus fine de la préhension de la corde pour un lâcher précis de la flèche.

Les divergences dans les résultats observés entre notre étude et des études antérieures peuvent s'expliquer par des différences méthodologiques, notamment sur la fenêtre temporelle d'analyse qui diffère entre toutes ces études.

5.4.2.1.1.2. Bras d'arc

L'activation du deltoïde médian était plus importante chez le groupe d'archers élites (56,1%) que chez le groupe d'intermédiaires (51,3%), confirmant que le deltoïde médian est responsable du maintien de la position du bras et d'une stabilisation plus grande de l'arc chez le groupe d'archers élites (Kolayiş & Ertan, 2016). L'activation du deltoïde médian n'a pas été reliée à la performance, ce résultat semble donc nouveau dans la littérature sur le tir à l'arc, montrant le rôle du deltoïde médian du bras d'arc dans la performance.

Pour les muscles de l'avant-bras du bras d'arc en phase de visée, nos observations confirment les résultats de la littérature (Ertan, 2009) : les archers élites maintiennent une faible activité de l'extenseur des doigts (10,3%) comparé aux intermédiaires (22,7%). Cette différence traduit chez les élites une stratégie de préhension relâchée, c'est-à-dire une prise de la poignée avec un effort musculaire minimal et des doigts détendus, minimisant ainsi la tension excessive et l'instabilité (les tremblements ou micromouvements parasites générés par une crispation), contrairement à la co-contraction observée chez les niveaux inférieurs. Concernant le

fléchisseur superficiel des doigts, aucune différence significative n'a été relevée, suggérant une gestion similaire de ce muscle entre les groupes ou une spécificité de notre population.

5.4.2.1.1.3. Muscles du tronc

L'ensemble des muscles du tronc mesurés ont affiché une activation plus faible chez les archers élites que chez les archers intermédiaires. Ces résultats semblent en contradiction avec la littérature (Azhar et al., 2021; Matsunaga et al., 2017) où le transverse de l'abdomen et les multifides ont montré une activation supérieure chez les élites comparées aux débutants. Cette divergence de résultat peut s'expliquer par la différence de population opposée au groupe de niveau élite. Dans notre étude, le second groupe est de niveau intermédiaire, avec une certaine expérience. Dans l'étude de Azhar et al. (2021), le second groupe était composé de débutants, sans expérience. Les stratégies entre un groupe intermédiaire et débutant peuvent donc différer.

Ainsi, les résultats de notre étude suggèrent que les archers élites ne se reposent pas sur une plus forte activation de ces muscles pour la stabilité, mais plutôt sur une stratégie d'engagement plus efficiente. Cette stratégie implique potentiellement une meilleure coordination intersegmentaire et un alignement postural stable, à l'inverse d'une stratégie de co-contraction compensatoire, moins efficiente à long terme et susceptible de générer des tensions indésirables pour le groupe intermédiaire.

5.4.2.1.2. Phase de suivi

La phase de suivi, bien que postérieure au lâcher de la corde, est importante pour la stabilité de l'arc lorsque la flèche le quitte, et pour la minimisation des perturbations susceptibles d'influencer sa trajectoire. Nos résultats mettent en lumière des stratégies neuromusculaires différenciées, reflétant une maîtrise technique supérieure chez les archers élites.

5.4.2.1.2.1. Bras de corde

Le groupe d'archers élites présente une activation plus élevée des faisceaux médians et supérieurs du trapèze, combinée à une activation plus faible du deltoïde médian du bras de corde, comparé au groupe intermédiaire. Cette stratégie musculaire sélective reflète un relâchement ciblé des muscles moteurs (deltoïde médian), associé au maintien des stabilisateurs scapulaires (trapèze supérieur et médian). Elle contribue au contrôle de la scapula, à une meilleure absorption des forces et au maintien de la stabilité du membre supérieur après le lâcher.

Dans notre étude, aucune différence significative d'activation moyenne du deltoïde postérieur n'a été observée entre les groupes d'archers. Cette absence de différence pourrait indiquer que ce muscle, bien qu'impliqué dans la stabilisation du bras durant le suivi, ne constitue pas un marqueur discriminant entre les deux groupes de niveau. Il est possible que d'autres muscles compensent son rôle dans le contrôle du geste. Cette nuance contraste avec les résultats de Tinazci (2011), qui rapportait une diminution de l'activation du deltoïde postérieur corrélée à une amélioration du score (31,6 % pour un score de 8 contre 29,7 % pour un score de 10), suggérant que son implication pourrait être davantage liée à la performance intra-individuelle qu'à la différenciation inter-niveaux.

Le groupe d'archers élites présente une activation significativement plus faible du fléchisseur superficiel des doigts (3,5 %) que le groupe intermédiaire (4,2 %). Cette moindre sollicitation traduit une plus grande capacité de relâchement musculaire après le lâcher, limitant les crispations parasites susceptibles d'altérer la trajectoire de la flèche. Concernant l'extenseur des doigts, bien que les médianes d'activation soient très proches entre élites (9,9%) et intermédiaires (9,7%), nos résultats révèlent une différence notable dans les quartiles supérieurs (3ème quartile : 12,4% pour les élites contre 16,9% pour les intermédiaires). Cette disparité suggère une compensation d'un lâcher moins fluide ou une difficulté à relâcher rapidement le muscle après la libération. Ces résultats prolongent les observations d'Ertan et al. (2003), qui notaient chez les experts une activation plus rapide et plus brève de l'extenseur des doigts, ainsi que celles de Baifa et al. (2023), qui soulignaient une moindre activation du fléchisseur superficiel chez les archers élites.

5.4.2.1.2.2. Bras d'arc

Après le lâcher, le groupe d'archers élites présente une activation significativement plus faible du deltoïde médian du bras d'arc (33,6 %) comparé au groupe intermédiaire (42,4 %). Cette différence suggère une capacité supérieure des élites à relâcher activement le bras d'arc dans cette phase, favorisant ainsi une meilleure absorption des forces. Ce relâchement rapide et efficace permet à l'arc de se mouvoir librement, sans interférence corporelle. Ces résultats prolongent les travaux de Kolayiş & Ertan (2016), qui ont montré une diminution rapide et marquée de l'activation du deltoïde médian et postérieur ainsi que du trapèze médian et inférieur immédiatement après la décoche chez les archers, soulignant l'importance du relâchement musculaire dans la phase de suivi.

De plus, les archers élites montrent également une activation plus faible des muscles de l'avant-bras (13,2 % pour l'extenseur des doigts et 14,9 % pour le fléchisseur superficiel, contre respectivement 27,2 % et 22,1 % chez les intermédiaires). Cette moindre sollicitation traduit

une capacité à relâcher rapidement les muscles après le lâcher, évitant les tensions parasites susceptibles de perturber le mouvement de l'arc ou d'induire des vibrations.

À l'inverse, la suractivation observée chez les intermédiaires suggère une crispation compensatoire ou une difficulté à désengager les muscles après la libération. Ces résultats sont en accord avec ceux d'Ertan et al. (2003), qui ont montré que chez les experts, l'activation de l'extenseur des doigts intervient plus rapidement (100 ms vs 200 ms après le clicker) et dure moins longtemps. Les résultats sont aussi alignés avec les travaux de Baifa et al. (2023), qui soulignent une activation plus faible du fléchisseur superficiel chez les archers élites.

5.4.2.1.2.3. Muscles du tronc

Dans notre étude, les archers élites présentent une activation significativement plus faible de l'ensemble des muscles du tronc durant la phase de suivi, comparés aux archers intermédiaires. Cette moindre activation chez les archers de niveau élite suggère une meilleure capacité à stabiliser le tronc avec un minimum de co-contraction, traduisant une économie de mouvement et une meilleure maîtrise posturale. À l'inverse, l'activation plus élevée observée chez les archers intermédiaires pourrait refléter une stratégie compensatoire, mobilisant davantage les muscles abdominaux pour pallier un alignement moins optimal ou une stabilité intrinsèque plus fragile. Cette sur-sollicitation, bien qu'intentionnelle, pourrait induire une rigidité excessive, une plus grande dépense énergétique et des micromouvements indésirables susceptibles d'altérer la précision post-lâcher.

Ces résultats contrastent avec ceux rapportés par Azhar et al. (2021), qui observaient une activation nettement plus élevée du transverse de l'abdomen (30,02 % chez les élites vs 8,75 % chez les débutants) et du multifide (18,82 % vs 8,87 %), interprétée comme une stratégie de stabilisation active chez les archers experts. Plusieurs facteurs méthodologiques peuvent expliquer cette divergence. D'abord, le groupe de débutants étudié par Azhar et al. (2021) avait moins de six mois d'expérience, tandis que notre groupe intermédiaire regroupe des compétiteurs réguliers (Cf. 5.2.1 participants), ce qui modifie les profils d'activation. Ensuite, la fenêtre temporelle d'analyse utilisée pour la phase de suivi n'est pas précisée dans leur protocole, ce qui rend les comparaisons délicates. Enfin, des différences dans la mesure et la normalisation par rapport à la MVC peuvent également influencer les valeurs rapportées. Concernant les obliques externes, cette observation, nouvelle pour la phase de suivi, confirme la continuité du résultat déjà mesuré durant la phase de visée, où les archers élites contractaient également moins les obliques externes que les archers de niveau inférieur.

5.4.2.2. Contrôle postural

5.4.2.2.1. Phase de visée

Nos résultats montrent que les archers élites présentent une surface de déplacement du CdP plus faible (35,6 mm²) que les archers intermédiaires (74,5 mm²). De même, les amplitudes de déplacement sur les axes antéro-postérieur (X) et médiolatéral (Y) sont réduites chez les élites (7,5 mm vs 12 mm pour l'axe AP ; 6,3 mm vs 7,1 mm pour l'axe ML). Cette moindre amplitude traduit une capacité à limiter les oscillations corporelles involontaires, à maintenir une base de soutien plus stable, et à synchroniser efficacement le contrôle postural avec la stabilité de l'arc. Ces ajustements fins contribuent à une visée plus précise et par conséquent, à une meilleure qualité de tir. Ces observations corroborent les travaux de Sarro et al. (2021) et de Tinazci (2011), qui identifient la réduction des oscillations, notamment dans l'axe antéro-postérieur, comme un indicateur clé de performance. Elles s'inscrivent également dans une logique de synergie corps–arc, décrite comme caractéristique des tirs de haute qualité (Sarro et al., 2021).

De plus, les archers élites ont présenté des vitesses de déplacement du CdP plus élevées que les archers intermédiaires. La vitesse globale atteignait 19,7 mm/s chez les élites contre 16,7 mm/s chez les intermédiaires, avec des vitesses également supérieures sur l'axe AP (10,5 mm/s vs 10,2 mm/s), sur l'axe ML (14,1 mm/s vs 10,9 mm/s), et en vitesse maximale (72,2 mm/s vs 61,3 mm/s). Ces résultats indiquent que les archers élites ne cherchent pas à immobiliser totalement leur posture, mais réalisent des micro-ajustements rapides et ciblés pour maintenir un alignement optimal. Ces mouvements, bien que discrets en amplitude, traduisent une régulation active du corps, permettant de corriger instantanément de faibles déviations sans perturber la stabilité globale. Cette stratégie posturale dynamique reflète une boucle de rétroaction sensorimotrice plus performante, où l'équilibre est géré en temps réel pour affiner la visée. Cette interprétation rejoint les travaux de Taha, Haque, et al. (2017), qui soulignent que la maîtrise posturale ne repose pas sur une immobilité stricte, mais sur un contrôle dynamique précis. Elle nuance également les conclusions de Tinazci (2011), qui associait une vitesse maximale moins élevée à l'expertise, en suggérant que la stabilité peut aussi s'exprimer par la vélocité maîtrisée de micro-ajustements posturaux.

L'analyse conjointe de l'activité électromyographique et des données posturales durant la phase de visée montre que les archers intermédiaires sollicitent davantage les muscles stabilisateurs du tronc (transverse, multifides, obliques), alors qu'ils affichent une stabilité moindre, caractérisée par une surface de déplacement du centre de pression deux fois plus importante que celle des élites (74,5 mm² contre 35,6 mm²). Ce constat indique que la stratégie forte co-contraction musculaire au niveau du tronc, privilégiée par les archers intermédiaires, s'avère

contre-productive pour le résultat final. À l'inverse, les élites démontrent qu'une stabilité optimale s'obtient par une gestion efficiente du tonus musculaire, utilisant uniquement la tension minimale nécessaire plutôt qu'une rigidité excessive.

5.4.2.2.2. Phase de suivi

Dans notre étude, les archers élites ont présenté des indicateurs de contrôle postural plus élevés que les archers intermédiaires durant la phase de suivi. Cela inclut une surface de déplacement du CdP plus large (217 mm² vs 117,1 mm²), des amplitudes supérieures sur les axes AP (8,2 mm vs 7,7 mm) et ML (22,7 mm vs 13,4 mm), ainsi que des vitesses maximales plus élevées (242,8 mm/s vs 137,4 mm/s). Ces résultats suggèrent que les archers élites adoptent une stratégie de suivi active et fluide, caractérisée par des mouvements posturaux amples et rapides, mais maîtrisés. Plutôt que de figer leur posture, ils semblent laisser le corps se mouvoir pour absorber l'énergie résiduelle du lâcher, dissipant les forces et les vibrations transmises à l'arc. Cette capacité à relâcher le corps de manière contrôlée tout en maintenant un équilibre dynamique pourrait être une marque d'expertise, traduisant une motricité qui optimise la précision sans rigidité excessive.

Ces observations diffèrent avec les travaux de Spratford & Campbell (2017), qui associent une vitesse maximale élevée du CdP à une baisse de performance, et avec ceux de Simsek et al. (2019), qui montrent que les débutants présentent des oscillations posturales plus importantes que les élites. Plusieurs facteurs méthodologiques peuvent expliquer cette divergence. D'abord, notre fenêtre d'analyse couvre les 0,5 secondes après le lâcher, tandis que Spratford & Campbell (2017) se concentrent sur la seconde suivant le lâcher, ce qui pourrait capter des mouvements post-impact plus amples mais contrôlés chez les élites. Ensuite, leur étude porte sur des archers du même niveau, cherchant à prédire la performance intra-groupe, alors que la nôtre compare deux niveaux d'expertise distincts. Enfin, plusieurs indicateurs que nous avons mesurés (surface, amplitudes AP et ML, vitesses moyennes et axiales) sont peu documentés dans la littérature pour la phase de suivi, ce qui confère à nos résultats un caractère exploratoire. Ils invitent à reconsidérer la notion de « stabilité » non pas comme une immobilité, mais comme une capacité à gérer activement les ajustements posturaux sans compromettre la précision.

5.4.2.3. Cinématique du bras de corde

L'organisation cinématique du bras de corde constitue un facteur clé de la stabilité et de l'efficacité du tir. Nos résultats montrent que les archers élites adoptent une configuration distincte des intermédiaires lors de la phase de visée : l'angle d'abduction de l'épaule est

significativement plus grand (121,1° contre 103,4°) et l'angle de flexion du coude est également plus grand (73,3° contre 53,9°) chez les élites comparés aux intermédiaires.

Ces observations contrastent avec une partie de la littérature suggérant qu'un angle d'abduction plus fermé (Lin et al., 2010; Shinohara & Urabe, 2018) ou une moindre flexion du coude serait (Shinohara & Urabe, 2018) associé à une meilleure performance. La configuration cinématique plus « ouverte » que nous avons observée chez nos élites pourrait donc refléter une stratégie technique différente.

Bien qu'ils adoptent des angles articulaires d'abduction de l'épaule et de flexion du coude plus grands, les archers élites présentent une activation moindre de muscles tels que le deltoïde (chefs médian et postérieur) et le trapèze médian. Cette configuration suggère que cette position du bras de corde favorise un « empilement » osseux permettant de transférer la charge de l'arc à travers la structure squelettique plutôt que par la force musculaire. Cette adaptation fonctionnelle optimise ainsi l'économie d'effort, minimisant la fatigue musculaire et les micro-tremblements au profit d'une meilleure précision.

Lors de la phase de suivi, l'angle d'abduction de l'épaule était plus petit chez les archers élites que chez les archers intermédiaires (91,5° contre 102,3°). L'angle de flexion du coude était plus grand chez les archers élites que chez les archers intermédiaires (56,5 contre 45,4 degrés ± 20,0). Ces résultats sont nouveaux dans la littérature pour la phase de suivi. Au niveau musculaire, les archers élites relâchent le deltoïde médian (principal abducteur de l'épaule) tout en maintenant une forte activation des trapèzes médian et supérieur. Cette synergie démontre que le recul du bras après le lâcher n'est pas une traction active, mais la conséquence directe de la rétraction de la scapula, validant ainsi l'hypothèse d'un mouvement de suivi qui opère comme la continuité de la traction dorsale.

5.4.2.4. Amplitude thoracique

L'amplitude de mouvement thoracique durant la phase de visée représente une mesure relativement nouvelle dans la littérature sur le tir à l'arc, offrant des informations sur la gestion de la respiration pendant l'exécution du tir. Nos résultats montrent que cette amplitude est significativement plus élevée chez les archers intermédiaires par rapport aux élites. Cette observation confirme que les archers élites exercent un meilleur contrôle respiratoire (Mohamed et al., 2014), Une respiration accélérée forcée augmentant les oscillations posturales notamment dans l'axe antéro-postérieur (Kuczyński & Wieloch, 2008), les archers de niveau élites minimisent ainsi les fluctuations thoraciques qui pourraient perturber la stabilité du haut du corps en phase de visée. En limitant ces oscillations liées à la respiration, les archers de

niveau élite intègrent de manière optimale la synergie entre le contrôle ventilatoire et le maintien postural, contribuant ainsi à une meilleure précision.

5.4.2.5. Durée de la phase de visée

Dans notre étude, la durée de la phase de visée s'est révélée significativement plus courte chez les archers élites (2,6s) que chez les archers intermédiaires (3,4s). Cette différence temporelle met en évidence la capacité des experts à atteindre plus rapidement un alignement optimal et à déclencher leur tir sans prolonger inutilement la phase de maintien. Ce raccourcissement limite la fatigue neuromusculaire, réduit les risques de tremblements ou de perturbations posturales, et reflète une exécution plus fluide et maîtrisée du geste. Ces résultats rejoignent ceux de Sarro et al. (2021), qui ont montré qu'un temps de visée moyen de 2,07 secondes caractérisait les tirs les plus performants, contre 3,55 secondes pour les moins performants. De manière plus générale, la littérature converge vers une corrélation négative entre durée de visée et performance (Sarro et al., 2021; Taha, Haque, et al., 2017; Tinazci, 2011), en soulignant qu'un maintien prolongé d'une contraction isométrique intense peut accroître les tremblements (Gottlieb & Lippold, 1983) et nuire à la stabilité, compromettant ainsi la précision du tir.

5.4.2.6. Temps de réaction au clicker

Dans notre étude, aucune différence significative du TRC n'a été observée entre les archers élites et les archers intermédiaires. Cette absence de distinction entre deux groupes ayant une certaine expérience dans la pratique du tir à l'arc suggère que le TRC est une compétence temporelle bien maîtrisée dès le niveau intermédiaire. Il pourrait représenter un seuil de compétence atteint relativement tôt dans la progression, au-delà duquel il ne constitue plus un critère discriminant entre niveaux d'expertise proches. Cette interprétation nuance les conclusions de la littérature, notamment celles d'Ertan et al. (2003), qui ont montré que les archers expérimentés réagissent plus rapidement au clicker que les non-archers, en initiant plus vite la contraction de l'extenseur commun des doigts et le relâchement du fléchisseur superficiel. Elle s'éloigne également des résultats de Spratford & Campbell (2017), qui identifient le TRC comme un indicateur direct de performance, capable d'expliquer une variation de 0,54 point sur le score. Ces études, centrées sur des comparaisons entre novices et experts ou sur des variations intra-groupes, ne prennent pas en compte la saturation possible de cette compétence à partir d'un certain niveau.

5.4.3. Indices de variabilité

Notre étude a mis en évidence une variabilité plus faible chez les archers élites que chez les intermédiaires pour plusieurs paramètres clés, notamment durant la phase de visée. Cela concerne l'activation de l'oblique externe du bras de corde (écart-type de 1,1 % vs 3,2 %), la surface du CdP (16,2 mm² vs 34,4 mm²), l'amplitude du CdP sur l'axe AP (2,5 mm vs 4 mm), et l'angle d'abduction de l'épaule (3,6° vs 11,2°). Une tendance similaire est observée durant la phase de suivi pour l'oblique externe du bras de corde (2 % vs 4,2 %). Ces résultats confirment que la régularité du geste est un marqueur d'expertise, en cohérence avec les travaux de Clarys et al. (1990) et de Soylu et al. (2006), qui ont montré que les archers élites présentent des schémas EMG moins variables que les débutants.

Cependant, la variabilité de la vitesse maximale du CdP était plus élevée chez les élites durant la phase de suivi (47,7 mm/s vs 38,8 mm/s), ce qui constitue une divergence notable avec l'attente d'une variabilité uniformément plus faible chez les experts. Cette observation suggère qu'une variabilité plus grande peut être utile, car elle reflète un ajustement continu et intentionnel du contrôle postural lors de certains tirs. Elle rejoint les résultats de Serrien et al. (2018) qui proposent que certains micromouvements s'organisent en synergies compensatoires pour maintenir la stabilité de la flèche. L'expertise ne consisterait donc pas uniquement à réduire la variabilité, mais à en gérer les formes utiles pour optimiser la précision.

Malgré ces tendances, peu de paramètres ont montré des différences significatives de variabilité entre les groupes. Cette observation s'explique en partie par la nature de notre échantillon : les archers intermédiaires sont déjà expérimentés et engagés en compétition depuis plusieurs années. Contrairement aux études de Soylu et al. (2006) ou Callaway et al. (2017) qui comparent des non-archers ou débutants à des élites, notre comparaison entre deux niveaux avancés réduit les écarts observables. Il est donc plausible que de nombreux aspects de la reproductibilité du geste soient déjà bien établis à ce niveau intermédiaire.

Dans ce contexte, le passage d'un niveau intermédiaire à un niveau élite pourrait être caractérisé non par une réduction globale de la variabilité, mais par une optimisation fine de sa gestion. Les critères discriminants de performance à très haut niveau pourraient nécessiter des approches plus complexes, telles que l'analyse de la structure de la variabilité (récurrence, chaos déterministe) ou des interactions entre paramètres. Cette perspective prolonge les travaux de Vendrame et al. (2022), qui insistent sur la constance du geste comme fondement de l'expertise, et invite à considérer que la variabilité non fonctionnelle doit être minimisée, tandis que certaines fluctuations maîtrisées peuvent être exploitées pour affiner le contrôle moteur.

5.4.4. Applications pratiques

Cette étude fournit des indications précieuses pour les entraîneurs, en mentionnant les indicateurs différenciant le niveau intermédiaire et le niveau élite en tir à l'arc. Certaines différences avec la littérature observée dans cette étude peuvent s'expliquer par les différences méthodologiques telles que les fenêtres d'analyse ou les populations étudiées.

Un axe d'amélioration pour les archers intermédiaires concerne l'économie musculaire et le relâchement actif. Nos résultats montrent que les archers élites, aussi bien en phase de visée qu'en phase de suivi, présentent une activation significativement plus faible des muscles clés tels que le fléchisseur superficiel des doigts (bras de corde), les deltoïdes postérieur et médian (bras de corde), l'extenseur des doigts (bras d'arc), ainsi que l'ensemble des muscles du tronc (transverse de l'abdomen, multifides, obliques externes bilatéraux). Cette sur-activation chez les intermédiaires suggère une rigidité excessive et une plus grande dépense énergétique, potentiellement génératrices de tremblements. Les entraîneurs devraient donc insister sur l'apprentissage du relâchement conscient et précis des tensions inutiles. En améliorant l'alignement du squelette et la transmission des forces au travers de la posture plutôt que par un recours excessif à la contraction musculaire, des exercices ciblés (comme de la proprioception, le *biofeedback* EMG ou les techniques de relaxation) peuvent contribuer à développer une utilisation plus efficace du système neuromusculaire.

Parallèlement à ce relâchement, l'étude met en lumière l'importance d'un renforcement et d'un contrôle sélectif des stabilisateurs clés. Certains muscles comme le trapèze supérieur (bras de corde) et le deltoïde médian (bras d'arc) en phase de visée, ou les trapèzes médian et supérieur (bras de corde) en phase de suivi, sont plus activés chez les élites. Ces muscles sont importants pour la stabilisation dynamique de la scapula et le soutien de l'arc. Les programmes d'entraînement devraient intégrer des exercices spécifiques pour renforcer et apprendre à activer sélectivement ces stabilisateurs scapulaires, garantissant un positionnement optimal et une meilleure absorption des forces sans rigidifier l'ensemble du système.

Pour le contrôle postural, en phase de visée, nos résultats indiquent que les élites associent une amplitude d'oscillation réduite du CdP à une plus grande vitesse de déplacement. Cela suggère une stabilité dynamique caractérisée par des micro-ajustements rapides et précis pour maintenir l'alignement. Les entraîneurs devraient cibler des exercices qui minimisent les oscillations involontaires (surtout antéro-postérieures) tout en développant une proprioception avancée pour des corrections fines et rapides, évitant ainsi une rigidité contre-productive.

En phase de suivi, les élites présentent une surface, des amplitudes et des vitesses de déplacement du CdP plus élevées. Cette divergence avec certaines études suggère une stratégie

d'absorption active de l'énergie post-lâcher. Plutôt que de figer le corps, les élites laisseraient des mouvements posturaux amples mais contrôlés dissiper l'énergie résiduelle (K. Kim et al., 2025). Les entraîneurs pourraient donc encourager un relâchement dynamique et intentionnel du corps après la décoche, permettant à l'arc de se mouvoir librement et d'absorber les vibrations, optimisant ainsi la trajectoire de la flèche sans rigidité excessive.

En ce qui concerne l'organisation cinématique du membre supérieur, nos résultats montrent que les archers élites ont un angle d'abduction de l'épaule et un angle de flexion du coude significativement plus grands que les archers intermédiaires. Ces observations vont à l'encontre de précédentes études qui suggèrent qu'un angle d'abduction plus fermé (Lin et al., 2010; Shinohara & Urabe, 2018) ou une moindre flexion du coude (Shinohara & Urabe, 2018) seraient associées à une meilleure performance. Cette contradiction invite donc à la prudence, même si l'explication la plus probable indique une stratégie technique différente. Ainsi, plutôt que de viser une configuration avec des angles réduits de l'épaule ou du coude, il pourrait être bénéfique de travailler sur la capacité de l'archer à trouver et maintenir des angles articulaires potentiellement plus grands.

L'amplitude de mouvement thoracique réduite chez les élites en phase de visée indique un meilleur contrôle respiratoire. Les entraîneurs devraient enseigner des techniques de respiration ciblées (par exemple, des apnées contrôlées ou des respirations très peu profondes) pour minimiser les oscillations du tronc, favorisant ainsi une posture de tir plus stable.

De plus, la durée de visée significativement plus courte chez les élites reflète leur capacité à atteindre rapidement un alignement optimal et à déclencher le tir sans prolongation inutile. Cette efficience temporelle est essentielle pour réduire la fatigue neuromusculaire et les tremblements (Gottlieb & Lippold, 1983). Les entraîneurs doivent donc travailler sur la fluidité et la rapidité d'exécution du cycle de tir, encourageant les archers à raccourcir le temps entre l'arrivée en visée et le lâcher, une fois la stabilité atteinte.

Enfin, l'absence de différence significative concernant le temps de réaction au clicker (TRC) entre élites et intermédiaires suggère que cette compétence est bien maîtrisée dès le niveau intermédiaire. Pour les entraîneurs, cela signifie que le TRC devrait être une compétence fondamentale à acquérir et à maintenir tôt dans la progression, mais qu'il n'est plus un levier discriminant d'amélioration au-delà d'un certain seuil d'expertise. L'attention peut alors se porter sur d'autres facteurs de performance plus discriminants à haut niveau.

La gestion de la variabilité est un pilier de l'expertise en tir à l'arc. Nos résultats confirment que les archers élites se distinguent par une variabilité plus faible dans leurs scores ainsi que dans plusieurs paramètres clés lors de la visée (oblique externe du bras de corde, surface et amplitude

antéro-postérieure du CdP, angle d'abduction de l'épaule) et lors du suivi (oblique externe du bras de corde). Les entraîneurs devraient donc cibler la minimisation de la variabilité dans ces indicateurs pour encourager la répétabilité du geste et la constance d'exécution, en utilisant par exemple des feedbacks qui peuvent aider les archers intermédiaires à stabiliser ces paramètres.

Cependant, l'observation d'une variabilité plus élevée de la vitesse maximale du CdP en phase de suivi chez les élites nuance l'idée d'une réduction globale de la variabilité. Cela suggère que certaines formes de variabilité peuvent être fonctionnelles, traduisant une stratégie de contrôle dynamique actif pour absorber et dissiper l'énergie post-lâcher. L'objectif n'est pas une rigidité totale, mais une optimisation fine de la gestion de la variabilité, où les fluctuations maîtrisées contribuent à affiner le contrôle moteur et à maintenir la précision dans des conditions dynamiques. Cette approche est particulièrement pertinente pour le passage d'un niveau intermédiaire à élite, où la reproductibilité est déjà établie mais peut être affinée par une meilleure gestion des ajustements subtils.

5.4.5. Limites méthodologiques

Malgré les informations précieuses qu'elle apporte, notre étude présente plusieurs limites inhérentes à la recherche sur des athlètes. La taille réduite de l'échantillon (8 archers élites et 7 intermédiaires) limite la puissance statistique et la généralisation des résultats, bien que cet effectif soit courant dans ce type d'investigation. Un échantillon plus conséquent aurait non seulement permis d’augmenter la puissance statistique, mais aussi le développement d'un modèle de prédiction pour quantifier l'influence relative de chaque facteur sur la performance.

Même si cette étude a tenté de reproduire la réalité de la compétition (tir à 70m, matériel personnel, en extérieur), les conditions expérimentales n'ont pas intégré tous les facteurs psychologiques tels que la pression de l'enjeu ou la fatigue cumulée par les différents matchs joués lors d’une compétition.

Enfin, et c'est une limite notable, tous les archers élites ayant bénéficié de l'enseignement du même entraîneur, il est possible que des habitudes techniques partagées aient influencé les résultats, limitant potentiellement la généralisation à des athlètes formés sous d'autres philosophies d'entraînement. Des recherches futures impliquant des échantillons plus larges et diversifiés, seraient donc nécessaires pour confirmer et approfondir ces conclusions.

5.4.6. Perspectives de recherche

Notre étude a exploré plusieurs aspects importants de la performance au tir à l'arc, comparant des archers de haut niveau et des archers intermédiaires, et ouvre la voie à de nombreuses pistes

pour l'avenir. Les quelques divergences avec la littérature existante, systématiquement justifiées par des différences méthodologiques (fenêtres d'analyse, niveaux des échantillons), soulignent la nécessité d'une standardisation des protocoles d'évaluation. La méthodologie complète développée ici pourrait servir de cadre de référence pour de futures investigations.

Pour aller plus loin, plusieurs directions sont intéressantes. Il faudrait d'abord, pour confirmer que nos conclusions s'appliquent à un plus grand nombre d'archers et pour comprendre comment l'expertise se développe, mener des études qui suivent les archers sur le long terme et comparent plus de groupes différents, avec différents entraîneurs. Ensuite, l'analyse de la variabilité fonctionnelle, comme la vitesse du Centre de Pression après le tir, nous invite à utiliser des méthodes d'analyse plus sophistiquées que les simples moyennes, afin de voir comment ces mouvements s'organisent et en quoi ils sont utiles. Une meilleure compréhension de l'activité des muscles du tronc et de leur synergie serait particulièrement bénéfique. Enfin, il peut être pertinent d'étudier comment le stress, l'anxiété ou la fatigue en compétition influencent la biomécanique du tir, en intégrant ces facteurs psychologiques dans des conditions simulées plus proches de la réalité.

5.5. Conclusion

Cette étude multidimensionnelle a clairement mis en lumière les stratégies distinctives des archers élites par rapport aux intermédiaires, notamment via une économie musculaire optimisée, un contrôle postural dynamique et une gestion précise du temps et de la respiration. Les élites se caractérisent par un relâchement actif, une stabilité posturale associée à des micro-ajustements rapides en visée, et une absorption contrôlée de l'énergie en suivi. La variabilité est réduite pour quelques paramètres par les archers élites, minimisant les fluctuations indésirables tout en exploitant celles qui sont fonctionnelles. Ces résultats offrent des applications pratiques directes pour l'entraînement, malgré certaines divergences avec la littérature. Ils soulignent que le passage à l'élite repose sur une optimisation fine des coordinations neuromusculaires et posturales, invitant à une réévaluation de la stabilité comme une capacité d'adaptation plutôt qu’une aptitude à une grande immobilité.

Après l'identification des paramètres discriminants entre archers intermédiaires et élites, l'étape suivante consisterait à analyser les facteurs de variabilité du score au sein des archers élites eux-mêmes, afin de déceler d'éventuelles stratégies individuelles spécifiques, et non systématiquement applicables à l'ensemble du groupe.

6. Etude 2 : Etude multiparamétrique du tir à l'arc de haut niveau : distinguer les stratégies de performance individuelles et communes pendant les phases de visée et de suivi

6.1. Introduction

Le tir à l'arc de haut niveau est un sport de précision où la performance dépend de différents déterminants clés, tels que la stabilité posturale (Edelmann-Nusser et al., 2006; Keast & Elliott, 1990; Sarro et al., 2021; Simsek et al., 2019; Spratford & Campbell, 2017; Taha, Haque, et al., 2017; Zawi & Mohamed, 2013), l'activation neuromusculaire (Azhar et al., 2021; Baifa et al., 2023; Ertan, 2009; Ertan et al., 2003; Hennessy & Parker, 1990; Kolayiş & Ertan, 2016, 2016; Matsunaga et al., 2017; Nishizono et al., 1987; Shinohara & Urabe, 2018; Simsek et al., 2018; Taha, Haque, et al., 2017; Tinazci, 2011) ou encore les stratégies temporelles (Callaway et al., 2017; Ertan et al., 2003; Sarro et al., 2021; Spratford & Campbell, 2017; Taha, Haque, et al., 2017; Tinazci, 2011).

À ce jour, la plupart des études a évalué ces différents paramètres un à un (Baifa et al., 2023; Callaway et al., 2017; Ertan et al., 2005; Sarro et al., 2021; Simsek et al., 2018; Zawi & Mohamed, 2013). Ces études, bien qu'informatives, négligent généralement les effets d'interaction potentiels qui existent entre les différents déterminants de la performance, et ne permettent pas une compréhension globale des mécanismes de performance. Seule l'étude de Tinazci (2011) a analysé simultanément plusieurs facteurs, incluant l'activité musculaire, le contrôle postural, le temps de visée et le TRC. Cependant, cette étude est limitée par la petite taille de son échantillon, n'impliquant que quatre archers ayant chacun tiré trente flèches. Cette lacune méthodologique nécessite des recherches futures conçues pour évaluer simultanément de multiples déterminants de la performance au sein d'une cohorte plus large de participants et avec un volume de tirs plus important.

La plupart des recherches en tir à l'arc se sont concentrées sur des comparaisons intergroupes pour identifier les tendances liées à la performance (Ariffin & Rambely, 2017; Azhar et al., 2021; Baifa et al., 2023; Ertan, 2009; Ertan et al., 2003; Matsunaga et al., 2017; Simsek et al., 2014, 2018; Taha, Haque, et al., 2017). Bien que cette approche révèle des schémas généraux, elle occulte souvent la variabilité interindividuelle des stratégies motrices. Par conséquent, il n'est pas clairement établi si les déterminants clés de la performance d'élite sont uniformes entre les athlètes, ou si des archers adoptent des stratégies individuelles, qu'elles soient compensatoires ou visant à améliorer la performance.

Pour combler cette lacune, cette étude emploie une analyse à deux niveaux. Premièrement, une analyse à l'échelle du groupe sera menée pour identifier les facteurs de performance communs

à tous les participants. Deuxièmement, une analyse à l'échelle individuelle examinera la combinaison et l'expression uniques de ces facteurs chez chaque archer. Cette méthodologie à double volet est essentielle pour différencier les principes fondamentaux de la haute performance des stratégies personnalisées. Par conséquent, l'objectif de cette étude est d'évaluer si les déterminants de la performance en tir à l'arc de haut niveau (contrôle postural, activité neuromusculaire, configuration corporelle et stratégies temporelles) sont constants au sein d'un groupe de huit archers ou spécifiques à chaque archer.

6.2. Matériel et méthodes

Cette étude s'intéresse uniquement aux archers du groupe de niveau élite de l'Etude 1, en utilisant la même méthodologie et les mêmes outils de mesure.

6.2.1. Participants

Le groupe d'archers dans cette étude correspond aux archers du groupe de niveau élite de l'Etude 1. Ils sont huit archers français de haut niveau, sains et volontaires.

Tous les participants ont été informés des mesures, de l'objectif et des risques potentiels associés au dispositif expérimental, et ont donné leur consentement écrit et éclairé avant la collecte des données. L'étude a été menée conformément aux directives de la Déclaration d'Helsinki et a été approuvée par le Comité d'Éthique pour la Recherche en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (CER STAPS, n°IRB00012476-2024-20-11-356).

6.2.2. Protocole expérimental

Le protocole expérimental est globalement identique à celui décrit dans le chapitre « 5.2.2 protocole expérimental ».

A la différence de l'Etude 1, les participants ont effectué huit volées de neuf flèches. Ces huit volées correspondent aux quatre analysées de la première étude, ainsi que quatre volées supplémentaires tirées juste après.

Les scores des flèches ont été catégorisés en trois groupes selon leur précision : « Élevé » (score de 10), « Moyen » (score de 9) et « Faible » (score $\leq$ 8).

6.2.3. Outils de mesures et analyse des données

Les outils de mesure utilisés pour cette deuxième étude ainsi que la méthode d'analyse des données sont identiques à ce qui est décrit de manière exhaustive dans le Chapitre « 5.2.3 Outils de mesures et analyse des données » (Étude 1).

Les outils de mesure et les procédures d'analyse des données étaient les mêmes, incluant :

- Activité neuromusculaire (5.2.3.1 Capteurs électromyographiques) : système EMG de surface sans fil (Noraxon Ultium EMG, 2 000 Hz) pour 14 muscles du tronc et des membres supérieurs, avec normalisation par MVC.
- Contrôle postural (5.2.3.2 Plateforme de force) : plateforme de forces (AMTI AccuPower-O, 1 000 Hz) pour les paramètres du Centre de Pression (vitesse, amplitude, surface, vitesse max).
- Cinématique du bras de corde (5.2.3.3 Centrales inertielles) : système IMU (Noraxon Ultium Motion, 200 Hz) pour l'abduction de l'épaule et la flexion du coude.
- Mouvement du thorax (5.2.3.4 Ceinture thoracique) : ceinture thoracique (T-Sens Respiration, 32 Hz) pour l'amplitude du mouvement.
- Stratégies temporelles (5.2.3.5 Caméras) : deux caméras (GoPro Hero 9 Black, 240 Hz) pour la durée de la visée et le TRC.

Toutes les données ont été traitées et synchronisées selon les mêmes protocoles de filtrage et de calcul des variables décrits dans « 5.2.3 Outils de mesures et analyse des données ».

6.2.4. Statistiques

Toutes les étapes de traitement des données, y compris le filtrage, la rectification, la normalisation et les calculs, ont été effectuées à l'aide du logiciel MATLAB (R2022b, The MathWorks Inc., Natick, USA).

L'analyse a été structurée en deux temps. Dans un premier temps, les différents paramètres ont été comparés en fonction des groupes de niveaux de score (Faible, Moyen et Elevé) afin d'identifier les déterminants de performance inhérents au niveau du groupe. Dans un second temps, les paramètres qui n'ont pas montré de différences significatives au niveau du groupe ont été analysés individuellement pour identifier des stratégies spécifiques à chaque individu. Ainsi, pour chaque archer, les valeurs des paramètres entre les différents groupes de scores (Faible, Moyen et Elevé) ont été comparées.

Pour les deux analyses, des tests de Kruskal-Wallis ont été réalisés, tant au niveau du groupe qu'au niveau individuel. Nous avons choisi cette approche non-paramétrique en deux étapes car elle représente la méthode la plus appropriée pour notre objectif, étant donné notre petite taille d'échantillon (N=8) (Field, 2024). Lorsque des différences significatives ont été trouvées, des comparaisons post-hoc par paires ont été effectuées par des tests de Wilcoxon, avec des valeurs p ajustées par la correction de Bonferroni. Le niveau de significativité statistique a été fixé à $p<0,05$. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de RStudio version 2024.12.1

(R Core Team, Vienne, Autriche). Les analyses ont été appliquées aux paramètres mesurés (Tableau 1), incluant l'activité neuromusculaire (14 paramètres), la configuration corporelle (3 paramètres), les stratégies temporelles (2 paramètres) et le contrôle postural (7 paramètres).

Tableau 1: Liste des variables mesurées

Champ de mesure	Variables (unité)
Contribution musculaire	Pourcentage d'activité neuromusculaire relative à la MVC (%)
Contrôle postural	Surface de déplacement du CdP à 95 % (mm^2)
	Amplitude de déplacement du CdP sur l'axe X et l'axe Y (mm)
	Vitesse moyenne de déplacement du CdP (globale, axe X, axe Y) et vitesse maximale de déplacement global du CdP (mm/s)
Configuration corporelle	Abduction moyenne de l'épaule de corde (degrés)
	Flexion moyenne du coude de corde (degrés)
	Amplitude de mouvement de la poitrine (u.a)
Stratégies temporelles	Temps de réaction au clicker (ms)
	Durée totale de la phase de visée (s)

6.3. Résultats

Afin d'améliorer la clarté de cette section, seuls les paramètres présentant des différences significatives seront illustrés dans cette section.

6.3.1. Scores

Pour chaque archer, le score correspondant à chaque flèche tirée a été systématiquement enregistré. En raison de problèmes de mesure liés aux capteurs EMG, aux unités IMU ou à la plateforme de force, certains essais ont été exclus de l'analyse. Cela a entraîné des variations dans le nombre de flèches analysées par archer. Le nombre de flèches ayant un score de 8 ou moins (faible), 9 (moyen) et 10 (élevé) est présenté dans le Tableau 2, pour chaque participant et pour l'ensemble du groupe.

Tableau 2 : Nombre de flèches pour chaque catégorie de score, pour chaque archer. A1 à A8 représentent l'archer 1 à l'archer 8.

Archers	Faible	Moyen	Elevé	Total
A1	20	28	15	63
A2	12	29	31	72
A3	12	32	28	72
A4	18	22	32	72
A5	13	31	28	72
A6	23	32	17	72
A7	36	29	7	72
A8	29	17	8	54
Groupe	163	220	166	549

6.3.2. Comparaisons de groupes

6.3.2.1. Activité neuromusculaire

Au niveau de l'analyse de groupes, plusieurs paramètres ont montré des différences significatives entre les scores durant la phase de visée. Les résultats relatifs au bras de corde, au bras d'arc et aux muscles du tronc sont présentés respectivement dans les Figures 25a, 25b et 25c. L'activation neuromusculaire du deltoïde postérieur et du trapèze moyen du côté du bras de corde était significativement plus élevée lors des scores faibles par rapport aux scores élevés, aucune différence significative n'ayant été observée entre les scores faibles et moyens. Du côté du bras d'arc, l'activation de l'extenseur des doigts était également significativement plus importante lors des scores faibles par rapport aux scores moyens et élevés.

Inversement, l'extenseur des doigts du côté du bras de corde a montré une activation réduite lors des scores faibles par rapport aux scores élevés, ainsi que lors des scores moyens par rapport aux scores élevés. De même, le fléchisseur des doigts superficiel du côté du bras de corde a présenté une activation significativement plus faible pour les scores faibles par rapport aux scores moyens et élevés, et pour les scores moyens par rapport aux scores élevés. Du côté du bras d'arc, le fléchisseur des doigts superficiel a montré une activation plus faible lors des scores faibles par rapport aux scores moyens et élevés. Le muscle multifide du côté du bras de corde a démontré une activation réduite lors des scores faibles par rapport aux scores élevés, et également lors des scores moyens par rapport aux scores élevés. Aucune différence significative n'a été observée pour les autres muscles mesurés dans cette étude.

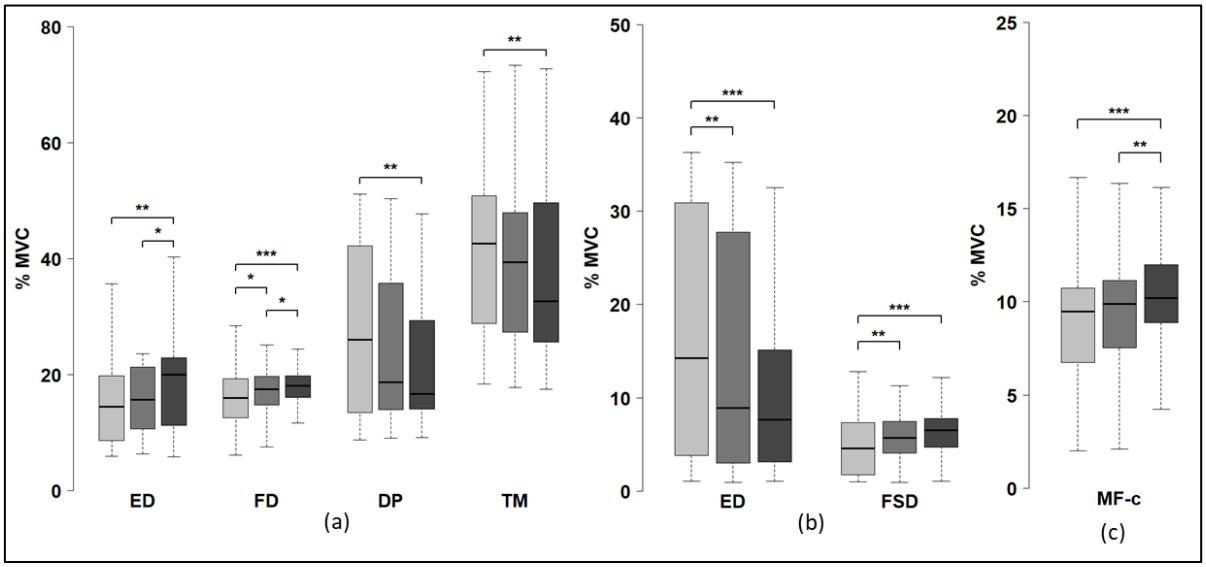


Figure 25 : Valeur de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau de score (gris clair : faible ; gris intermédiaire : moyen ; gris foncé : élevé) durant la phase de visée : (a) muscles du bras de corde (ED : extenseur des doigts, FSD : fléchisseur superficiel des doigts, DP : deltoïde postérieur, TM : trapèze moyen), (b) muscles du bras d'arc (ED : extenseur des doigts, FSD : fléchisseur superficiel des doigts), (c) muscles du tronc (MF-c = multifide côté bras de corde). * $p<0.05$, ** $p<0,01$, *** $p<0,001$

Durant la phase de suivi, l'activation neuromusculaire de l'extenseur des doigts du côté du bras d'arc était significativement plus importante lors des scores faibles que lors des scores moyens et élevés (Figure 26a). De même, le muscle transverse a montré une activation plus élevée lors des scores faibles que lors des scores moyens et élevés (Figure 26b). Inversement, l'activation du fléchisseur des doigts superficiel du côté du bras d'arc était significativement plus faible pour les scores faibles que pour les scores élevés, sans différence significative entre les scores faibles et moyens (Figure 26a). De plus, l'oblique externe du côté du bras de corde était moins activé lors des scores faibles par rapport aux scores élevés, et lors des scores moyens par rapport aux scores élevés (Figure 26b). Aucune autre différence significative dans l'activation neuromusculaire n'a été observée pour les autres muscles.

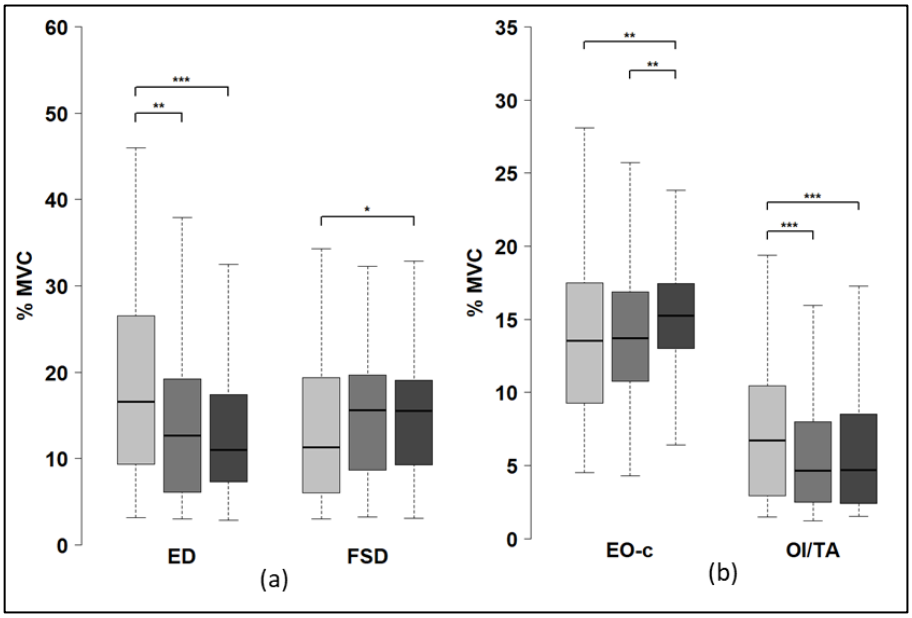


Figure 26 : Valeur de l'activité neuromusculaire en fonction du niveau de score (gris clair : faible ; gris intermédiaire : moyen ; gris foncé : élevé) durant la phase de suivi : (a) muscles du bras d'arc (ED : extenseur des doigts, FDS : fléchisseur superficiel des doigts), et (b) muscles du tronc (EO-d : oblique externe côté corde, TA : transverse de l'abdomen). * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001

6.3.2.2. Contrôle postural

Comme le montre la Figure 27, le contrôle postural durant la phase de visée était caractérisé par des variations significatives du CdP entre les niveaux de scores. Plus précisément, la vitesse moyenne du CdP et la vitesse moyenne du CdP le long de l'axe médiolatéral (Vy) étaient plus élevées pour les scores faibles par rapport aux scores moyens et élevés. En revanche, la vitesse moyenne du CdP le long de l'axe antéropostérieur (Vx) était significativement plus élevée pour les scores faibles uniquement par rapport aux scores élevés.

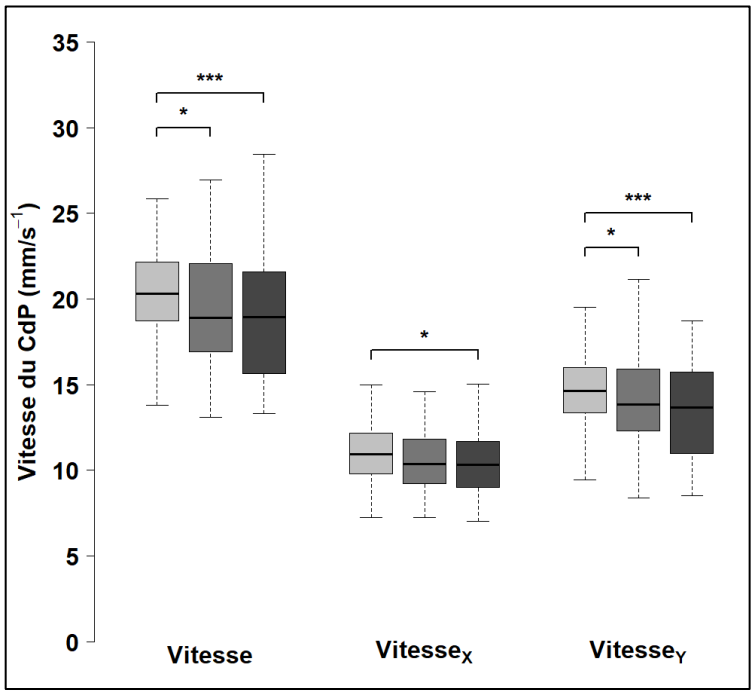


Figure 27 : Variables de contrôle postural en fonction du niveau de score (gris clair : faible ; gris intermédiaire : moyen ; gris foncé : élevé) durant la phase de visée (V : vitesse du CdP, Vx et Vy : vitesse du CdP le long de l'axe antéro-postérieur et médiolatéral). * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001

Durant la phase de suivi, l'amplitude de déplacement médiolatéral du CdP (Ry) était significativement plus faible pour les scores moyens par rapport aux scores élevés, sans différence significative avec les scores faibles (Figure 28a). Le long de l'axe antéropostérieur (Rx), le déplacement du CdP était plus élevé lors des scores faibles que lors des scores moyens et élevés (Figure 28a). En complément, la vitesse maximale de déplacement du CdP était plus importante lors des scores faibles que lors des scores moyens et élevés (Figure 28b). Aucune autre différence significative n'a été observée pour les paramètres restants du contrôle postural.

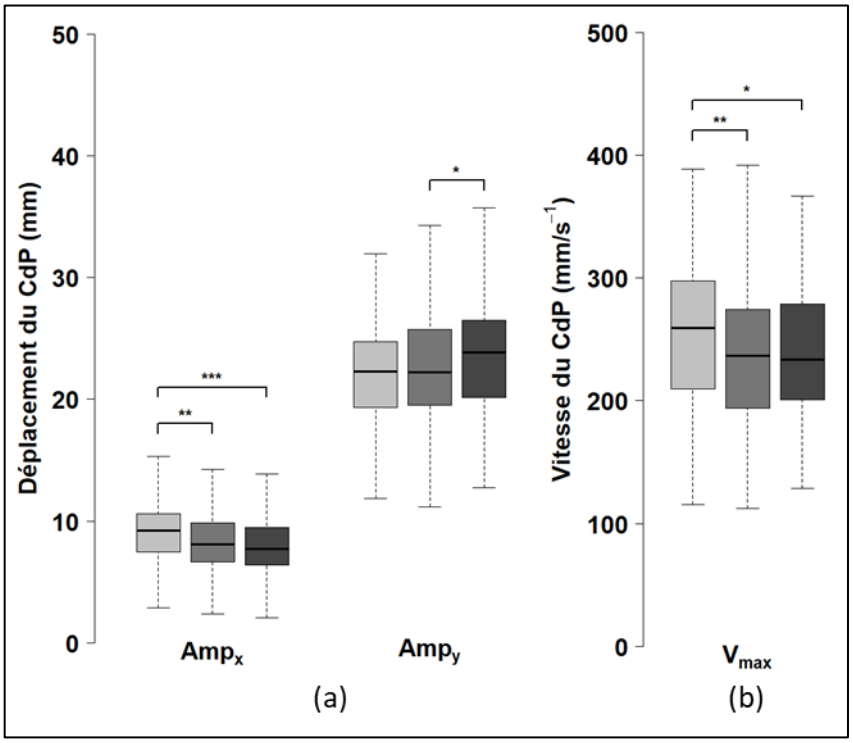


Figure 28 : Variables de contrôle postural en fonction du niveau de score (gris clair : faible ; gris intermédiaire : moyen ; gris foncé : élevé) durant la phase de suivi : (a) déplacement du CdP le long des axes antéro-postérieur (Rx) et médiolatéral (Ry) ; (b) vitesse maximale du CdP. * $p<0.05$, ** $p<0,01$, *** $p<0,001$

6.3.2.3. Configuration corporelle

Aucune différence significative dans les variables cinématiques n'a été trouvée entre les niveaux de scores, que ce soit durant les phases de visée ou de suivi.

6.3.2.4. Stratégies temporelles

Comme le montre la Figure 29, le TRC était significativement plus long pour les scores faibles par rapport aux scores élevés, sans différence avec les scores moyens. Aucune autre différence significative n'a été observée pour les autres variables.

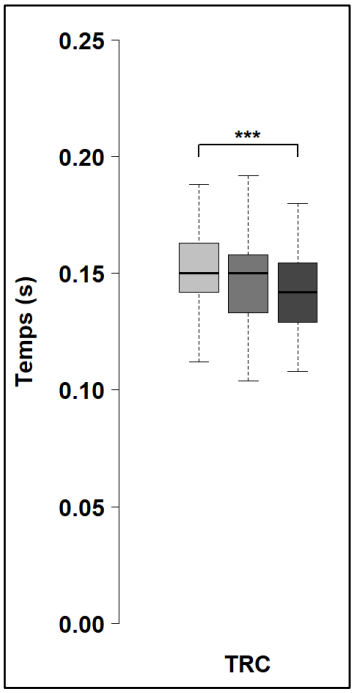


Figure 29 : Variables temporelles (TRC : temps de réaction au clicker) en fonction des différents niveaux de score (gris clair : faible ; gris intermédiaire : moyen ; gris foncé : élevé) durant la phase de visée. * p<0.05, ** p<0,01, *** p<0,001

6.3.3. Comparaisons individuelles

Parmi les 26 paramètres analysés, 11 liés à la visée et 7 liés au suivi n'ont pas montré de différences significatives entre les niveaux de scores au niveau du groupe. Cette section explore les stratégies individuelles que les archers peuvent adopter pour atteindre leur meilleure performance.

6.3.3.1. Activité neuromusculaire

Durant la phase de visée, pour l'archer A3, le deltoïde moyen du côté du bras de corde était moins actif lors des scores élevés par rapport aux scores moyens. Pour le même archer, le deltoïde postérieur du côté du bras de corde tendait à être moins actif lors des scores élevés que lors des scores faibles (p=0.058) et moyens. De même, pour l'archer A1, l'oblique externe du côté du bras de corde a montré une activation réduite lors des scores élevés par rapport aux scores faibles, sans différence significative entre les scores faibles et moyens. Du côté du bras d'arc, le deltoïde moyen a affiché une activité réduite lors des scores élevés par rapport aux scores faibles pour les archers A1 et A8, et par rapport aux scores moyens pour l'archer A3. Aucune autre différence significative dans l'activation musculaire n'a été observée durant la phase de visée. Les valeurs d'activation musculaire pour les muscles présentant des différences significatives par archer durant la phase de visée sont présentées dans le Tableau 3.

Durant la phase de suivi, l'activation du trapèze supérieur du côté du bras de corde a varié en fonction du score pour trois participants. Plus précisément, A1 et A5 ont montré une activation plus élevée lors des scores faibles par rapport aux scores moyens ($p=0.054$) ; tandis que A5 a également présenté une activation plus faible lors des scores faibles par rapport aux scores élevés. Des différences dans l'activation de l'oblique externe du côté du bras de corde ont été observées pour A3 et A6, mais de manière distincte pour chaque participant. Pour A3, l'activation était plus élevée lors des scores faibles par rapport aux scores moyens. Pour A6, elle était plus faible lors des scores faibles par rapport aux scores élevés. Le multifide du côté du bras d'arc pour A6 a montré une activation plus importante lors des scores faibles par rapport aux scores élevés. De plus, le fléchisseur des doigts superficiel a également présenté une activation plus élevée lors des scores faibles par rapport aux scores moyens ($p=0.052$) et aux scores élevés pour A6. Le deltoïde médial du côté du bras de corde était plus activé lors des scores faibles par rapport aux scores élevés pour A7. Pour A1, le deltoïde postérieur était plus activé lors des scores faibles que pour les scores moyens. Tandis que le deltoïde médial du côté du bras d'arc a montré plus d'activation lors des scores faibles que lors des scores moyens et élevés. Pour A6, le trapèze médian était moins activé lors des scores faibles par rapport aux scores élevés. Aucune autre différence dans l'activité musculaire n'a été observée parmi les muscles restants et pour les autres participants durant la phase de suivi. Les valeurs d'activité musculaire pour les muscles présentant des différences significatives par archer durant la phase de suivi sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Valeurs d'activité neuromusculaire [Médiane (IQR)], en fonction du niveau de score pour chaque archer (FDS : fléchisseur superficiel des doigts, MD : deltoïde moyen, PD : deltoïde postérieur, UT : trapèze supérieur, MT : trapèze moyen, MF : multifide, EO : oblique externe, -c : côté corde, -a : côté arc). § : Différence significative par rapport aux scores faibles, † : Différence significative par rapport aux scores moyens, * : Différence significative par rapport aux scores élevés, ε^2 : taille d'effet.

Phase	Variable	Archer	Low	Mid	High	p-value	ε^2
Aiming	MD-c (%)	3	33.9 (2.7)	35.1 (4.1)*	31.8 (4.9)†	0.005	0.12
	MD-a (%)	1	59.9 (4.0)*	58.5 (4.5)	58.0 (3.4)§	0.031	0.08
	MD-a (%)	3	48.4 (6.0)	50.3 (6.3)*	46.5 (7.1)†	0.004	0.13
	MD-a (%)	8	65.5 (3.4)*	63.9 (3.2)	58.8 (6.7)§	0.008	0.15
	EO-c (%)	1	6.1 (1.0)*	5.5 (1.4)	5.1 (0.7)§	0.031	0.08
Follow-through	FDS-c (%)	6	6.3 (2.3) *†	4.6 (2.0) §	3.9 (2.4) §	0.020	0.08
	MD-c (%)	7	7.4 (1.5)*	7.1 (1.4)	6.0 (0.9) §	0.027	0.07
	PD-c (%)	1	26.7 (6.7)†	20.7 (4.6) §	22.5 (7.1)	0.010	0.12
	UT-c (%)	1	35.4 (4.3) †	32.7 (5.3) §	32.0 (7.1)	0.016	0.10
	UT-c (%)	3	20.3 (2.2)*	22.4 (2.7)	22.4 (2.3) §	0.029	0.07
	UT-c (%)	5	24.7 (3.3)†	23.0 (2.6) §	24.1 (3.2)	0.045	0.06
	MT-c (%)	6	41.4 (6.0)*	42.8 (6.5)	44.7 (4.4) §	0.015	0.09
	MD-a (%)	1	52.5 (6.5)*†	48.8 (6.4)§	48.9 (4.9)§	0.004	0.15
	MF-a (%)	6	2.9 (0.5)*	2.54 (0.7)	2.52 (0.3) §	0.011	0.10

6.3.3.2. Contrôle postural

Durant la phase de visée, la vitesse moyenne de déplacement du CdP était significativement plus élevée lors des scores faibles par rapport aux scores moyens pour l'archer A1 (Tableau 4). Inversement, pour l'archer A7, la vitesse du CdP était significativement plus faible lors des scores moyens par rapport aux scores élevés (p=0.068). De plus, la surface du CdP était plus petite uniquement lors des scores faibles par rapport aux scores élevés. Aucune autre différence dans les variables de contrôle postural n'a été observée parmi les participants durant la phase de visée. Les valeurs de contrôle postural présentant des différences significatives pour les archers individuels durant la phase de visée sont présentées dans le Tableau 4.

Durant la phase de suivi, la surface totale du déplacement du CdP était plus élevée pour les scores faibles par rapport aux scores moyens pour l'archer A4 et par rapport aux scores élevés pour l'archer A1. L'amplitude du déplacement du CdP le long de l'axe médiolatéral était plus grande pour les scores faibles et moyens par rapport aux scores élevés pour l'archer A1. Le long de l'axe antéropostérieur, une tendance à une plus grande amplitude de déplacement a été

observée pour les scores faibles par rapport aux scores élevés pour l'archer A4 (p=0.058). La vitesse moyenne de déplacement du CdP était significativement plus élevée pour les scores faibles par rapport aux scores moyens pour l'archer A8, et le long de l'axe antéropostérieur, elle était plus élevée pour les scores faibles par rapport aux scores moyens et élevés pour l'archer A1. La vitesse maximale de déplacement du CdP était plus élevée pour les scores faibles par rapport aux scores moyens pour l'archer A1 et par rapport aux scores élevés pour l'archer A4. Aucune autre différence n'a été observée parmi les archers durant la phase de suivi. Les valeurs de contrôle postural présentant des différences significatives pour un archer durant la phase de suivi sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Valeurs des paramètres de contrôle postural [Médiane (IQR)], en fonction du niveau de score pour chaque archer (S : surface, Rx et Ry : amplitude de déplacement du CdP sur l'axe X et l'axe Y, V, Vx, Vy et Vmax : vitesse moyenne de déplacement du CdP globale, sur l'axe X, et sur l'axe Y, et vitesse maximale de déplacement du CdP). § : Différence significative par rapport aux scores faibles, † : Différence significative par rapport aux scores moyens, * : Différence significative par rapport aux scores élevés, ε^2 : taille d'effet.

Phase	Variable	Archer	Low	Mid	High	p-value	ε^2
Aiming	S (mm²)	7	56.4 (42.4)*	63.9 (25.1)	75.1 (38.0) §	0.036	0.07
	V (mm/s)	1	20.9 (2.2) †	19.4 (2.2) §	20.0 (2.4)	0.048	0.07
	V (mm/s)	7	19.6 (1.4)	18.8 (1.7)*	20.1 (0.4) †	0.033	0.07
Follow-through	S (mm²)	1	333.0 (4.7) *†	214.6 (151.9) §	155.2 (63.1) §	0.003	0.22
	S (mm²)	4	152.6 (43.9) †	122.6 (68.7) §	154.3 (60.9)	0.037	0.07
	Rx (mm)	1	8.5 (2.6)*	7.2 (4.7)*	5.0 (2.2) †§	0.007	0.13
	Ry (mm)	4	24.2 (4.3)*	19.7 (6.7)	19.7 (5.8) §	0.046	0.06
	V (mm/s)	8	67.6 (11.7)*	63.2 (7.5) §	65.6 (8.2	0.041	0.08
	Vx (mm/s)	1	16.4 (2.3) *†	14.6 (1.5) §	13.1 (2.1) §	0.001	0.22
	Vmax (mm/s)	1	279.8 (40.9) †	251.2 (29.7) §	243.9 (44.4)	0.224	0.09
	Vmax (mm/s)	4	293.7 (49.0)*	275.9 (72.6)	250.4 (58.3) §	0.007	0.11

6.3.3.3. Configuration corporelle

Aucune différence significative n'a été observée dans les variables cinématiques parmi les participants durant les phases de visée et de suivi.

6.3.3.4. Stratégies temporelles

Comme le montre le Tableau 5, la durée de la visée était significativement plus courte lors des scores faibles par rapport aux scores élevés pour l'archer A8, et significativement plus longue lors des scores faibles par rapport aux scores moyens pour l'archer A1. Aucune différence significative dans la durée de la visée n'a été observée parmi les autres archers, ni dans le TRC pour les autres archers.

Tableau 5 : Durée de la visée [Médiane (IQR)], en fonction du niveau de score pour chaque archer (temps de visée : durée de la phase de visée). § : Différence significative par rapport aux scores faibles, † : Différence significative par rapport aux scores moyens, * : Différence significative par rapport aux scores élevés, ε^2 : taille d'effet.

Phase	Variable	Archer	Low	Mid	High	p-value	ε^2
Aiming	Aiming duration	1	2.2 (0.7) †	1.6 (0.71) §	2.1 (0.7)	0.023	0.09
	Aiming duration	8	2.0 (0.8)*	2.5 (0.8)	3.7 (1.2) §	0.007	0.15

6.4. Discussion

Cette étude visait à investiguer les principaux déterminants de la performance en tir à l'arc de haut niveau en examinant le contrôle postural, l'activation neuromusculaire, la configuration corporelle et les stratégies temporelles. L'objectif était de différencier les facteurs qui sont liés à l'amélioration de la performance au sein d'un groupe de huit archers expérimentés de ceux qui reflètent des adaptations individuelles spécifiques, durant les phases de visée et de suivi.

Au niveau du groupe, plusieurs paramètres ont montré une association significative avec la performance. Durant la phase de visée, cela incluait l'activité de sept muscles, trois paramètres de contrôle postural et le TRC. Dans la phase de suivi, quatre muscles et trois paramètres de contrôle postural ont également été identifiés comme des déterminants significatifs.

Au niveau individuel, une analyse de la phase de visée a mis en lumière des prédicteurs de performance distincts et spécifiques à chaque athlète. Concernant l'activation neuromusculaire, le deltoïde moyen du bras d'arc était un facteur significatif pour trois athlètes. En revanche, trois muscles distincts du côté du bras de corde n'étaient significatifs chacun que pour un seul archer. La surface du CdP était associée à la performance pour un archer, et la vitesse globale du CdP était significative pour deux archers. La durée de la visée différait entre deux archers, mais avec des tendances opposées. Cette variabilité inter-individuelle a persisté durant la phase de suivi. Dans le domaine neuromusculaire, alors que le trapèze supérieur et l'oblique externe du côté du bras de corde étaient des déterminants significatifs pour trois et deux archers respectivement,

six autres muscles n'étaient significatifs chacun que pour un seul athlète. Quatre paramètres de contrôle postural étaient significatifs pour un archer chacun, tandis que la vitesse maximale et la surface de déplacement du CdP étaient associées à la performance pour deux archers.

6.4.1. Déterminants collectifs de la performance

6.4.1.1. Activité neuromusculaire

Durant la phase de visée, des études antérieures ont rapporté qu'une activation plus élevée du deltoïde postérieur et du trapèze moyen du côté du bras de corde est liée à une meilleure performance lors de la comparaison d'archers novices et élites (Simsek et al., 2014, 2018). Inversement, la présente étude, menée auprès d'archers de niveau élite, a identifié une tendance opposée : une activation plus faible de ces muscles était associée à de meilleurs scores. La divergence observée peut être due au niveau de performance supérieur de la population mesurée. Alors que les participants de l'étude de Simsek et al. (2018) obtenaient un score d'environ 575 points sur 720 possibles, les archers de cette étude ont eu un score moyen de 655/720, ce qui permet d'affirmer qu'ils représentent un niveau de performance élite plus élevé.

Cela suggère que les meilleurs archers utilisent leurs muscles plus efficacement. Spécifiquement, ils pourraient davantage compter sur les petits muscles profonds de l'épaule pour la stabilité plutôt que sur des muscles plus grands et énergivores. Cette efficacité réduit les contractions musculaires inutiles. Cela leur permet de diminuer les tremblements qui peuvent rendre leur visée moins stable. En fin de compte, ce meilleur contrôle leur confère une posture plus stable et moins fatigante, contribuant à de meilleurs scores.

Contrairement aux études antérieures qui liaient une activation plus importante de l'extenseur des doigts et du fléchisseur des doigts superficiel du côté du bras de corde à une performance inférieure (Simsek et al., 2014, 2018; Taha, Haque, et al., 2017; Tinazci, 2011), cette étude a trouvé une association positive entre l'activation de ces muscles et la performance de tir. Le niveau de compétence supérieur des participants de la présente étude, comparé à ceux de l'investigation de Simsek et al. (2018), suggère que les archers très expérimentés pourraient adopter des stratégies de recrutement musculaire différentes, avec un contrôle neuromusculaire plus raffiné et plus constant (Abernethy et al., 2003). Ces différences peuvent également être attribuables à des variations méthodologiques entre les études, notamment des différences d'instrumentation et de protocoles expérimentaux.

Durant les phases de visée et de suivi, la littérature antérieure a indiqué que, du côté du bras d'arc, une plus grande activation du fléchisseur des doigts superficiel et une activation diminuée de l'extenseur des doigts sont associées à des résultats de performance inférieurs (Ertan, 2009).

En revanche, la présente étude a identifié une tendance divergente : l'activation du fléchisseur des doigts superficiel était positivement associée à la performance, tandis que l'activation de l'extenseur des doigts superficiel l'était négativement.

Les Figures 25b et 26a révèlent que les tirs à faibles scores se caractérisent par des pics d'activité neuromusculaire très élevés, ce qu'on ne retrouve pas dans les bons tirs. Cela suggère qu'une activation modérée de l'extenseur des doigts soutient une haute performance, tandis qu'une activation excessive pourrait nuire à la précision. De même, un niveau optimal d'activation du fléchisseur des doigts superficiel pourrait être crucial pour maintenir la stabilité et le contrôle, tandis qu'une activation insuffisante pourrait altérer la performance. Ces interprétations doivent être considérées avec prudence. L'analyse comparative repose en effet sur une seule étude de la littérature, et nos résultats ne correspondent pas entièrement aux schémas qu'elle décrit. Le rôle exact de ces muscles dans la performance de tir à l'arc de haut niveau demeure donc incertain, ce qui ouvre une perspective pour de futures recherches.

Parmi les muscles profonds évalués durant la phase de visée, une activation plus élevée du multifide du côté du bras de corde était associée à une meilleure performance. Cela concorde avec Azhar et al. (2021). Cependant, notre étude approfondit leurs travaux en fournissant une évaluation bilatérale de l'activation du multifide, un aspect méthodologique non inclus dans leur investigation originale. Le multifide joue un rôle clé dans le maintien de la stabilité lombaire et la facilitation du transfert de force entre le tronc et les membres supérieurs (K. Wang et al., 2023). Le fait que seul le multifide du côté du bras de corde ait montré une plus grande activation lors des tirs à scores élevés suggère qu'une stabilité asymétrique du tronc est un déterminant clé de la performance en tir à l'arc. Cette augmentation pourrait améliorer le contrôle de la rotation du tronc, renforcer la stabilité posturale et augmenter la précision de tir.

Durant la phase de suivi, l'activation de l'oblique externe du côté du bras de corde était plus élevée pour les tirs à scores élevés par rapport aux tirs à scores faibles. Ce résultat semble nouveau. À notre connaissance, aucune étude antérieure n'a spécifiquement examiné le rôle de l'oblique externe durant la phase de suivi en tir à l'arc. Une activation plus grande de l'oblique externe du côté du bras de corde pourrait être fonctionnellement importante pour contrôler les couples de rotation des membres supérieurs asymétriques tout en maintenant simultanément l'alignement axial du tronc. Un contrôle amélioré des muscles profonds pourrait atténuer les perturbations posturales (Kahle & Gribble, 2009; Sandrey & Mitzel, 2013), améliorer la régularité des tirs et contribuer à un lâcher plus net et plus stable.

Une caractéristique notable des tirs à scores élevés chez les archers élites examinés était une activation réduite du transverse de l'abdomen durant la phase de suivi. Ceci diverge d'Azhar et

al. (2021), qui ont rapporté une activation plus élevée chez les archers élites par rapport aux novices. Cependant, cette étude a analysé l'intégralité de la phase de suivi (Azhar et al., 2021), tandis que la présente analyse s'est concentrée sur les 500 ms immédiatement après le lâcher de la flèche. De plus, Azhar et al. (2021) ont comparé différents groupes de niveaux de compétence (élite vs. novices), alors que notre étude a examiné les différences de performance intra-groupe parmi les archers élites. Ces différences méthodologiques peuvent expliquer les divergences. L'activation plus faible du transverse de l'abdomen observée dans cette étude pourrait refléter une stratégie motrice plus efficace chez les archers élites, nécessitant moins d'engagement du tronc immédiatement après le lâcher.

6.4.1.2. Contrôle postural

Durant la phase de visée, plusieurs variables de vitesse du CdP étaient élevées lors des tirs de faible performance. Spécifiquement, cela s'appliquait à la vitesse globale du CdP, ainsi qu'à ses composantes le long des axes antéropostérieur et médiolatéral. Ces résultats indiquent qu'une stabilité améliorée du CdP durant la phase de visée est un déterminant clé de la performance de haut niveau. De telles conclusions ne sont pas uniques au tir à l'arc et ont été rapportées dans d'autres sports de précision. Par exemple, une performance supérieure au tir à la carabine est associée à une vitesse du CdP plus faible (Aalto et al., 1990; Era et al., 1996), et une plus grande précision de tir en biathlon est liée à un balancement corporel minimal (Sadowska et al., 2019; Sattlecker et al., 2014a).

Dans le contexte du tir à l'arc, une vitesse diminuée de déplacement du CdP durant la visée est un déterminant clé des tirs à scores élevés (K. Kim et al., 2025; Sarro et al., 2021; Tinazci, 2011). De plus, le déplacement médiolatéral du CdP était corrélé au mouvement de l'arc dans les directions verticale et horizontale (Sarro et al., 2021), suggérant que le contrôle du déplacement du CdP peut améliorer la stabilité de l'arc durant la visée. Globalement, ces résultats suggèrent que la vitesse du CdP n'est pas seulement un facteur discriminant entre archers élites et novices, mais aussi un déterminant clé de la performance au sein du tir à l'arc d'élite, dans toutes les directions de mouvement.

Durant la phase de suivi, une plus grande amplitude du CdP sur l'axe antéropostérieur et une vitesse maximale plus élevée ont été observées lors des tirs à faibles scores. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions d'une étude précédente menée sur 31 archers élites (Spratford & Campbell, 2017) Cependant, un résultat au niveau du groupe différait : l'amplitude médiolatérale du CdP était plus élevée lors des tirs à scores élevés. Cette découverte inattendue pourrait suggérer qu'un mouvement contrôlé dans la direction médiolatérale contribue positivement à des mécanismes de lâcher optimisés. Plutôt que d'indiquer une instabilité, ce

schéma pourrait représenter un ajustement stratégique et fonctionnel. Celui-ci viserait à faciliter un lâcher plus efficace sur le plan biomécanique et plus précis, une caractéristique moins évidente dans les tirs à faibles scores.

6.4.1.3. Paramètres temporels

Des TRC plus courts étaient associés à des scores plus élevés, confirmant les résultats antérieurs de Ertan et al. (2003) et de Spratford & Campbell. (2017). Ces résultats suggèrent que les archers élites améliorent leur performance en réduisant le TRC.

En résumé, ces résultats indiquent que les archers élites présentaient souvent des schémas d'activation musculaire opposés à la littérature. Une activation plus faible dans certains muscles du bras pourrait signifier des stratégies d'armement et de tenue plus efficaces. En revanche, une activation augmentée des muscles profonds tels que le multifide et l'oblique externe était essentielle pour la stabilité et le contrôle du tronc. Une meilleure stabilité posturale, indiquée par des mouvements plus lents du CdP, et des TRC plus courts, étaient également associés à des scores plus élevés.

Les paramètres identifiés comme stratégies au niveau du groupe ont été considérés comme représentatifs de l'ensemble du groupe et ont donc été exclus de l'analyse au niveau individuel. Lorsqu'un paramètre était significatif aux deux niveaux, la conclusion au niveau du groupe a été priorisée dans l'interprétation. Cette approche suppose que les stratégies individuelles font partie du comportement stratégique global du groupe. Inclure les deux niveaux dans l'analyse pourrait créer de la redondance, puisque la stratégie au niveau du groupe reflète déjà les principales tendances partagées par les individus au sein du groupe.

6.4.2. Déterminants individuels de la performance

6.4.2.1. Activité neuromusculaire

Durant la phase de visée, des différences interindividuelles distinctes sont apparues dans les schémas d'activation musculaire. Du côté du bras de corde, un archer a montré une activation plus élevée du deltoïde moyen lors des tirs de performance inférieure, bien que des recherches antérieures (Simsek et al., 2014, 2018) associent généralement une activation plus grande de ce muscle à une meilleure performance, suggérant que cet archer pourrait employer une stratégie unique.

Pour trois archers, une activation plus faible du deltoïde moyen du côté du bras d'arc était liée à une meilleure performance. Cela suggère que la réduction de l'activité de ce muscle clé de l'épaule, qui fournit un soutien crucial au bras d'arc (Kolayiş & Ertan, 2016), peut-être une

stratégie individualisée pour améliorer la stabilité et la précision. Avant le lâcher, un archer a montré une activation plus élevée de l'oblique externe du côté du bras de corde lors des essais de performance inférieure. Bien que cette observation s'aligne avec Matsunaga et al. (2017), elle reflète probablement un mécanisme compensatoire plutôt qu'un schéma moteur commun parmi les archers élites.

Durant la phase de suivi, les tirs à scores élevés étaient caractérisés par une activation réduite des muscles du bras de corde (Fléchisseur des Doigts Superficiel - FDS, Deltoïde Moyen - MD, Deltoïde Postérieur - PD). Ces résultats contrastent avec des études précédentes (Baifa et al., 2023; Ertan et al., 2003; Tinazci, 2011) et suggèrent que la minimisation de l'activité musculaire post-lâcher peut bénéficier à certains archers en fonction de leur technique. Ces découvertes mettent également en lumière des rôles jusqu'alors peu explorés du trapèze supérieur et moyen du côté du bras de corde, et du deltoïde moyen du côté du bras d'arc, durant la phase de suivi. En revanche, un archer a montré une activation plus faible du multifide du côté du bras d'arc lors des tirs à scores inférieurs. Ce résultat diverge d'Azhar et al. (2021) et pourrait indiquer un déficit de contrôle postural ou de stabilité du tronc lors des tentatives moins réussies.

6.4.2.2. Contrôle postural

Durant la phase de visée, un archer a présenté une surface du CdP plus grande lors des tirs à scores plus élevés, ce qui est contraire aux tendances observées dans d'autres sports de précision, où une oscillation réduite améliore généralement la stabilité et la précision (Aalto et al., 1990; Mononen et al., 2007; Zatsiorsky & Aktov, 1990; Zawi & Mohamed, 2013). Cela pourrait indiquer une stratégie individualisée dans laquelle des ajustements posturaux subtils optimisent l'alignement visuel.

Durant la phase de suivi, malgré des différences individuelles dans les paramètres, une oscillation posturale plus grande était associée à des scores plus faibles. Spécifiquement, les scores plus faibles étaient liés à une vitesse globale plus élevée pour un archer, à une vitesse antéropostérieure pour un autre, et à la surface du CdP pour deux autres. Ces résultats, qui s'alignent sur des recherches antérieures montrant qu'une oscillation posturale minimisée bénéficie à la performance, suggèrent que des stratégies posturales raffinées et individualisées pour limiter les mouvements inutiles après le lâcher peuvent refléter un contrôle moteur avancé et une plus grande expérience.

6.4.2.3. Paramètres temporels

La littérature antérieure a montré que des durées de visée plus courtes sont associées à une performance supérieure (Sarro et al., 2021; Taha, Haque, et al., 2017; Tinazci, 2011). Bien que

la présente étude ait identifié la durée de la visée comme un facteur significatif pour deux archers, l'effet était incohérent. La performance d'un archer s'est améliorée avec une durée plus courte, tandis que celle de l'autre s'est améliorée avec une durée plus longue. Cette variabilité reflète des techniques ou des habitudes personnelles et souligne l'importance d'intégrer une analyse au niveau individuel lors de l'évaluation des résultats de performance. En fait, certains archers peuvent bénéficier d'une visée plus rapide pour atténuer la fatigue physique et minimiser le traitement cognitif excessif (Clarke, 1978), tandis que d'autres ont besoin de plus de temps pour atteindre une concentration optimale. Ces résultats soulignent la nécessité d'adapter les stratégies de visée aux besoins individuels, surtout au niveau élite.

Ces résultats suggèrent que les archers élites développent des stratégies très individualisées pour améliorer leur performance. Celles-ci incluent une activation musculaire sélective (par exemple, le deltoïde moyen pendant la visée, le trapèze supérieur pendant la phase de suivi), des ajustements posturaux individualisés pour réduire le mouvement après le lâcher, et des durées de visée personnalisées. La reconnaissance de ces différences individuelles renforce l'importance des approches d'entraînement personnalisées basées sur le profil biomécanique et neuromusculaire unique de chaque archer.

6.4.3. Applications pratiques

Au niveau du groupe, les schémas d'activation de quatre muscles du bras de corde durant la phase de visée ont montré une association significative avec la performance. Cependant, ces résultats contrastent avec des études antérieures comparant des archers élites et novices. Cette divergence suggère que si certains schémas d'activation peuvent faciliter la progression vers le niveau élite, des ajustements supplémentaires dans la stratégie d'activation musculaire pourraient distinguer les meilleurs performeurs. Le contrôle optimal du bras d'arc semble impliquer une double exigence neuromusculaire : maintenir un niveau bien régulé d'activité de l'extenseur des doigts pour prévenir une tension excessive, tout en assurant simultanément une activation suffisante du fléchisseur des doigts superficiel pour préserver la stabilité de la prise. Pour les entraîneurs, cela souligne la nécessité d'aider les athlètes à atteindre une activation musculaire optimale du bras d'arc afin d'améliorer la performance.

Une vitesse réduite du CdP durant la phase de visée est un déterminant clé des tirs de haute précision. Les entraîneurs pourraient intégrer des entraînements d'équilibre, des exercices de renforcement du tronc et des exercices proprioceptifs dans les programmes d'entraînement pour améliorer spécifiquement la stabilité posturale. Inversement, un déplacement antéropostérieur du CdP et une vitesse maximale plus importants durant la phase de suivi étaient associés à des scores diminués, indiquant qu'une instabilité post-tir peut impacter négativement la

performance. Il est intéressant de noter qu'une plus grande amplitude médiolatérale du CdP était associée à des scores plus élevés, indiquant qu'un mouvement contrôlé peut aider à absorber les forces de lâcher et à maintenir l'alignement postural. Sur la base de ces résultats, des programmes d'entraînement pourraient être conçus pour minimiser le déplacement et la vitesse du CdP antéropostérieur durant le suivi, tout en préservant un certain degré de balancement médiolatéral fonctionnel.

Le TRC est également apparu comme un déterminant clé de la performance, conformément aux recherches antérieures (Spratford & Campbell, 2017). Un temps de réaction plus court après le clicker était lié à de meilleurs scores. Pour améliorer cela, des interventions d'entraînement pourraient être conçues pour augmenter la vitesse et la précision de la réponse motrice suite au signal auditif du clicker. Des exercices ciblés, axés sur l'amélioration de la cohérence temporelle, le contrôle attentionnel et la fluidité de la phase de suivi, pourraient contribuer à une réduction du temps de réaction et à une augmentation de l'efficacité globale du tir.

Au niveau individuel, certains archers ont démontré des schémas d'activation musculaire réduite, comme une activité plus faible du deltoïde moyen du côté de l'arc pendant la visée et une activité diminuée du trapèze supérieur du côté de la corde pendant le suivi. Le caractère individuel des ces paramètres entre tous les archers suggère que le développement de stratégies motrices individualisées est un déterminant caractéristique, même au niveau élite. Par conséquent, les entraîneurs devraient évaluer et prendre en compte les schémas d'activation musculaire spécifiques à chaque archer, plutôt que d'appliquer un modèle d'entraînement uniforme.

Dans la phase de suivi, certains archers peuvent avoir adopté des stratégies uniques pour améliorer le contrôle postural. L'évaluation de l'impact de l'équilibre post-tir sur la performance devrait être individualisée, car tous les archers ne semblaient pas en bénéficier de manière égale. De même, la relation entre la durée de la visée et la performance a varié selon les archers, soutenant davantage la nécessité d'approches d'entraînement personnalisées. Par conséquent, l'adaptation de la durée de la visée aux caractéristiques individuelles d'un athlète peut être une stratégie viable pour améliorer la cohérence et la précision du tir.

6.4.4. Limitations

Cette étude fournit des informations précieuses sur la biomécanique du tir à l'arc d'élite. Cependant, une limitation doit être reconnue. Tous les archers participants ont été entraînés par le même entraîneur, ce qui a pu conduire à des habitudes techniques partagées. Ces techniques pourraient différer de celles utilisées par d'autres archers élites entraînés selon d'autres stratégies

d'entraînement, limitant ainsi la généralisation des résultats. En effet, le cadre technique fourni par cet entraîneur (par exemple, l'imposition d'une technique particulière à l'ensemble du groupe) pourrait également nous empêcher d'identifier des stratégies individuelles qui seraient présentes dans un groupe d'archers plus diversifié.

Cependant, cette limitation doit être contextualisée. Avant de rejoindre leur entraîneur actuel, les athlètes avaient de vastes historiques d'entraînement sous diverses philosophies d'entraînement. Par conséquent, leurs techniques de tir fondamentales doivent être déjà établies.

De plus, nous reconnaissons une limitation mineure concernant l'instrumentation. Spécifiquement, bien que le système IMU ait été précédemment validé, cette étude n'a pas inclus de validation directe pour les systèmes EMG et de plateforme de force, bien que des références soutenant leur utilisation dans des conditions similaires aient été fournies. Étant donné l'importance de cette étude sur les mesures de haute précision, nous recommandons que les futures recherches en biomécanique des sports d'élite privilégient la validation spécifique des dispositifs pour garantir le plus haut niveau de précision des données.

Une autre limitation est l'absence d'évaluation de la fatigue pendant la session de tir de 72 flèches. Étant donné que la fatigue musculaire affecte à la fois l'EMG (De Luca, 1997) et le contrôle postural (Vuillerme, Forestier, et al., 2002), son influence sur la performance ne peut être négligée.

Enfin, basés sur un groupe restreint de 8 archers, les résultats doivent donc être interprétés avec prudence. En résumé, cette étude offre des pistes intéressantes, mais davantage de recherches sont nécessaires avec beaucoup plus d'archers d'horizons différents pour confirmer que ses conclusions s'appliquent à tous les athlètes de niveau élite.

6.4.5. Perspectives

Durant la phase de suivi, une performance supérieure était associée à un schéma neuromusculaire distinct : une activation plus élevée du fléchisseur des doigts superficiel et une activation plus faible de l'extenseur des doigts. Ces résultats contrastent avec des recherches antérieures. Ces divergences soulignent la nécessité d'approfondir l'investigation des mécanismes neuromusculaires sous-jacents à la performance.

De plus, cette étude a également identifié des relations potentielles entre la performance de tir et deux autres variables : le comportement des muscles du bras d'arc pendant la phase de suivi et les schémas d'activation des muscles du tronc. Ces domaines restent largement inexplorés dans la recherche sur le tir à l'arc. La relation entre les muscles du tronc et le contrôle postural semble être significative pour la performance. Cela suggère qu'une investigation plus poussée

dans ce domaine pourrait offrir des aperçus plus profonds sur la manière dont les archers gèrent leur posture et leur stabilité. L'exploration de ces aspects pourrait aboutir à une compréhension plus complète des stratégies biomécaniques qui contribuent à la performance d'élite en tir à l'arc.

En outre, la quantification de la fatigue permettrait d'étudier son influence potentielle sur les paramètres de performance observés, établissant ainsi un lien plus clair entre l'état physiologique de l'athlète et les données mesurées.

Enfin, une approche statistique qui définit le poids de chaque facteur pourrait faire progresser de manière significative la recherche sur le tir à l'arc et fournir des informations supplémentaires aux entraîneurs, les aidant à mieux comprendre comment optimiser la performance.

6.5. Conclusion

Cette seconde étude identifie des stratégies individuelles clés dans plusieurs domaines de la performance au niveau élite : neuromusculaire (par exemple, la réduction de l'activité du deltoïde moyen du côté de l'arc et du trapèze supérieur du côté de la corde), postural (par exemple, le contrôle de la surface du CdP pendant le suivi) et temporel (par exemple, l'adaptation de la durée de visée). Au niveau du groupe, les résultats sur l'activation musculaire dans la phase de visée semblent incohérents avec les recherches précédentes dans la littérature, suggérant un besoin d'investigation supplémentaire. De plus, les rôles fonctionnels spécifiques de l'avant-bras pendant le suivi et des muscles du tronc méritent une investigation plus détaillée. Une vitesse réduite du centre de pression pendant la visée, ainsi qu'une amplitude antéropostérieure et une vitesse de pointe diminuées pendant la phase de suivi, ont été associées à une performance améliorée. Enfin, le temps de réaction au clicker a été confirmé comme un facteur clé pour des scores plus élevés.

En résumé, les programmes d'entraînement devraient d'abord se concentrer sur l'établissement d'une base technique solide (stabilité, équilibre musculaire lors de la tenue de l'arc, réaction au clicker), suivie d'une phase de personnalisation où ces compétences sont adaptées en fonction d'une observation attentive de la stratégie motrice individuelle de l'archer. Enfin, les recherches futures devraient viser à quantifier la contribution relative de ces variables afin d'affiner les protocoles d'entraînement d'élite et d'améliorer l'évaluation de la performance en tir à l'arc.

CHAPITRE 3 : DISCUSSION GENERALE, PERSPECTIVES ET CONCLUSION

7. Discussion générale

7.1. Rappel des objectifs et des résultats

Cette thèse dépasse les analyses traditionnelles unidimensionnelles pour offrir une compréhension nuancée de la performance. Elle s'articule autour de deux axes :

- Premièrement, une comparaison multidimensionnelle entre archers de niveau élite et de niveau intermédiaire, visant à identifier les paramètres discriminants entre ces deux niveaux de performance en tir à l'arc, ainsi qu'à quantifier et confirmer l'importance de la variabilité inter-tirs des paramètres de performance comme marqueur principal de l'expertise.
- Deuxièmement, une analyse intra-élite pour identifier les stratégies communes et individuelles expliquant les variations de performance.

Nos résultats confirment l'efficience neuromusculaire supérieure des archers élites : une économie d'effort globale associée à l'activation intense du trapèze médian et du deltoïde médian. Sur le plan postural, ils privilégient une stabilité dynamique (micro-ajustements) et une gestion efficace des perturbations post-décoche. Enfin, conformément à notre hypothèse, la faible variabilité des paramètres (posturaux et cinématiques) s'avère être un marqueur discriminant de l'expertise, soulignant la capacité supérieure de l'élite à reproduire le geste avec constance.

L'analyse intra-élite nuance ces résultats. Si des déterminants collectifs subsistent (vitesse réduite du CdP, TRC court), l'étude révèle surtout des stratégies hautement individualisées. L'existence de tendances spécifiques, parfois opposées selon les archers, confirme que l'expertise ne relève pas d'un modèle unique mais d'une individualisation. Cette discussion détaillera ces différentes modalités de performance pour chaque dimension.

7.2. Muscles des membres supérieurs

Dans cette partie, nous analyserons en détail l'activité neuromusculaire des muscles des membres supérieurs, en décomposant les résultats selon leur rôle et leur contribution à la performance. Notre première étude nous a renseignés sur les paramètres qui distinguent les archers de niveau intermédiaire de ceux de niveau élite, ainsi que sur les paramètres dont la variabilité entre les essais diffère selon le niveau des archers. Notre deuxième étude nous a renseignés sur les paramètres qui permettent à un groupe d'archers de niveau élite d'améliorer

leurs performances, en distinguant ceux qui sont communs à l'ensemble du groupe de ceux qui relèvent de caractéristiques individuelles.

Nous examinerons en premier lieu les muscles dont l'activation différencie les élites des intermédiaires, et dont la gestion individuelle confirme cette logique (7.2.1). Puis nous discuterons ensuite des paramètres dont l'activation distingue à la fois les archers élites des intermédiaires, ainsi que les variations de performance au sein même du niveau élite (7.2.2). La section suivante abordera les muscles qui influencent la performance exclusivement au niveau élite (7.2.3). Enfin, nous discuterons des paramètres musculaires qui, bien qu'explicatifs du niveau de performance, requièrent une individualisation des stratégies techniques chez les archers élite (7.2.4), et des muscles pour lesquels une individualisation est le seul facteur pertinent (7.2.5), afin de fournir une compréhension nuancée de leur contribution à l'expertise.

7.2.1. Effet du niveau de performance

La première partie de notre analyse porte sur les muscles dont l'activité est significativement différente uniquement entre les deux niveaux. Certains archers ont montré des stratégies individuelles cohérentes, confirmant que ces paramètres sont reliés a l'expertise.

Nos résultats montrent que les élites se distinguent des niveaux intermédiaires par un relâchement actif et une activation globalement plus faible de plusieurs muscles : deltoïde médian côté corde pendant les deux phases, fléchisseur des doigts côté corde après le lâcher, deltoïde médian côté arc après le lâcher. Ces paramètres, étant uniquement discriminants entre les niveaux intermédiaire et élite, suggèrent qu'une fois acquis, leur optimisation n'a qu'un impact très réduit sur la variation de performance au sein du groupe élite.

En contradiction avec Simsek et al. (2018), les archers élites activent moins le deltoïde médian que les intermédiaires durant les phases de visée et de suivi, limitant ainsi la fatigue musculaire et les tremblements associés (Gottlieb & Lippold, 1983). Cette économie, corroborée par l'analyse individuelle chez un archer, suggère que les archers intermédiaires doivent privilégier l'engagement des stabilisateurs profonds plutôt que la sur-sollicitation de ce muscle superficiel.

L'activation du fléchisseur superficiel des doigts côté corde lors de la phase de suivi est également plus faible chez les archers élites, en accord avec Baifa et al. (2023) et Ertan et al. (2003). Cela traduit une capacité supérieure à inhiber rapidement ce muscle après la décoche. Individuellement, un archer associait cette activation réduite avec ses meilleurs scores. Le processus de lâcher et de suivi devrait donc inclure un relâchement rapide des fléchisseurs, évitant toute sur-contraction perturbant la sortie de la flèche.

Lors de la phase de suivi, le deltoïde médian du bras d'arc est moins sollicité chez les archers élites, soulignant une utilisation musculaire plus efficiente. L'analyse individuelle a révélé une stratégie spécifique chez un archer élite qui va dans le même sens. Une activation excessive du deltoïde médian pourrait nuire à la précision. Ces résultats rejoignent et nuancent la littérature (Kolayiş & Ertan, 2016), qui décrit une diminution rapide de l'activation du deltoïde médian après la décoche. La capacité à relâcher activement ce muscle semble donc un marqueur de performance optimale. Juste après la décoche, l'archer devrait relâcher le deltoïde médian du bras d'arc pour éviter de « pousser » l'arc et permettre un mouvement naturel vers la cible.

Parallèlement, nos résultats soulignent l'importance d'une activation supérieure de certains muscles clés du côté corde : trapèze supérieur durant la phase de visée, trapèze médian et extenseur des doigts durant la phase de suivi. En effet, l'activation plus élevée du trapèze supérieur du bras de corde observée chez les archers élites apporte une perspective nouvelle par rapport aux travaux de Shinohara & Urabe (2018) qui n'avaient pas rapporté de résultats significatifs pour ce muscle. Cette activation semble favoriser le positionnement optimal de l'humérus, faciliter l'engagement des rétracteurs scapulaires et améliorer la stabilisation de la scapula, contribuant ainsi à une ligne de traction plus efficace.

Durant la phase de suivi, les archers élites présentent une activité supérieure du trapèze médian côté corde comparativement aux intermédiaires, confirmée par une stratégie individuelle identique pour un archer élite, ce qui constitue une nouvelle contribution à la littérature. L'archer devrait donc s'entraîner à une activation forte du trapèze médian pour stabiliser la scapula.

En parallèle, lors de la phase de suivi, l'extenseur des doigts du bras de corde présentait une activité moyenne significativement supérieure chez les archers élites par rapport aux intermédiaires. Cependant, l'analyse des quartiles supérieurs révèle une disparité notable (12,4% chez les élites contre 16,9% chez les intermédiaires), qui témoigne d'une activation maximale plus faible chez l'élite, suggèrant une meilleure maîtrise du relâchement musculaire post-décoche par les experts. L'archer devrait donc favoriser une ouverture nette de la main pour une libération fluide de la corde, mais dans un mouvement relâché et fluide sans pic de contraction musculaire.

7.2.2. Effet du niveau de performance et optimisation chez l'archer élite

La progression vers le niveau élite et le maintien de la performance à ce niveau demandent une réduction de l'activité de certains muscles, notamment le trapèze médian et le deltoïde

postérieur côté corde durant la phase de visée, et l'extenseur des doigts côté arc durant les deux phases.

Concernant le trapèze médian du bras de corde, les archers élites l'activent moins que les intermédiaires durant la phase de visée. Bien que ce constat nuance certaines études précédentes (Simsek et al., 2014, 2018), cette économie musculaire est également directement corrélée aux meilleurs scores au sein du groupe élite. En pratique, cela implique un entraînement à la stabilisation de la scapula par l'engagement des muscles profonds (comme le rhomboïde), plutôt que par une contraction excessive du trapèze médian.

Toujours durant la phase de visée, les archers élites sollicitent moins le deltoïde postérieur que les intermédiaires. Cette tendance se confirme au sein du groupe élite, où une plus faible activation est également associée aux meilleurs scores. Bien que ce résultat contraste avec les travaux de Simsek et al. (2018), il souligne une priorité technique : l'archer devrait maintenir la tension de la corde en s'appuyant sur la structure squelettique et l'engagement des rétracteurs scapulaires profonds (comme le rhomboïde), évitant ainsi une contraction isolée du deltoïde.

L'extenseur des doigts du bras d'arc est moins sollicité chez les archers élites que chez les archers intermédiaires, aussi bien durant la phase de visée que lors de la phase de suivi. Ce relâchement est aussi corrélé aux meilleures performances chez les archers élites. Ces résultats montrent qu'une faible activation de l'extenseur des doigts côté arc garantit la stabilité et précision de l'arc. Pour progresser sur ce point, les archers devraient viser une préhension minimale de la poignée, juste suffisante pour la maintenir sans serrer. Cette faible activation prévient les micro-tremblements parasites et garantit, après la décoche, un relâchement fluide indispensable au mouvement naturel de l'arc vers la cible.

D'autres paramètres présentent une gestion musculaire évolutive en fonction du niveau de performance. C'est le cas pour le fléchisseur des doigts côté corde avant le lâcher et le fléchisseur des doigts côté arc après la décoche.

Durant la phase de visée, nos résultats pour le fléchisseur superficiels des doigts confirment ceux de la littérature (Simsek et al., 2014, 2018; Tinazci, 2011), en montrant une activation plus faible chez les archers élites par rapport aux intermédiaires, ce qui suggère une stratégie d'économie d'effort. Cependant, au sein du groupe élite, une activation plus élevée est paradoxalement corrélée aux meilleurs scores. Cela suggère l'existence d'un niveau de tension optimal : suffisamment bas pour éviter les tremblements, mais assez élevé pour assurer le contrôle. L'objectif technique des archers est donc une préhension de la corde minimale, juste suffisante pour la stabiliser.

Durant la phase de suivi, les archers élites activent moins le fléchisseur superficiel des doigts côté arc que les intermédiaires. Toutefois, au sein du groupe élite, une activation plus soutenue est paradoxalement liée à la performance. L'archer de niveau intermédiaire devrait donc prioriser un relâchement actif pour ne pas perturber l'arc. Une fois cette technique maîtrisée, il devrait trouver un point d'équilibre où une tension minimale mais intentionnelle garantit le contrôle sans sacrifier la fluidité du geste.

7.2.3. Optimisation chez l'archer élite sans effet du niveau de performance

Certains muscles de l'avant-bras jouent un rôle important dans le maintien de la performance de haut niveau chez l'élite, même s'ils ne sont pas les principaux facteurs de progression entre les niveaux intermédiaire et élite. C'est notamment le cas de l'extenseur des doigts côté corde durant la visée et du fléchisseur des doigts côté arc, également en phase de visée.

Concernant l'extenseur des doigts côté corde durant la phase de visée, aucune différence significative d'activation médiane n'a été observée entre les deux niveaux. Toutefois, au sein du groupe d'archers élites, une activation plus élevée était collectivement associée à de meilleurs scores, sans constituer une stratégie individuelle distincte. Ce résultat contraste avec une large partie de la littérature (Simsek et al., 2014, 2018; Taha, Haque, et al., 2017; Tinazci, 2011), qui liait une plus grande activation à une performance inférieure. Nous attribuons cette divergence au niveau supérieur de nos archers élites en comparaison aux populations étudiées dans les études précédentes. L'activation plus élevée de l'extenseur reflèterait une stratégie maîtrisée plutôt qu'une co-contraction parasite, traduisant un contrôle neuromusculaire plus fin (Abernethy et al., 2003). En pratique, l'archer élite devrait maintenir une activation contrôlée et optimale de l'extenseur des doigts côté corde, afin de stabiliser efficacement la main et les doigts qui tiennent la corde.

Pour le fléchisseur superficiel des doigts du bras d'arc, aucune différence significative n'a été relevée entre les deux niveaux durant la phase de suivi. Néanmoins, une analyse plus fine montre qu'une activité plus forte de ce muscle était associée à de meilleures performances chez les archers élites. Loin d'être un signe de tension parasite, cette activation pourrait contribuer à la stabilisation post-décoche de l'arc. L'archer devrait donc viser une activation adéquate, garantissant une prise ferme mais non rigide de la poignée, afin d'assurer la stabilité de l'arc sans introduire de tensions inutiles ou de micromouvements parasites.

7.2.4. Effet du niveau de performance et individualisation chez l'archer élite

Pour certains muscles, la progression vers le niveau élite implique une configuration spécifique, mais l'optimisation à partir d'un certain niveau de performance demande une individualisation des stratégies. C'est le cas du trapèze supérieur du bras de corde en phase de suivi et du deltoïde médian côté arc en phase de visée.

Le trapèze supérieur du bras de corde présente une activité plus élevée chez les élites que chez les intermédiaires durant la phase de suivi. L'analyse individuelle révèle toutefois des stratégies divergentes : deux archers obtenaient leurs meilleurs résultats avec une activation réduite, tandis qu'un troisième performait mieux avec une activation plus grande. Ces observations, particulièrement ces stratégies individualisées, apportent de nouvelles perspectives à la littérature. En effet, bien que Shinohara & Urabe (2018) s'y soient intéressés, ils n'avaient pas rapporté de résultats significatifs pour ce muscle. Stabilisateur de la scapula, le trapèze supérieur contribue à l'abduction de l'épaule. Pour les archers intermédiaires, il semble nécessaire de maintenir un engagement juste après le lâcher. Chez les archers élites, deux approches techniques coexistent : relâchement conscient de l'épaule pour fluidifier le geste, ou maintien d'un engagement actif pour contrôler la trajectoire du bras de corde. Le feedback (sensation, vidéo, score) est indispensable pour identifier et renforcer la stratégie la plus performante pour l'archer.

Du côté du bras d'arc, le deltoïde médian est plus activé chez les archers élites que chez les archers intermédiaires en phase de visée, mais cette différence n'est pas corrélée aux scores des archers élites. L'analyse individuelle montre qu'une réduction de son activité était associée aux meilleurs tirs de trois archers. Cela suggère que la gestion de ce muscle, pourtant essentiel pour le soutien du bras d'arc (Kolayiş & Ertan, 2016), peut constituer une stratégie individualisée d'amélioration de la performance. Ainsi, une activation élevée distingue les archers élites des intermédiaires comme compétence de base (force et endurance de maintien), mais l'optimisation au plus haut niveau repose sur une modulation fine. Pour certains experts, une contraction réduite ou plus ciblée améliore la stabilité dynamique et limite les micro-tremblements parasites. Pour d'autres, la constance et l'efficience de l'activation habituelle restent essentielles pour éviter fatigue et perturbations. En pratique, les archers intermédiaires devraient renforcer la force et l'endurance du deltoïde médian, afin de stabiliser efficacement l'arc, et les archers élites, en revanche, devraient individualiser leur approche : soit réduire légèrement la contraction pour favoriser l'alignement squelettique, soit perfectionner la régularité de leur activation pour maintenir précision et stabilité.

7.2.5. Individualisation chez l'archer élite sans effet du niveau de performance

Enfin, un paramètre se distingue par la nécessité d'une stratégie d'individualisation exclusive : l'activation du deltoïde postérieur durant la phase de suivi. Aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes, ni en lien avec la performance pour l'ensemble du groupe élite. Cependant, l'analyse individuelle révèle une stratégie spécifique chez un archer, pour qui une plus faible activation du deltoïde postérieur était liée à ses meilleurs scores. Ce résultat individuel rejoint les conclusions de Tinazci (2011), qui avait adopté une méthodologie d'analyse intra-sujet similaire. Cela suggère que la gestion du relâchement du deltoïde postérieur en phase de suivi pourrait être un marqueur fin de la performance, potentiellement plus pertinent au niveau individuel qu'entre des groupes d'experts. Cela suggère que, pour certains athlètes, un relâchement délibéré du deltoïde postérieur après la décoche favorise un suivi du geste plus fluide et moins forcé. Cette approche optimiserait la phase de suivi en permettant une meilleure absorption des forces résiduelles. Il est donc essentiel que l'entraîneur et l'archer collaborent étroitement pour déterminer si cette stratégie de relâchement plus prononcé est bénéfique et pertinente pour l'athlète concerné.

7.3. Muscles du tronc

Nos résultats montrent une activation moindre des muscles du tronc (multifides, obliques externes, transverse de l'abdomen) chez les archers élites comparativement aux intermédiaires, dans les deux phases. Cette observation contraste avec la littérature, qui décrit généralement une activation plus élevée des muscles profonds pour renforcer la stabilisation (Azhar et al., 2021; Matsunaga et al., 2017). Cette divergence peut s'expliquer comme une stratégie d'efficience motrice plus avancée, permettant une stabilisation optimale avec un effort réduit. Également, les différences méthodologiques entre études doivent être prises en compte : Azhar et al. (2021) comparent élites et débutants sans découpage précis des phases, tandis que Matsunaga et al. (2017) ont étudié le Kyudo (tir à l'arc traditionnel japonais), dont la biomécanique diffère du tir à l'arc olympique.

L'oblique externe du côté corde apparaît comme le seul muscle présentant, chez les archers élites, une faible variabilité d'un tir à l'autre, ce qui traduit une capacité à reproduire très précisément la même stabilisation isométrique du tronc à chaque répétition. Cette constance entre les essais contribue à limiter les oscillations latérales et à éviter les mouvements parasites pouvant impacter la trajectoire de la flèche. Une activation reproductible de ce muscle d'un tir à l'autre garantit ainsi une stabilité du tronc favorable à une meilleure précision.

Au sein du groupe élite, l'analyse fine nuance ces tendances. Durant la phase de visée, une activation plus forte du multifide côté corde était associée aux meilleurs scores, suggérant l'existence d'un niveau optimal : une contraction insuffisante compromet la stabilité, tandis qu'une activation excessive caractérise plutôt les intermédiaires. Durant la phase de suivi, l'oblique externe côté corde était plus activé lors des meilleurs tirs, indiquant une stabilisation rapide du tronc pour contrer la perturbation de la décoche. À l'inverse, une moindre activation du transverse de l'abdomen était liée à de meilleures performances, suggérant une stratégie de relâchement pour éviter rigidité et fatigue. Enfin, chez un archer, une contraction réduite du multifide côté arc était également associée à de meilleurs scores.

En conclusion, une activation plus grande du multifide et de l'oblique externe côté corde favorise la performance. Les archers devraient s'entraîner à limiter l'inclinaison du tronc par rapport au bassin après la décoche. Ces résultats, qui nuancent les travaux antérieurs, apportent des données précieuses sur la stabilisation du tronc et ouvrent la voie à de nouvelles recherches sur les stratégies musculaires selon les niveaux de performance.

7.4. Contrôle postural

7.4.1. Surface et amplitudes de déplacement du CdP

Lors de la phase de visée, les archers élites présentent des déplacements du CdP significativement réduits par rapport aux archers intermédiaires : surface d'oscillation plus faible, amplitudes moindres dans les axes X (antéro-postérieur) et Y (médio-latéral), avec une différence plus marquée dans l'axe X. La variabilité de la surface du CdP et de son amplitude dans l'axe X est également plus faible, traduisant une régularité supérieure. Ces résultats confirment que la minimisation des oscillations est une caractéristique de l'expertise (Sarro et al., 2021; Tinazci, 2011). Toutefois, au sein du groupe d'archers élites, il n'y a aucune corrélation collective en fonction des scores. Un archer performant présentait même une surface de CdP plus élevée, suggérant une stratégie de micro-ajustements dynamiques pour affiner la visée. En pratique, les archers intermédiaires devraient s'entraîner à réduire la surface et les amplitudes, notamment dans l'axe X, par des exercices de stabilité posturale et un engagement plus grand des muscles des membres inférieurs, tout en recherchant de la régularité grâce à un feedback avec une plateforme de force par exemple.

La phase de suivi révèle une dynamique posturale différente. Les archers élites montrent des oscillations plus importantes que les archers intermédiaires, notamment dans l'axe Y. Collectivement au niveau élite, une réduction de l'amplitude dans l'axe X était associée aux meilleurs scores, tandis qu'une amplitude dans l'axe Y plus élevée correspondait également à

de meilleures performances. Ces tendances opposées à la comparaison inter-groupes traduisent une gestion différenciée des oscillations : limiter le mouvement latéral pour maintenir l'alignement, tout en acceptant un balancement antéro-postérieur pour la fluidité. Les stratégies individuelles confirment cette variabilité, certains archers optimisant leurs scores par une réduction de l'amplitude dans l'axe X ou de la surface du CdP. Les archers intermédiaires doivent apprendre à accompagner l'augmentation des oscillations post-décoche sans rigidité, tandis que les élites doivent individualiser leur stratégie avec l'aide de feedback.

7.4.2. Vitesses de déplacement du CdP

L'analyse des vitesses de déplacement du CdP en phase de visée montre des résultats inverses à la littérature : les élites présentent des vitesses supérieures (globale, axes X et Y, maximale) par rapport aux intermédiaires, avec une différence marquée sur l'axe Y. Alors que T. Paillard & Noé (2015) et Tinazci (2011) associent une vitesse réduite à un meilleur contrôle potsural, nos données révèlent qu'au sein du groupe élite, les meilleurs scores sont bien obtenus avec des vitesses moyennes plus faibles. Cela suggère que les archers élites possèdent une régulation posturale plus active et rapide, mais que l'optimisation consiste à minimiser la vitesse pour un tir parfait. L'analyse individuelle confirme cette complexité, certains archers adoptant des stratégies opposées. La stabilité au plus haut niveau apparaît donc comme une stabilité dynamique, fondée sur des micro-ajustements rapides. Les archers intermédiaires devraient développer leur réactivité par des exercices de perturbation de l'équilibre, afin d'améliorer la vitesse de réponse du système postural.

Lors de la phase de suivi, la tendance à des vitesses plus élevées chez les élites persiste. Cependant, la vitesse maximale du CdP est réduite lors des meilleurs tirs, en cohérence avec Spratford & Campbell (2017), qui associent également une vitesse maximale du CdP plus élevée après le lâcher à de moins bons scores. Nos résultats montrent aussi une variabilité entre les tirs plus grande de la vitesse maximale chez les élites, reflétant une capacité d'adaptation supérieure. Plutôt que de reproduire un suivi rigide, les archers élites ajustent dynamiquement leur réponse posturale pour absorber l'énergie du lâcher. Les archers intermédiaires devraient cibler la réduction de la vitesse maximale post-décoche pour stabiliser rapidement, tandis que les archers élites doivent cultiver une gestion adaptative de la variabilité, distinguant une stabilité active et flexible d'une simple reproductibilité.

Pour les archers intermédiaires, l'entrainement devrait se concentrer sur le développement d'un contrôle postural permettant de réduire la vitesse maximale de déplacement du CdP après la décoche, favorisant une stabilisation rapide. Chez l'élite, si la minimisation de la vitesse maximale du CdP reste cruciale pour les meilleurs tirs, l'entraînement doit aussi encourager une

gestion adaptative de la variabilité posturale. Cela implique de développer une capacité à ajuster dynamiquement la réponse corporelle pour absorber l'énergie du lâcher de manière optimale, distinguant une stabilité active et flexible d'une simple reproductibilité rigide. Chaque archer élite devrait ainsi affiner sa propre stratégie post-décoche pour une performance maximale.

7.5. Cinématique du bras de corde

Nos résultats montrent que l'angle d'abduction de l'épaule est significativement plus grand chez les élites que chez les intermédiaires. Ces observations contrastent avec la littérature qui associe l'expertise à une configuration plus « fermée », caractérisée par un angle d'abduction de l'épaule plus faible (Lin et al., 2010; Shinohara & Urabe, 2018). Il est important de souligner que l'étude de Lin et al. (2010), liant un angle de 90° à une minimisation des tremblements, a été menée sur des archers novices, ce qui pourrait expliquer cette divergence.

Au-delà de la valeur angulaire, la reproductibilité du geste distingue les archers élites : leur variabilité de l'angle d'abduction est nettement plus faible. Cette combinaison d'un angle plus grand et d'une meilleure régularité suggère que l'expertise ne repose pas sur un angle universellement « stable », mais sur la capacité à reproduire avec constance la configuration jugée optimale par l'archer. Ce résultat est cohérent avec l'activation plus élevée du trapèze supérieur observée chez les archers élites, muscle responsable de l'élévation de l'épaule.

Sur le plan technique, une abduction plus importante, soutenue par l'engagement du trapèze supérieur, pourrait favoriser l'action des rétracteurs de la scapula, limitant la sollicitation excessive des petits muscles de l'épaule et retardant la fatigue. Les entraîneurs devraient aider les archers à identifier la configuration cinématique qui optimise leur engagement dorsal, en utilisant des outils de feedback visuel pour renforcer la mémorisation de la posture.

Par ailleurs, l'angle de flexion du coude est plus grand chez les archers élites, en contraste avec Shinohara & Urabe, (2018). Cette différence pourrait refléter une technique visant à réduire l'activation du biceps pour maintenir une tension dorsale continue. En pratique, les archers devraient travailler à initier la traction depuis la scapula et le dos, plutôt que de « tenir » la corde avec le biceps.

En conclusion, une posture combinant un angle d'abduction de l'épaule et un angle de flexion du coude plus grands semble optimale. Cette configuration aligne le segment main-avant-bras avec la flèche et facilite l'utilisation des muscles dorsaux pour générer une traction efficace, transmise à la corde par l'avant-bras et la main.

7.6. Amplitude du thorax

L'analyse de l'amplitude du mouvement thoracique révèle une distinction entre les niveaux d'expertise. Nos résultats indiquent que cette amplitude est significativement plus élevée chez les archers intermédiaires que chez les archers élites. Ce mouvement réduit du thorax chez les experts suggère une stratégie respiratoire contrôlée et moins perturbatrice. Il est intéressant de noter qu'au sein du groupe élite, cette variable ne présentait pas de corrélation significative avec la performance individuelle, ce qui pourrait indiquer qu'une fois ce niveau de maîtrise atteint, d'autres facteurs cinématiques ou neuromusculaires deviennent prépondérants pour l'optimisation des scores.

Plutôt que d'adopter une respiration thoracique ample et superficielle, qui induirait des mouvements verticaux et rotatoires de la cage thoracique, les archers devraient privilégier une respiration plus abdominale ou diaphragmatique. Cette technique permet de mobiliser le diaphragme vers le bas, minimisant ainsi les mouvements du tronc. En réduisant ces perturbations internes, l'archer pourrait maintenir une stabilité axiale supérieure, transformant le tronc en une plateforme plus solide et inerte. Cette gestion respiratoire permettrait d'éviter que les phases d'inspiration ou d'expiration n'interfèrent avec la précision de la visée et la fluidité de la décoche, contribuant ainsi directement à une meilleure régularité et à une performance optimisée.

7.7. Stratégies temporelles

Nos résultats confirment une caractéristique clé de l'expertise : la durée de la phase de visée est significativement plus courte chez les archers élite (2,62 ± 1,85 secondes) que chez les archers intermédiaires (3,36 ± 2,26 secondes). Cette observation est en parfaite concordance avec la majorité des études, qui convergent vers une corrélation négative entre la durée de visée et le score, une phase plus courte étant associée à de meilleures performances (Sarro et al., 2021; Taha, Haque, et al., 2017; Tinazci, 2011).

Cette rapidité d’exécution est essentielle, car une contraction prolongée génère des tremblements nuisibles à la stabilité (Gottlieb & Lippold, 1983). Toutefois, l'analyse intra-élite nuance ce principe : si la brièveté est généralement favorable, des exceptions existent. Pour un archer une durée plus courte était associée aux scores élevés, tandis que pour un autre archer, c'était une durée plus longue qui était liée aux scores moyens par rapport aux faibles. Cela démontre que l'optimisation est individuelle et que, pour certains experts, la qualité de la visée prime sur sa simple réduction temporelle.

Concernant le TRC, nos résultats n'ont pas montré de différence significative entre les archers élites et intermédiaires au niveau des valeurs moyennes. Cependant, une analyse plus fine au sein du groupe d'archers élite a révélé que le TRC était significativement plus long pour les scores faibles par rapport aux scores élevés, suggérant qu'un lâcher moins précis est souvent précédé d'une réaction plus lente au signal. Ces observations rejoignent les précédentes études (Callaway et al., 2017; Ertan et al., 2003; Heller, 2012; Spratford & Campbell, 2017).

Pour les archers intermédiaires, l'entraînement devrait cibler une réduction de la durée de la phase de visée et une amélioration de la réactivité au déclenchement, afin d'éviter la dégradation de la précision due aux contractions prolongées. Cela peut impliquer des exercices chronométrés pour une visée rapide et des exercices de réactivité au signal de décoche pour un TRC court et constant. Chez le niveau élite, la priorité est de maintenir un TRC optimal, mais la gestion de la durée de visée s'individualise. Certains archers de niveau élite devront renforcer leur capacité à tirer rapidement et avec précision, tandis que d'autres pourront optimiser des visées légèrement plus longues si cela ne nuit pas à leur précision.

7.8. Perspectives

Ces travaux sur la performance en tir à l'arc ouvrent de nouvelles perspectives de recherche : plusieurs de nos résultats diffèrent des études antérieures, et apportent aussi de nouveaux éclairages sur des dimensions encore inexplorées. Le rôle fondamental du *core stability* dans la stabilité et la chaîne cinétique est établi dans de nombreuses disciplines (Bustos Carvajal & Arias Coronel, 2025; Hibbs et al., 2008), reposant sur sa fonction stabilisatrice (Hodges & Richardson 1996), et sa capacité à transmettre les forces entre le bas et le haut du corps (Kibler et al. 2006). Alors que les études actuelles s'y sont peu intéressées, l'intégration de ces principes semble indispensable dans une activité aussi dépendante de la stabilité que le tir à l'arc. Les recherches futures devraient ainsi examiner plus précisément la contribution des muscles du tronc chez les archers.

Nos résultats montrent également que la performance en tir à l'arc de haut niveau présente un caractère individualisé, un aspect pourtant très peu exploré dans la littérature de cette discipline. Cette individualisation des paramètres de performance est en revanche documentée dans d'autres sports, où elle constitue un principe central d'analyse et d'entraînement (Button et al., 2003; Davids et al., 2003).

Par ailleurs, ces travaux soulignent la nécessité de dépasser les corrélations linéaires simples. En effet, pour certains résultats, la performance ne dépend pas d'une simple augmentation ou diminution, mais d'un « point d'équilibre optimal » (cf, 7.2.2 sur le fléchisseur des doigts), ce

qui requiert des modèles statistiques non linéaires. Aussi, face aux « stratégies distinctes » et « tendances opposées » observées (cf, 7.2.4 sur le trapèze supérieur), l'analyse doit s'individualiser. En révélant la nature complexe et hautement individuelle de la performance en tir à l'arc, ce travail montre que les analyses classiques restent perfectibles et gagneraient à être complétées par des outils offrant une évaluation plus globale et plus précise. Il ouvre la voie à l'utilisation d'outils plus puissants, comme l'intelligence artificielle (IA), pour analyser ces données complexes et mieux comprendre les caractéristiques individuelles de la performance.

Concrètement, l'IA peut intervenir à trois niveaux. D'une part, un algorithme peut être entraîné sur l'ensemble des données collectées lors d'un tir : EMG, variables de déplacements du CdP, variables temporelles et cinématiques, ainsi que le score obtenu. L'IA est alors capable d'apprendre les combinaisons non linéaires entre ces paramètres, souvent trop complexes pour être modélisées par des approches statistiques classiques. L'objectif est de prédire la probabilité de réussite d'un tir en fonction des stratégies adoptées par le système neuro-musculo-squelettique. À terme, cela permettrait de simuler l'impact de modifications techniques sur la performance attendue.

D'autre part, l'IA peut également automatiser la découverte de profils techniques en regroupant les athlètes selon les différents facteurs mesurés. Plutôt que de chercher un modèle unique, elle met en évidence des « signatures » individuelles ou collectives. Cette classification permettrait de mieux comprendre la diversité des stratégies efficaces et d'identifier des sous-groupes d'athlètes partageant des caractéristiques communes. Pour la recherche scientifique, cela ouvre la voie à une typologie plus fine de l'expertise, et pour l'entraînement, cela facilite la personnalisation des conseils en fonction du profil identifié.

Enfin, l'IA peut hiérarchiser les facteurs de performance pour chaque athlète. En analysant ses données, le modèle peut déterminer quel paramètre constitue son principal facteur limitant : par exemple, une vitesse excessive du CdP pour l'un, ou un relâchement insuffisant du deltoïde pour un autre. L'entraîneur dispose alors d'un outil d'aide à la décision, capable de cibler précisément les axes de progression. Cette approche transforme l'entraînement en un processus adaptatif, où chaque athlète bénéficie d'indications personnalisées basées sur ses propres données, plutôt que sur des normes générales.

L'enjeu futur est donc de passer d'une approche descriptive à des outils prescriptifs et adaptatifs. Au-delà de la seule optimisation du geste, l'IA est déjà largement explorée pour la prédiction et la prévention des blessures en combinant des variables internes et externes (Leckey et al., 2025). Pour garantir l'adoption de ces outils complexes par le staff médical et les entraîneurs, le développement de modèles « explicables » (Van Eetvelde et al., 2021) constituera une avancée

clé. Ces modèles permettent non seulement de comprendre les mécanismes conduisant aux prédictions, mais aussi d'accroître la confiance dans ces technologies d'accompagnement de la performance.

8. Conclusion générale

La première étude a comparé un groupe d'archers "élite" à un groupe "intermédiaire". Les résultats ont partiellement validé nos hypothèses, puisque l'expertise se traduit par une efficience neuromusculaire supérieure, caractérisée par une activation musculaire globalement plus faible, signe d'une meilleure économie d'effort et d'un relâchement actif. Ils montrent cependant une activation sélective plus élevée de muscles stabilisateurs clés. Sur le plan postural, les élites sont plus stables en visée (amplitude d'oscillation réduite), mais gèrent cette stabilité par des micro-ajustements plus rapides. À l'inverse, leur phase de suivi montre plus de mouvement, suggérant une absorption active de l'énergie libérée par la décoche. Ils sont également plus rapides, avec un temps de visée plus court. Les archers élites réduisent la variabilité inter-essai de certains paramètres, minimisant ainsi les fluctuations indésirables d'un tir à l'autre tout en conservant celles qui restent fonctionnelles.

La seconde étude s'est concentrée exclusivement sur le groupe "élite" afin d'analyser les éléments responsables de la variation de performance. Nos hypothèses sont validées, puisque certains paramètres apparaissent communs au groupe, tandis que d'autres relèvent de stratégies individuelles. A l'échelle du groupe, les résultats ont montré que des scores élevés étaient liés à une activation spécifique de plusieurs muscles, à une meilleure stabilité posturale et à une réaction rapide au clicker. L'analyse individuelle de chaque archer a montré des stratégies distinctes dans les différentes dimensions de la performance, voire opposées, d'un athlète à l'autre. Nos conclusions ont montré que l'entraînement devrait d'abord prioriser une base technique qui concernent certains paramètres, puis poursuivre sur une phase de personnalisation en individualisant d'autres paramètres en fonction des préférences de chaque archer.

Ce travail de thèse apporte un nouvel angle de réflexion sur l'analyse de la performance en tir à l'arc. Il démontre que le passage d'un niveau intermédiaire à l'élite nécessite l'acquisition d'une efficience neuromusculaire, une meilleure stabilité posturale et une faible variabilité inter-flèches. En revanche, une fois l'athlète à un niveau élite, la performance ne dépend plus d'un modèle unique, mais d'une optimisation personnelle. L'expertise en tir à l'arc est redéfinie comme un équilibre entre la capacité à reproduire son geste et la capacité à trouver la stratégie individuelle la plus efficace pour soi. Cette complexité, où des stratégies opposées mènent au même succès, montre les limites des analyses statistiques traditionnelles et ouvre la voie à des

outils d'analyse individualisés, comme l'intelligence artificielle, pour modéliser et prédire la performance.

9. Références

Aalto, H., Pyykkö, I., Ilmarinen, R., Kähkönen, E., & Starck, J. (1990). Postural Stability in Shooters. *ORL*, *52*(4), Article 4. https://doi.org/10.1159/000276141

Abernethy, B., Neal, R. J., Moran, M. J., & Parker, A. A. W. (2003). *Expert-novice differences in muscle activity during the golf swing*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:13585328

Açıkada, C., Hazır, T., Asçı, A., Aytar, S. H., & Tınazcı, C. (2019). Effect of heart rate on shooting performance in elite archers. *Heliyon*, *5*(3), e01428. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01428

Ahmad, Z., Taha, Z., Hassan, H. A., Hisham, M. A., Johari, N. H., & Kadirgama, K. (2014). Biomechanics Measurements in Archery. *Journal of mechanical engineering and sciences*, *6*, 762-771. https://doi.org/10.15282/jmes.6.2014.4.0074

Ariffin, M. S., & Rambely, A. S. (2017). *Comparison of upper limb muscles behaviour for skilled and recreational archers using compound bow*. 020053. https://doi.org/10.1063/1.4980916

Azhar, S., Sharma, S., Sharma, S., & Tanwar, T. (2021). EMG Activity of Transversus Abdominis, Multifidus and Co-Contraction Index in Different Phases Amongst Varied Level Archers : A Cross-Sectional Study. *Polish Journal of Sport and Tourism*, *28*(1), Article 1. https://doi.org/10.2478/pjst-2021-0004

Baifa, Z., Xinglong, Z., & Dongmei, L. (2023). Muscle coordination during archery shooting : A comparison of archers with different skill levels. *European Journal of Sport Science*, *23*(1), Article 1. https://doi.org/10.1080/17461391.2021.2014573

Barbosa, T. M., Marinho, D. A., Costa, M. J., & Silva, A. J. (2011). Biomechanics of Competitive Swimming Strokes. In V. Klika (Éd.), *Biomechanics in Applications*. InTech. https://doi.org/10.5772/19553

Bernard-Demanze, L., Burdet, C., Berger, L., & Rougier, P. (2004). Recalibration of somesthetic plantar information in the control of undisturbed upright stance maintenance. *Journal of Integrative Neuroscience*, *03*(04), 433-451. https://doi.org/10.1142/S0219635204000580

Bernstein, N. (1967). *The coordination and regulation of movements.*

Berthoz, A. (2001). *Le sens du mouvement*. Jacob.

Black, F. O., Wall, C., Rockette, H. E., & Kitch, R. (1982). Normal subject postural sway during the romberg test. *American Journal of Otolaryngology*, *3*(5), 309-318. https://doi.org/10.1016/S0196-0709(82)80002-1

Borel, L., Harlay, F., Magnan, J., Chays, A., & Lacour, M. (2002). Deficits and recovery of head and trunk orientation and stabilization after unilateral vestibular loss. *Brain*, *125*(4), 880-894. https://doi.org/10.1093/brain/awf085

Bouisset, S. (1991). Relation entre support postural et mouvement intentionnel : Approche biomécanique. *Archives Internationales de Physiologie, de Biochimie et de Biophysique*, *99*(5), A77-A92. https://doi.org/10.3109/13813459109145919

Bustos Carvajal, J. S., & Arias Coronel, F. (2025). Exploring the role of the core in sports performance : A systematic review of the effects of core muscle training. *Frontiers in Sports and Active Living*, *7*, 1630584. https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1630584

Button, C., Macleod, M., Sanders, R., & Coleman, S. (2003). Examining Movement Variability in the Basketball Free-Throw Action at Different Skill Levels. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *74*(3), 257-269. https://doi.org/10.1080/02701367.2003.10609090

Callaway, A. J., Wiedlack, J., & Heller, M. (2017). Identification of temporal factors related to shot performance for indoor recurve archery. *Journal of Sports Sciences*, *35*(12), Article 12. https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1211730

Chen, Y.-C., & Hung, T.-M. (2010). Effects of pre-competition cognitive anxiety on attention and emotion during archery performance. *International Journal of Psychophysiology*, *77*(3), 268-268. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2010.06.105

Clarke, D. H. (1978). The Role of Contraction Duration in Muscular Fatigue. *Research Quarterly. American Alliance for Health, Physical Education and Recreation*, *49*(1), 12-19. https://doi.org/10.1080/10671315.1978.10615500

Clarys, J. P., Cabri, J., Bollens, E., Sleeckx, R., Taeymans, J., Vermeiren, M., Van Reeth, G., & Voss, G. (1990). Muscular activity of different shooting distances, different release techniques, and different performance levels, with and without stabilizers, in target archery. *Journal of Sports Sciences*, *8*(3), Article 3. https://doi.org/10.1080/02640419008732149

Clemente, F., Couceiro, M., Rocha, R., & Mendes, R. (2011). *Study of the Heart Rate and Accuracy Performance of Archers*.

Comerford, M. J., & Mottram, S. L. (2001). Functional stability re-training : Principles and strategies for managing mechanical dysfunction. *Manual Therapy*, *6*(1), 3-14. https://doi.org/10.1054/math.2000.0389

Darendeli, A., Ertan, H., & Enoka, R. M. (2023). Comparison of EMG Activity in Leg Muscles between Overground and Treadmill Running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *55*(3), 517-524. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003055

Davids, K., Glazier, P., Ara??jo, D., & Bartlett, R. (2003). Movement Systems as Dynamical Systems : The Functional Role of Variability and its Implications for Sports Medicine. *Sports Medicine*, *33*(4), 245-260. https://doi.org/10.2165/00007256-200333040-00001

De Luca, C. J. (1997). The Use of Surface Electromyography in Biomechanics. *Journal of Applied Biomechanics*, *13*(2), 135-163. https://doi.org/10.1123/jab.13.2.135

Decker, S., Horváth, T., Takács, J., & Koller, A. (2024). Body Positions and Physical Activity Levels Modulate the Ratio of Abdominal to Thoracic Breathing and Respiratory Rate in Young Individuals. *Journal of Clinical Medicine*, *13*(24), 7825. https://doi.org/10.3390/jcm13247825

Do, M. C., Bussel, B., & Breniere, Y. (1990). Influence of plantar cutaneous afferents on early compensatory reactions to forward fall. *Experimental Brain Research*, *79*(2), 319-324. https://doi.org/10.1007/BF00608241

Edelmann-Nusser, J., Heller, M., Hofmann, M., & Ganter, N. (2006). On-target trajectories and the final pull in archery. *European Journal of Sport Science*, *6*(4), 213-222. https://doi.org/10.1080/17461390601012579

Era, P., Konttinen, N., Mehto, P., Saarela, P., & Lyytinen, H. (1996). Postural stability and skilled performance—A study on top-level and naive rifle shooters. *Journal of Biomechanics*, *29*(3), 301-306. https://doi.org/10.1016/0021-9290(95)00066-6

Ertan, H. (2009). Muscular activation patterns of the bow arm in recurve archery. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *12*(3), Article 3. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2008.01.003

Ertan, H., Kentel, B., Tümer, S. T., & Korkusuz, F. (2003). Activation patterns in forearm muscles during archery shooting. *Human Movement Science*, *22*(1), Article 1. https://doi.org/10.1016/S0167-9457(02)00176-8

Ertan, H., Soylu, A. R., & Korkusuz, F. (2005). Quantification the relationship between FITA scores and EMG skill indexes in archery. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *15*(2), Article 2. https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2004.08.004

Field, A. P. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (6th edition). Sage.

Figueiredo, P., Pendergast, D. R., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2013). Interplay of Biomechanical, Energetic, Coordinative, and Muscular Factors in a 200 m Front Crawl Swim. *BioMed Research International*, *2013*, 1-12. https://doi.org/10.1155/2013/897232

Fitzpatrick, R., & McCloskey, D. I. (1994). Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for the perception of sway during standing in humans. *The Journal of Physiology*, *478*(1), 173-186. https://doi.org/10.1113/jphysiol.1994.sp020240

Gómez-Landero, L. A., Leal Del Ojo, P., Walker, C., & Floría, P. (2021). Static balance performance differs depending on the test, age and specific role played in acrobatic gymnastics. *Gait & Posture*, *90*, 48-54. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.07.023

Gottlieb, S., & Lippold, O. C. (1983). The 4-6 HZ tremor during sustained contraction in normal human subjects. *The Journal of Physiology*, *336*(1), 499-509. https://doi.org/10.1113/jphysiol.1983.sp014594

Granata, K. P., Padua, D. A., & Abel, M. F. (2005). Repeatability of surface EMG during gait in children. *Gait & Posture*, *22*(4), 346-350. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2004.11.014

Halder, A. M., Halder, C. G., Zhao, K. D., O'Driscoll, S. W., Morrey, B. F., & An, K. N. (2001). Dynamic inferior stabilizers of the shoulder joint. *Clinical Biomechanics*, *16*(2), 138-143. https://doi.org/10.1016/S0268-0033(00)00077-2

Heinrich, A., Hansen, D. W., Stoll, O., & Cañal-Bruland, R. (2020). The impact of physiological fatigue and gaze behavior on shooting performance in expert biathletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *23*(9), Article 9. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2020.02.010

Heller, M. (2012). Evaluation of arrow release in highly skilled archers using an acoustic measurement system. *Procedia Engineering*, *34*, 532-537. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.091

Hennessy, M. P., & Parker, A. W. (1990). Electromyography of arrow release in archery. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*, *30*(1), 7-17.

Hermens, H. J., Freriks, B., Disselhorst-Klug, C., & Rau, G. (2000). Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *10*(5), 361-374. https://doi.org/10.1016/S1050-6411(00)00027-4

Hibbs, A. E., Thompson, K. G., French, D., Wrigley, A., & Spears, I. (2008). Optimizing performance by improving core stability and core strength. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *38*(12), Article 12. https://doi.org/10.2165/00007256-200838120-00004

Hick, W. E. (1952). On the Rate of Gain of Information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *4*(1), 11-26. https://doi.org/10.1080/17470215208416600

Hodges, P. W., & Richardson, C. A. (1996). Inefficient Muscular Stabilization of the Lumbar Spine Associated With Low Back Pain : A Motor Control Evaluation of Transversus Abdominis. *Spine*, *21*(22), 2640-2650. https://doi.org/10.1097/00007632-199611150-00014

Ihalainen, S., Kuitunen, S., Mononen, K., & Linnamo, V. (2016). Determinants of elite-level air rifle shooting performance : Air rifle shooting performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *26*(3), Article 3. https://doi.org/10.1111/sms.12440

Ihalainen, S., Laaksonen, M. S., Kuitunen, S., Leppävuori, A., Mikkola, J., Lindinger, S. J., & Linnamo, V. (2018). Technical determinants of biathlon standing shooting performance before and after race simulation. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *28*(6), Article 6. https://doi.org/10.1111/sms.13072

Kahle, N. L., & Gribble, P. A. (2009). Core Stability Training in Dynamic Balance Testing Among Young, Healthy Adults. *Athletic Training & Sports Health Care*, *1*(2), 65-73. https://doi.org/10.3928/19425864-20090301-03

Keast, D., & Elliott, B. (1990). Fine body movements and the cardiac cycle in archery. *Journal of Sports Sciences*, *8*(3), 203-213. https://doi.org/10.1080/02640419008732146

Kibler, W. B., Press, J., & Sciascia, A. (2006). The Role of Core Stability in Athletic Function: *Sports Medicine*, *36*(3), 189-198. https://doi.org/10.2165/00007256-200636030-00001

Kiefer, A., Parnianpour, M., & Shirazi-Adl, A. (1997). Stability of the human spine in neutral postures. *European Spine Journal*, *6*(1), 45-53. https://doi.org/10.1007/BF01676574

Kim, E. J., Kang, H. W., & Park, S. M. (2021). The Effects of Psychological Skills Training for Archery Players in Korea : Research Synthesis Using Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(5), 2272. https://doi.org/10.3390/ijerph18052272

Kim, H.-B., Kim, S.-H., & So, W.-Y. (2015). The Relative Importance of Performance Factors in Korean Archery. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *29*(5), Article 5. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000687

Kim, K., Cho, J., Choi, H., & Song, J. (2025). Bow stability and postural sway during aiming and shooting in elite compound archery. *Sports Biomechanics*, 1-14. https://doi.org/10.1080/14763141.2024.2446172

Kim, T.-W., Lee, J.-W., Kang, S.-K., Chae, K.-Y., Choi, S.-H., & Song, Y.-G. (2021). A Feasibility Study of Kinematic Characteristics on the Upper Body According to the Shooting of Elite Disabled Archery Athletes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(6), Article 6. https://doi.org/10.3390/ijerph18062962

Kolayiş, İ. E., & Ertan, H. (2016). *Differences in Activation Patterns of Shoulder Girdle Muscles in Recurve Archers*.

Kuczyński, M., & Wieloch, M. (2008). Effects of Accelerated Breathing On Postural Stability. *Human Movement*, *9*(2). https://doi.org/10.2478/v10038-008-0012-9

Lambrich, J., & Muehlbauer, T. (2025). Effects of fatigue on physiological, physical fitness, and stroke performance related parameters in healthy tennis players : A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Sports and Active Living*, *7*, 1578914. https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1578914

Latash, M. L. (2008). *Neurophysiological basis of movement* (2nd ed). Human Kinetics.

Lee, K., & Benner, T. (2009). *Total archery : Inside the archer* (1st ed). Astra.

Leroyer, P., Van Hoecke, J., & Helal, J. N. (1993). Biomechanical study of the final push-pull in archery. *Journal of Sports Sciences*, *11*(1), 63-69. https://doi.org/10.1080/02640419308729965

Lin, J.-J., Hung, C.-J., Yang, C.-C., Chen, H.-Y., Chou, F.-C., & Lu, T.-W. (2010). Activation and tremor of the shoulder muscles to the demands of an archery task. *Journal of Sports Sciences*, *28*(4), Article 4. https://doi.org/10.1080/02640410903536434

Mann, D. L., & Littke, N. (1989). Shoulder injuries in archery. *Canadian Journal of Sport Sciences = Journal Canadien Des Sciences Du Sport*, *14*(2), 85-92.

Martin, P. E., Siler, W. L., & Hoffman, D. (1990). Electromyographic analysis of bow string release in highly skilled archers. *Journal of Sports Sciences*, *8*(3), 215-221. https://doi.org/10.1080/02640419008732147

Massion, J. (1992). Movement, posture and equilibrium : Interaction and coordination. *Progress in Neurobiology*, *38*(1), 35-56. https://doi.org/10.1016/0301-0082(92)90034-C

Matsunaga, N., Imai, A., & Kaneoka, K. (2017). Comparison of Modular Control of Trunk Muscle by Japanese Archery Competitive Level : A Pilot Study. *International Journal of Sport and Health Science*, *15*(0), 160-167. https://doi.org/10.5432/ijshs.201714

Mohamed, M. N., Wan Norman, W. M. N., Linoby, A., Sariman, M. H., & Mohd Azam, M. Z. (2014). Breathing Pattern Influence to the Shooting Performance. In R. Adnan, S. I. Ismail,

& N. Sulaiman (Éds.), *Proceedings of the International Colloquium on Sports Science, Exercise, Engineering and Technology 2014 (ICoSSEET 2014)* (p. 321-333). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-287-107-7_34

Mononen, K., Konttinen, N., Viitasalo, J., & Era, P. (2006). Relationships between postural balance, rifle stability and shooting accuracy among novice rifle shooters. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, *0*(0), Article 0. https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2006.00549.x

Mononen, K., Konttinen, N., Viitasalo, J., & Era, P. (2007). Relationships between postural balance, rifle stability and shooting accuracy among novice rifle shooters. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, *17*(2), Article 2.

Nashner, L. M., & McCollum, G. (1985). The organization of human postural movements : A formal basis and experimental synthesis. *Behavioral and Brain Sciences*, *8*(1), 135-150. https://doi.org/10.1017/S0140525X00020008

Niinimaa, V., & McAvoy, T. (1983). Influence of exercise on body sway in the standing rifle shooting position. *Canadian journal of applied sport sciences. Journal canadien des sciences appliquees au sport*, *8*(1), Article 1.

Nishizono, Shibayama, Izuta, & Saito. (1987). *Analysis of archery shooting techniques by means of electromyography.*

Paillard, J. (1971). Les determinants moteurs de l'organisation de l'espace. *Cahiers de psychologie*, *14*(4), 261-316.

Paillard, T. (2017). Plasticity of the postural function to sport and/or motor experience. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *72*, 129-152. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.11.015

Paillard, T., & Noé, F. (2015). Techniques and Methods for Testing the Postural Function in Healthy and Pathological Subjects. *BioMed Research International*, *2015*, 1-15. https://doi.org/10.1155/2015/891390

Palluel, E., Nougier, V., & Olivier, I. (2008). Do spike insoles enhance postural stability and plantar-surface cutaneous sensitivity in the elderly? *AGE*, *30*(1), 53-61. https://doi.org/10.1007/s11357-008-9047-2

Quan, C.-H., Mohy-Ud-Din, Z., & Lee, S. (2017). Analysis of Shooting Consistency in Archers : A Dynamic Time Warping Algorithm-Based Approach. *Journal of Sensors*, *2017*, 1-6. https://doi.org/10.1155/2017/7471217

Robazza, C., Bortoli, L., & Nougier, V. (1998). Physiological Arousal and Performance in Elite Archers : A Field Study. *European Psychologist*, *3*(4), 263-270. https://doi.org/10.1027/1016-9040.3.4.263

Rota, S., Rogowski, I., Champely, S., & Hautier, C. (2013). Reliability of EMG normalisation methods for upper-limb muscles. *Journal of Sports Sciences*, *31*(15), Article 15. https://doi.org/10.1080/02640414.2013.796063

Sadowska, D., Krzepota, J., & Klusiewicz, A. (2019). Postural balance and rifle stability in a standing shooting position after specific physical effort in biathletes. *Journal of Sports Sciences*, *37*(16), Article 16.

Saini, S. S., Shah, S. S., & Curtis, A. S. (2020). Scapular Dyskinesis and the Kinetic Chain : Recognizing Dysfunction and Treating Injury in the Tennis Athlete. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, *13*(6), 748-756. https://doi.org/10.1007/s12178-020-09672-6

Salazar, W., Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Han, M., Crews, D. J., & Kubitz, K. A. (1990). Hemispheric Asymmetry, Cardiac Response, and Performance in Elite Archers. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *61*(4), 351-359. https://doi.org/10.1080/02701367.1990.10607499

Sandrey, M. A., & Mitzel, J. G. (2013). Improvement in Dynamic Balance and Core Endurance After a 6-Week Core-Stability-Training Program in High School Track and Field Athletes. *Journal of Sport Rehabilitation*, *22*(4), 264-271. https://doi.org/10.1123/jsr.22.4.264

Sarro, K. J., Viana, T. D. C., & De Barros, R. M. L. (2021). Relationship between bow stability and postural control in recurve archery. *European Journal of Sport Science*, *21*(4), Article 4. https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1754471

Sattlecker, G., Buchecker, M., Gressenbauer, C., Müller, E., & Lindinger, S. J. (2017). Factors Discriminating High From Low Score Performance in Biathlon Shooting. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(3), Article 3. https://doi.org/10.1123/ijspp.2016-0195

Sattlecker, G., Buchecker, M., Müller, E., & Lindinger, S. J. (2014a). Postural balance and rifle stability during standing shooting on an indoor gun range without physical stress in different groups of biathletes. *International Journal of Sports Science & Coaching*, *9*(1), Article 1.

Sattlecker, G., Buchecker, M., Müller, E., & Lindinger, S. J. (2014b). Postural Balance and Rifle Stability during Standing Shooting on an Indoor Gun Range without Physical Stress in Different Groups of Biathletes. *International Journal of Sports Science & Coaching*, *9*(1), Article 1. https://doi.org/10.1260/1747-9541.9.1.171

Serrien, B., Witterzeel, E., & Baeyens, J.-P. (2018). The Uncontrolled Manifold Concept Reveals That the Structure of Postural Control in Recurve Archery Shooting Is Related to Accuracy. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, *3*(3), 48. https://doi.org/10.3390/jfmk3030048

Shinohara, H., & Urabe, Y. (2018). Analysis of muscular activity in archery : A comparison of skill level. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *58*(12), Article 12. https://doi.org/10.23736/S0022-4707.17.07826-4

Simsek, D., Cerrah, A. O., Ertan, H., & Soylu, A. R. (2014). *Kinetic and kinematic analysis of recurve archery shooting technique*.

Simsek, D., Cerrah, A. O., Ertan, H., & Soylu, A. R. (2019). A comparison of the ground reaction forces of archers with different levels of expertise during the arrow shooting. *Science & Sports*, *34*(2), Article 2. https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.08.008

Simsek, D., Cerrah, A. O., Ertan, H., & Soylu, R. A. (2018). *Muscular coordination of movements associated with arrow release in archery*.

Soylu, A. R., Ertan, H., & Korkusuz, F. (2006). Archery performance level and repeatability of event-related EMG. *Human Movement Science*, *25*(6), Article 6. https://doi.org/10.1016/j.humov.2006.05.002

Spratford, W., & Campbell, R. (2017). Postural stability, clicker reaction time and bow draw force predict performance in elite recurve archery. *European Journal of Sport Science*, *17*(5), Article 5. https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1285963

Stuart, J., & Atha, J. (1990). Postural consistency in skilled archers. *Journal of Sports Sciences*, *8*(3), Article 3. https://doi.org/10.1080/02640419008732148

Suppiah, P. K., Kiet, T. W. K., Musa, R. M., Abdullah, M. R., Lee, J. L. F., & Maliki, A. B. H. M. (2017). The Effectiveness of a Core Muscles Stability Program in Reducing the Postural Sway of Adolescent Archers : A Panacea for a better Archery Performance. *International Journal of Physiotherapy*, *4*(5), Article 5. https://doi.org/10.15621/ijphy/2017/v4i5/159425

Taha, Z., Haque, M., Musa, R., Abdullah, M., Maliki, A. B. M., Mat-Rashid, S., Kosni, N., & Adnan, A. (2017). Analysis of biological and mechanical related performance parameters of Malaysian senior youth archers. *Advances in Human Biology*, *7*(3), Article 3. https://doi.org/10.4103/AIHB.AIHB_35_17

Taha, Z., Muazu Musa, R., Razali Abdullah, M., Azrai Mohd Razman, M., Ming Lee, C., Azizi Adnan, F., Amirul Abdullah, M., & Haque, M. (2017). The Application of Inertial Measurement Units and Wearable Sensors to Measure Selected Physiological Indicators in

Archery. *Asian Journal of Pharmaceutical Research and Health Care*, *9*(2), Article 2. https://doi.org/10.18311/ajprhc/2017/11046

Takai, H., Kubo, Y., & Araki, M. (2012). *Characteristics of Shooting Time of The World's Top Level Male Archery Athletes*.

Tharion, W. J., Montain, S. J., O'Brien, C., Shippee, R. L., & Hoban, J. L. (1997). Effects of military exercise tasks and a carbohydrate-electrolyte drink on rifle shooting performance in two shooting positions. *International journal of industrial ergonomics*, *19*(1), Article 1.

Tinazci, C. (2011). Shooting dynamics in archery : A multidimensional analysis from drawing to releasing in male archers. *Procedia Engineering*, *13*, 290-296. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.05.087

Valayi, F., Bagherli, J., & Taheri, M. (2024). The Impact of Performance Fatigue on Visual Perception, Concentration, and Reaction Time in Professional Female Volleyball Players. *International Journal of Sport Studies for Health*, *7*(2), 47-54. https://doi.org/10.61838/kman.intjssh.7.2.5

Van Hooren, B., & Lepers, R. (2023). A physiological comparison of the new—over 70 years of age—marathon record holder and his predecessor : A case report. *Frontiers in Physiology*, *14*, 1122315. https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1122315

Vendrame, E., Belluscio, V., Truppa, L., Rum, L., Lazich, A., Bergamini, E., & Mannini, A. (2022). Performance assessment in archery : A systematic review. *Sports Biomechanics*, 1-23. https://doi.org/10.1080/14763141.2022.2049357

Vuillerme, N., Forestier, N., & Nougier, V. (2002). Attentional demands and postural sway : The effect of the calf muscles fatigue. *Medicine and science in sports and exercise*, *34*(12), Article 12.

Vuillerme, N., & Nougier, V. (2004). Attentional demand for regulating postural sway : The effect of expertise in gymnastics. *Brain Research Bulletin*, *63*(2), 161-165. https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2004.02.006

Vuillerme, N., Nougier, V., & Teasdale, N. (2002). Effects of lower limbs muscular fatigue on anticipatory postural adjustments during arm motions in humans. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *42*(3), 289-294.

Wang, D., Hu, T., Luo, R., Shen, Q., Wang, Y., Li, X., Qiao, J., Zhu, L., Cui, L., & Yin, H. (2022). Effect of Cognitive Reappraisal on Archery Performance of Elite Athletes : The Mediating Effects of Sport-Confidence and Attention. *Frontiers in Psychology*, *13*, 860817. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.860817

Wang, K., Deng, Z., Chen, X., Shao, J., Qiu, L., Jiang, C., & Niu, W. (2023). The Role of Multifidus in the Biomechanics of Lumbar Spine : A Musculoskeletal Modeling Study. *Bioengineering*, *10*(1), 67. https://doi.org/10.3390/bioengineering10010067

Yoon, T.-L. (2017a). Validity and Reliability of an Inertial Measurement Unit-Based 3D Angular Measurement of Shoulder Joint Motion. *The Journal of Korean Physical Therapy*, *29*(3), 145-151. https://doi.org/10.18857/jkpt.2017.29.3.145

Yoon, T.-L. (2017b). Validity and Reliability of an Inertial Measurement Unit-Based 3D Angular Measurement of Shoulder Joint Motion. *The Journal of Korean Physical Therapy*, *29*(3), 145-151. https://doi.org/10.18857/jkpt.2017.29.3.145

Zatsiorsky, V., & Aktov, A. (1990). Biomechanics of highly precise movements : The aiming process in air rifle shooting. *Journal of biomechanics*, *23*, 35-41.

Zawi, K., & Mohamed, M. N. (2013). Postural Sway Distinguishes Shooting Accuracy among Skilled Recurve Archers. *The Online Journal of Recreation and Sport*, *2*(4), Article 4.

ANNEXES

1. Rapport de mesure aux archers

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Rapport de mesure - Tir à l'arc

CARE Centre d'Accompagnement, de Recherche et d'Expertise

Nom: Prénom: Date: 21/05/2024 Latéralité : Droitier

L'analyse a eu lieu sur 8 volées de 9 flèches, en étudiant cinq aspects : activité musculaire, contrôle postural, respiration, cinématique (mouvements) et temporalité. Deux phases du mouvement ont été examinées : la visée (bras de corde immobile jusqu'au lâcher) et le suivi (du lâcher à la descente du bras d'arc). La moyenne de toutes les flèches a été comparée aux 10 meilleurs et 10 moins bons scores. Par ailleurs, un "profil de tir" a été établi, mettant en évidence le pourcentage d'utilisation des différents groupes musculaires. Enfin, le profil de l'athlète a été comparé à celui du groupe pour mieux cerner les particularités et les points d'amélioration.

Légende utilisée

Muscles mesurés

EDS_C	Extenseur des doigts - coté corde
FDS_C	Fléchisseur des doigts - coté corde
DM_C	Deltoïde médian - côté corde
DP_C	Deltoïde postérieur - côté corde
TS_C	Trapèze supérieur - côté corde
TM_C	Trapèze médian - côté corde
EDS_A	Extenseur des doigts - coté arc
FDS_A	Fléchisseur des doigts - coté arc
DM_A	Deltoïde médian - côté arc
ES_A	Erecteur rachis - côté arc
ES_C	Erecteur rachis - côté corde
OE_A	Oblique externe - côté arc
OE_C	Oblique externe - côté corde
OI	Oblique interne

Respiration

Ampli	Amplitude du mouvement de respiration

Cinématique

Epaule	Angle moyen d'abduction de l'épaule coté corde
Coude	Angle moyen de flexion du coude coté corde

Contrôle postural

Sur	Surface du centre de pression
Amp X	Amplitude perpendiculaire au tir
Amp Y	Amplitude parallèle au tir
Vit Moy	Vitesse moyenne du centre de pression
Vit Moy X	Vitesse moyenne parallèle au tir
Vit Moy Y	Vitesse moyenne perpendiculaire au tir
	Vitesse maximale du centre de pression

Temporalité

Durée visée	Durée de la phase de visée
TR cli	Temps de réaction au clicker

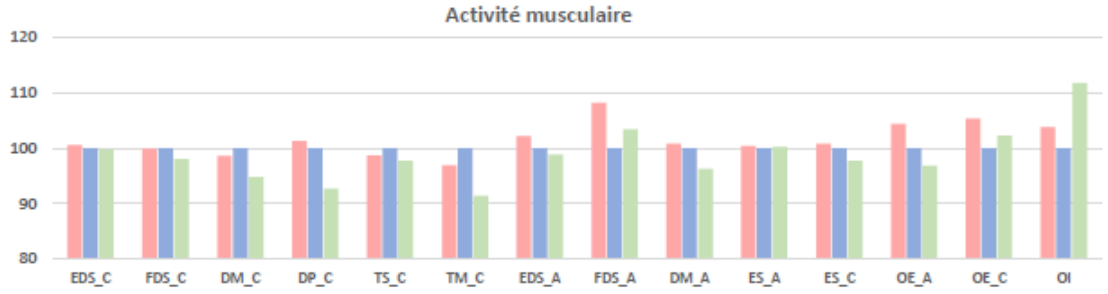
Légendes des graphiques

Moyenne bas-score — Moyenne individuelle — Moyenne haut-score

Moyenne des scores : Moyenne globale : 9,7 - Moyenne haute : 10,6 - Moyenne basse : 8,2

Analyse individuelle

Phase de visée



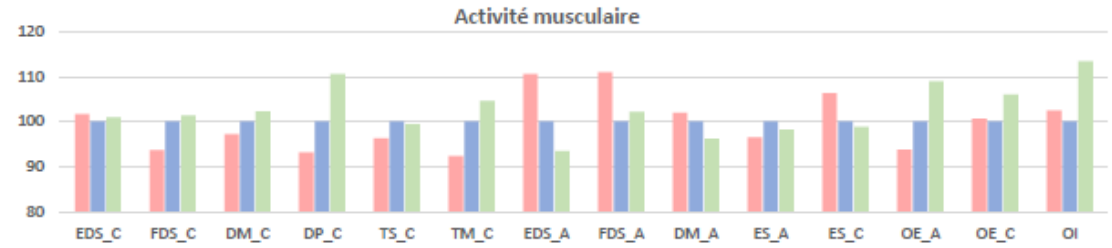
Commentaires : On remarque que globalement, un relâchement musculaire est la cause des meilleures performances, notamment pour les muscles deltoïde médian côté corde, deltoïde postérieur côté corde et trapèze médian côté corde.



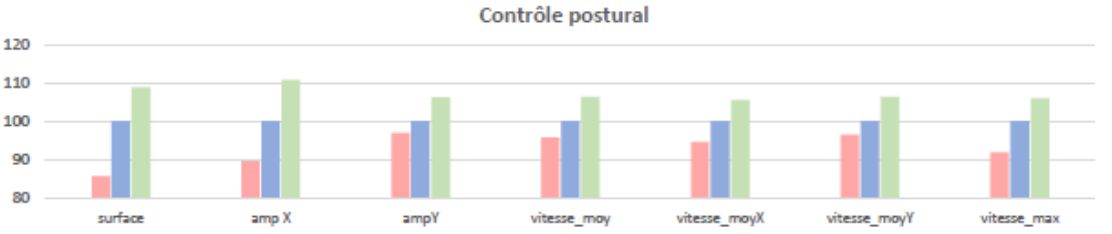
Commentaires : Pour le contrôle postural, la précision du contrôle postural, notamment dans l'axe perpendiculaire au tir, est fortement lié avec la performance de l'archer. Les autres variables ne présentant pas d'effets importants. Les mouvements du thorax liés a la respiration semblent également impacter la performance. Enfin, les mauvaises performances sont liées à des phases de visée plus longues.

Analyse individuelle

Phase de suivi



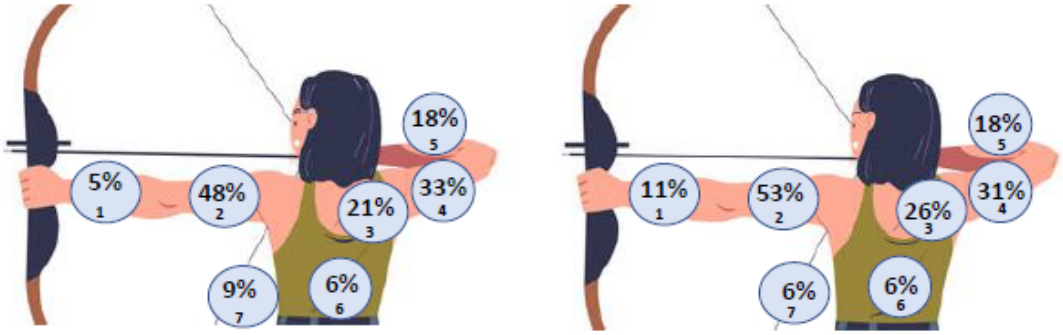
Commentaires : Lors de la phase de suivi, on remarque que les performances sont meilleures lorsque le deltoïde postérieur côté corde est plus activé. A l'inverse, une forte activité des muscles responsables de la préhension de l'arc semble entraîner de moins bonnes performances. Enfin, les meilleures performances sont reliées à une plus grande contraction des abdominaux.



Commentaires : Lors de la phase de suivi, l'ensemble des variables du contrôle postural sont reliées avec la performance. Plus ces variables sont élevées, plus les performances sont élevées. Mais ce résultat est contre-intuitif puisque des valeurs hautes traduisent un moins bon contrôle postural.

Profil musculaire de tir durant la phase de visée

Profil Individuel | **Profil moyen du groupe**



Le pourcentage d'activation musculaire est exprimé en pourcentage en fonction de la contraction volontaire maximale effectuée pour chaque muscle

1 Pourcentage d'activation musculaire moyen du fléchisseur et extenseur des doigts côté arc
2 Pourcentage d'activation musculaire du deltoïde médian côté arc
3 Pourcentage d'activation musculaire moyen du deltoïde postérieur, trapèze médian, trapèze supérieur côté corde
4 Pourcentage d'activation musculaire du deltoïde médian côté corde
5 Pourcentage d'activation musculaire moyen du fléchisseur et extenseur des doigts côté corde
6 Pourcentage d'activation musculaire moyen des érecteurs spinaux bilatéraux
7 Pourcentage d'activation musculaire moyen des obliques externes bilatéraux et oblique interne

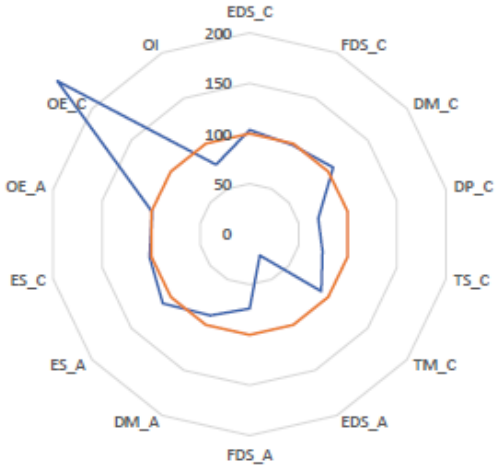
Commentaires : L'archer utilise moins son avant-bras d'arc et son bras d'arc que le groupe. Du côté du bras de corde, l'utilisation des muscles du bras et de l'avant-bras est relativement identique au groupe. L'archer utilise un peu moins les muscles de la ceinture scapulaire côté corde. Également, il utilise davantage ses abdominaux.

Analyse en fonction du groupe

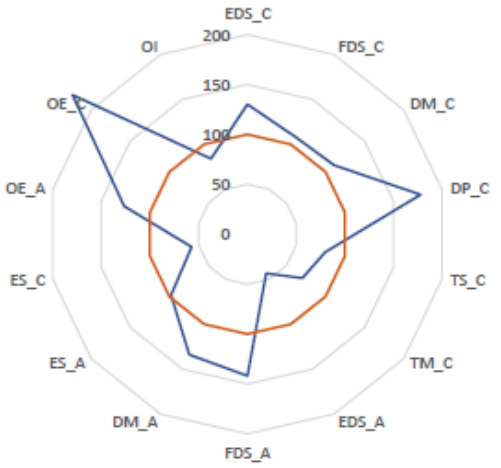
Légende des graphiques

Moyenne individuelle — Moyenne du groupe

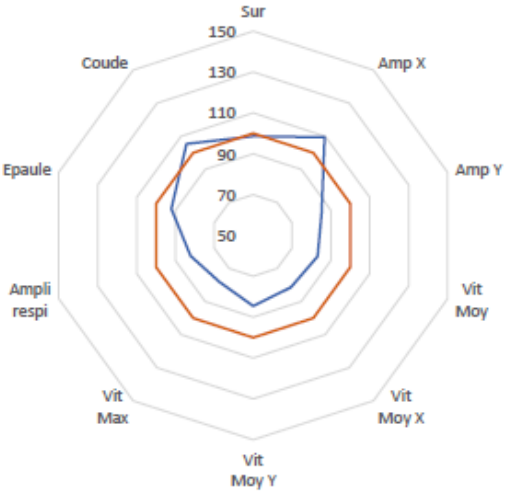
Activité musculaire - phase de visée



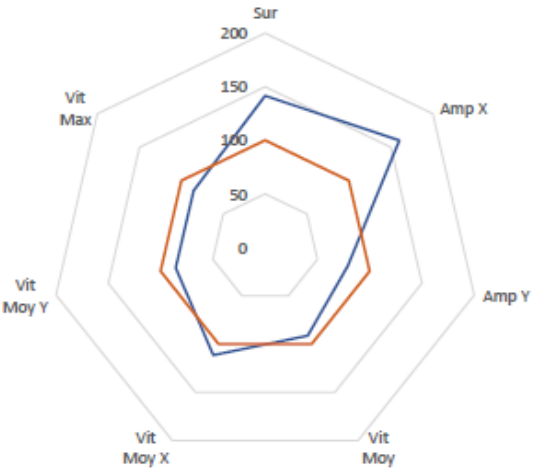
Activité musculaire - phase de suivi



Contrôle postural - Respiration - Cinématique
phase de visée



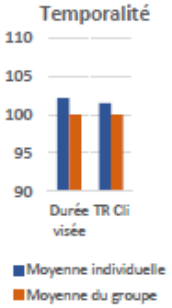
Contrôle postural
phase de suivi



Commentaires : Le profil musculaire de l'archer durant la phase de visée est semblable à celui du groupe, excepté pour le muscle oblique externe côté corde qui est davantage activé (244%), et pour le muscle extenseur des doigts côté arc et qui est beaucoup moins activé (23%). Lors de la phase de suivi, on retrouve les mêmes résultats pour ces deux muscles, avec en plus une plus grande utilisation des muscles fléchisseurs des doigts côté arc, deltoïde médian côté arc, et deltoïde postérieur côté corde. Le contrôle postural de l'archer lors de la phase de visée est dans l'ensemble meilleur que celui du groupe. La réduction des mouvements liés à la respiration est également meilleure que le groupe. Au niveau de la position de l'archer, l'angle d'abduction de l'épaule est plus petit que l'angle moyen du groupe, et l'angle de flexion du coude est plus grand que celui du groupe. Lors de la phase de suivi, les variables du contrôle postural sont identiques à celles du groupe, en dehors de la surface et de l'amplitude dans l'axe perpendiculaire au tir, ce qui traduit une précision du contrôle postural dans cet axe après le lâché de la flèche moins bonne que le groupe. Les variables temporelles ne sont pas très différentes de celles du groupe.

Commentaires généraux : Lors de la phase de visée, une piste d'amélioration serait de rechercher un relâchement musculaire plus important au niveau des muscles du bras et de la ceinture scapulaire côté corde. Également, la stabilité posturale dans l'axe perpendiculaire au tir lors de la phase de visée est très perfectible. Enfin, deux autres pistes d'amélioration semblent être la réduction de la durée de la phase de visée, ainsi que la réduction des mouvements issus de la respiration lors de cette phase, ces deux items étant sûrement liés.

Temporalité

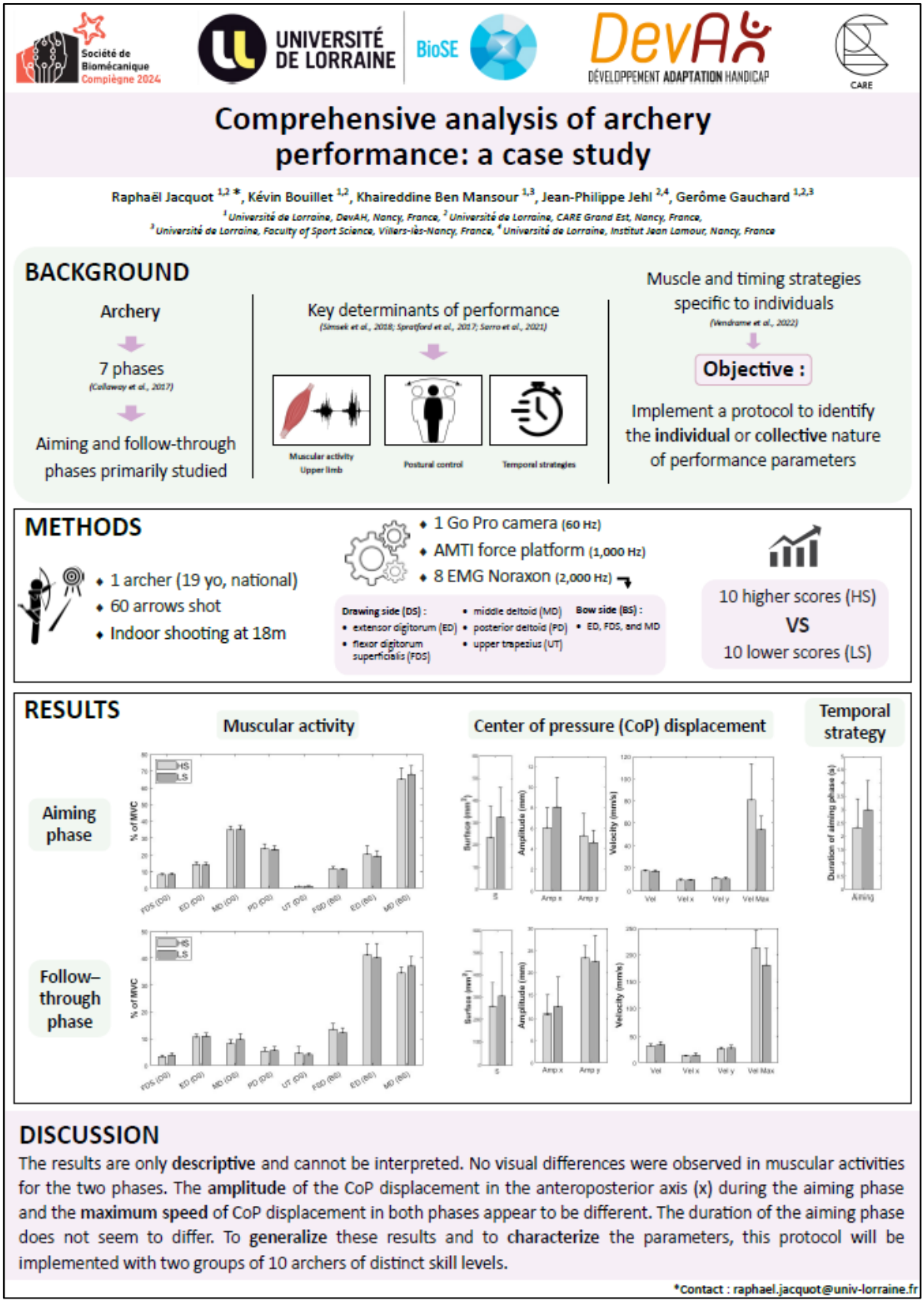


2. Valorisation de la thèse

2.1. Article publié dans Frontiers in Sports and Active Living

2.2. Acte de congrès

2.2.1. Congrès de la société de biomécanique (SB) – Compiègne (2024) – Présentation poster



2.2.2. Congrès de European College of Sport Science – Rimini – 2025 (poster)

30th Annual ECSS Congress Rimini/Italy, July 1-4 2025

Overall analysis of performance parameters in elite archers: focus on the aiming phase

Raphaël Jacquot 1,2 *, Kévin Bouillet 1,2, Khaireddine Ben Mansour 1,3, Jean-Philippe Jehl 2,4, Gerôme Gauchard 1,2,3

[1] Université de Lorraine, DevAH, Nancy, France, [2] Université de Lorraine, CARE Grand Est, Nancy, France, [3] Université de Lorraine, Faculty of Sport Science, Villers-lès-Nancy, France, [4] Université de Lorraine, Institut Jean Lamour, Nancy, France

BACKGROUND

Olympic archery demands precision, with the **aiming phase** being critical for **accuracy and control**. Performance is influenced by **neuromuscular activation, postural stability, drawing arm kinematics, and temporal strategies**, all of which differ significantly between elite and novice archers[1]. Unlike prior research that often examines these factors in isolation, our study **simultaneously assesses them**.

The aim is to provide a comprehensive view of their overall contribution to success at the elite level.

METHODS

Population
Eight high-level French archers (4 men, 4 women)

Median values of :
- 14 upper body and trunk muscles activity
- 7 parameters of center of pressure
- 3 kinematic parameters
- Aiming duration and clicker reaction time

Low scores (≤8) / Mid scores (9) / High scores (10)

MAIN FINDINGS

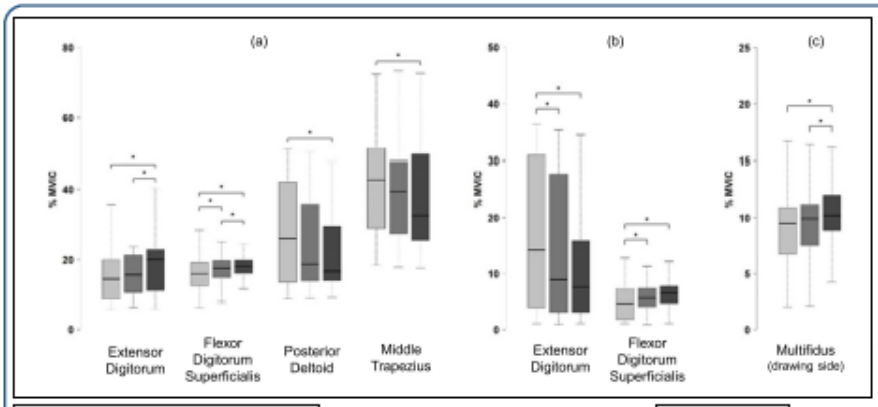


Figure 1 : Neuromuscular activity value across score level (left: low; center: mid; right: high) during the aiming phase: (a) drawing arm muscles, of the (b) bow arm muscles, of (c) core muscles * p<0.05

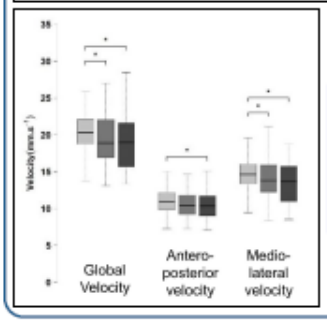


Figure 2 : Postural control variables across score levels (left: low; center: mid; right: high) during the aiming phase. * p<0.05

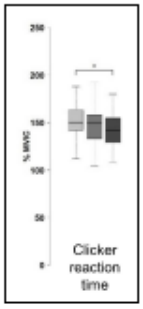


Figure 3 : Clicker reaction time across different performance score levels (left: low; center: mid; right: high) during the aiming phase. * p<0.05

CONCLUSION

We observed that higher performance in elite archers correlated with **lower activation** in certain drawing arm muscles (posterior deltoid, middle trapezius), suggesting **greater motor efficiency** at top levels.

Higher activation of forearm and multifidus showed a positive association with better scores, indicating **refined neuromuscular control and asymmetric trunk stability** are key.

Higher postural control, evidenced by lower center of pressure velocity during aiming, and a **shorter clicker reaction** time were consistently linked to higher scores, indicating their importance in elite archery.

REFERENCES

(1) Vendrame, Eleonora, Valeria Belluscio, Luigi Truppa, Lorenzo Rum, Aldo Lezich, Elena Bergamini, et Andrea Mannini. 2022. « Performance Assessment in Archery: A Systematic Review ». Sports Biomechanics, mars, 1-23. https://doi.org/10.1080/14763141.2022.2048057

*Contact : raphael.jacquot@univ-lorraine.fr

Résumé grand public

La performance en tir à l'arc dépend de nombreux éléments : comment les muscles travaillent, la stabilité du corps, la précision du mouvement et la rythmique utilisée. Les meilleurs archers ne sont pas seulement plus précis : ils répètent leur geste presque à l'identique à chaque flèche. Dans cette thèse, nous avons comparé des archers intermédiaires et élites. Les experts se démarquent par une meilleure stabilité, un effort musculaire plus efficace et un geste plus régulier. Nous avons aussi montré que, même parmi les archers de niveau élite, chacun utilise une stratégie propre. Être expert, c'est donc allier régularité et individualisation technique.

Public abstract

Archery performance depends on many factors: how the muscles work, body stability, movement precision, and rhythm. The best archers are not only more accurate: they repeat their movements almost identically with each arrow. In this thesis, we compared intermediate and elite archers. The experts stood out for their greater stability, more efficient muscular effort, and more consistent movements. We also showed that even among elite archers, each one uses their own strategy. Being an expert therefore means combining consistency with technical individualization.