



HAL
open science

Analyse biomécanique du mouvement du cavalier de dressage dans un but de dimensionnement d'un système de mesure des critères de performance

Florian Duval

► **To cite this version:**

Florian Duval. Analyse biomécanique du mouvement du cavalier de dressage dans un but de dimensionnement d'un système de mesure des critères de performance. Sciences du Vivant [q-bio]. 2017. dumas-01640324

HAL Id: dumas-01640324

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01640324>

Submitted on 12 Feb 2018

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



UNIVERSITE RENNES 2 – HAUTE BRETAGNE

UFR Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Master 2 – Mouvement Sport Santé

**ANALYSE BIOMECANIQUE DU MOUVEMENT
DU CAVALIER DE DRESSAGE DANS UN BUT
DE DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME DE MESURE
DES CRITERES DE PERFORMANCE.**

Mémoire présenté par :

Florian DUVAL

Tuteur professionnel : Franck MULTON

Tuteur universitaire : Richard KULPA

Année universitaire : 2016 – 2017



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Franck MULTON pour son encadrement, son implication et sa pédagogie tout au long de mon stage.

Je souhaiterais remercier Anthony SOREL pour son implication et ses explications d'utilisation de l'outil informatique.

Merci à Coline RUAL pour son aide constante sur la mise en place du protocole, pour la compréhension et pour mon insertion dans ce projet.

Merci à Armel CRETUAL pour son apport statistique à cette étude.

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION.....	7
II.	CONTEXTE CAVAL&TIC	8
III.	REVUE DE LITTERATURE	9
A.	Les systèmes de mesures existants	9
B.	La performance en équitation	11
1.	La posture : point clef de la performance	11
2.	Les discriminants pertinents de la posture du cavalier	15
3.	Prévention des blessures	22
IV.	SYNTHESE ET OBJECTIFS	24
V.	MATERIEL ET METHODES	25
A.	Sujets	25
B.	Environnement.....	25
C.	Matériel.....	27
D.	Design expérimental	28
1.	Exercices	28
2.	Reconstruction en trois dimensions	29
3.	Méthode	30
4.	Analyses statistiques	32
VI.	RESULTATS	33
A.	Oscillations verticales.....	33
B.	Diagrammes position / position.....	34
C.	Inclinaison du tronc	35
VII.	DISCUSSION	37
A.	Mouvements du bassin	37
B.	Inclinaison du tronc	38

C. Limites	39
VIII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	41
IX. BIBLIOGRAPHIE	42
X. RESUMES	45
XI. ANNEXES	46

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Différences de postures inter-niveau au pas (Schils et coll. 1993), (De gauche à droite : Débutant, Intermédiaire et Confirmé).....	11
Figure 2: Plans de phase de l'angulation du tronc par rapport au dos du cheval entre un cavalier pro et un apprenant au trot de travail (Peham et coll., 2001), (Vitesse angulaire en fonction de l'angle : ligne 1 et accélération angulaire en fonction de la vitesse angulaire : ligne 2).....	13
Figure 3: Asymétrie de la rotation externe de la hanche gauche : experts à gauche et novices à droite (Gandy et coll., 2014).	14
Figure 4: Graphes des accélérations verticales du cavalier et du cheval au pas, trot assis, trot enlevé et galop (Wolframm et coll., 2013), (Accélérations verticales en ordonnée et temps en abscisse, cavalier en vert et cheval en rouge).....	15
Figure 5: Diagramme position / position de la rotation du pelvis et du tronc des deux groupes de cavaliers au trot (Münz et coll., 2013).....	16
Figure 6: Plans de phase de la rotation du pelvis et du tronc des deux groupes de cavaliers au pas (Münz et coll., 2013).....	17
Figure 7: Antéversion et rétroversion du bassin VS posture normale.	18
Figure 8: Rotation de la tête, tronc, et pelvis au trot assis (Byström et coll., 2009).	18
Figure 9: Mouvements du pelvis en lien avec le mouvement du sternum du cheval (Münz et coll., 2012).....	19
Figure 10: Modification de la position du cavalier avec le niveau d'expertise au trot assis (Schils et coll., 1993).....	20
Figure 11: Variations de la posture du cavalier en fonction de la variation de vitesse intra-allure (Byström et coll., 2015).....	21
Figure 12: Schéma de la disposition du manège vue du dessus.....	26

Figure 13: Photo du manège.	26
Figure 14: Schéma du positionnement des marqueurs anatomiques.....	27
Figure 15: Range of Motion pour le cheval.	29
Figure 16: Avant et après reconstruction sous Blade.....	29
Figure 17: Oscillations verticales du marqueur de l'antérieur gauche avant et après filtrage.	30
Figure 18: Oscillations verticales du tronc, du bassin et de la selle sur un cycle de trot assis des experts (gauche) et des novices (droite).	33
Figure 19: Oscillations verticales normalisées par la moyenne sur un cycle de trot assis des experts (gauche) et des novices (droite).	33
Figure 20: Diagrammes position / position au trot assis de chaque expert (gauche) et novice (droite).	34
Figure 21: Code sous matlab pour trouver les pics verticaux de l'antérieur gauche du cheval.	46
Figure 22: Code sous matlab pour définir les cycles de chaque exercice.	46
Figure 23: Code sous matlab pour définir les coefficients directeurs et dispersions autour des droites de régression.	46
Figure 24: Diagramme position / position du trot enlevé sur le diagonal droit des experts (gauche) et novices (droite).	47
Figure 25: Diagramme position / position du trot enlevé sur le diagonal gauche des experts (gauche) et novices (droite).	47
Figure 26: Diagramme position / position du trot assis des experts (gauche) et novices (droite).	47
Figure 27: Diagramme position / position de la transition trot/pas des experts (gauche) et novices (droite).	48
Figure 28: Diagramme position / position de la transition pas/trot des experts (gauche) et novices (droite).	48
Figure 29: Diagramme position / position de l'épaule en dedans à droite des experts (gauche) et novices (droite).	48
Figure 30: Diagramme position / position de l'épaule en dedans à gauche des experts (gauche) et novices (droite).	49
Tableau 1: Différences de rotation du bassin et du tronc entre les pros et apprenants sur l'axe antéropostérieur et latéral (Münz et coll., 2016).	12

Tableau 2: Différences angulaires entre les cavaliers expérimentés et débutants, pré et post entraînement (Kang et coll., 2010).....	21
Tableau 3: Pics de force constatés sur le dos du cheval entre les différentes positions du cavalier (De Cocq et coll., 2010).	22
Tableau 4: Incidence des douleurs dans la région lombaire en fonction du type de selle (Quinn et coll., 1996).....	23
Tableau 5: Coefficients directeurs moyens par exercice.....	34
Tableau 6: Dispersions moyennes par exercice.....	35
Tableau 7: Angles moyens du tronc par exercice.....	35
Tableau 8: Variations moyennes de l'angle du tronc.....	36

I. INTRODUCTION

La fédération française d'équitation est la troisième fédération française en termes de nombre de licenciés. En effet, elle compte 613 484 licenciés derrière le foot et le tennis. La problématique gravitant autour de la pratique de cette activité physique concerne l'image et la représentation que les gens en ont.

Comme toute autre activité physique, l'équitation présente un volet destiné au loisir (ballades) mais également un volet orienté vers la performance et la compétition. D'ores et déjà, l'image que décrit ce sport ne permet pas aux pratiquants de s'inscrire dans cet objectif de performance et de compétition ; or ce volet occupe une partie prépondérante dans la pratique de l'équitation.

Les néo-pratiquants assimilent l'équitation à une activité ne nécessitant pas de contraintes physiques fortes. Or 50% de ces néo-pratiquants arrêteront la pratique après leur première année (Grefe et coll., 2012). Il y a donc une inadéquation entre la vision du sport hippique et la pratique en elle-même. De plus, 83% des pratiquants sont féminins et 69% des pratiquants ont moins de 20 ans (FFE). La performance doit être remise au centre de la pratique afin d'éviter à cette fédération de perdre des licenciés.

La performance envahit de plus en plus notre quotidien privé ou professionnel par l'apparition des nouvelles technologies. En effet, de plus en plus se développent les trackeurs d'activité, les montres GPS pour la course à pied ... Le monde équestre tente d'apporter cette technologie au cœur de la pratique avec des systèmes de mesures des paramètres physiologiques équins tels que la fréquence cardiaque ou bien de mesurer l'activité quotidienne de son équidé.

La lacune émergente concerne la capacité de la nouvelle technologie à recentrer la performance sur le cavalier et non le cheval. A ce jour, aucun système ne permet de monitorer la performance du cavalier durant sa séance au regard des paramètres identifiés comme pertinents par les pratiquants experts.

II. CONTEXTE CAVAL&TIC

Le projet Caval&Tic a pour objectif de remettre la performance du cavalier au centre de la pratique de l'équitation.

Pour se faire, il est nécessaire de catégoriser la performance du cavalier par des variables objectives et quantifiables. Le dimensionnement d'un système de mesure pour la performance du cavalier en utilisant la nouvelle technologie semble être pertinent pour permettre aux apprenants de s'intéresser à la pratique. Ce système devra répondre à des contraintes pratiques : ne pas occasionner de gêne pour le pratiquant, être pertinent, s'inclure dans une situation réelle de pratique et rendre des feedbacks pour le pratiquant et l'entraîneur véritablement utiles.

Ce projet est financé par l'Institut Français du Cheval et de l'Equitation (IFCE) et réunit deux laboratoires :

- Laboratoire LEGO (marketing) de l'Université de Bretagne Sud
- Laboratoire M2S de l'Université Rennes 2

Afin de dimensionner un système de mesure pour le pratiquant, il est primordial de répondre aux deux problématiques suivantes :

- Quel système de mesure semble le plus pertinent pour capturer le mouvement et pour l'analyser avec un degré de précision et transcriptible sur le terrain ?
- Quelles sont les variables que la littérature scientifique identifie comme pertinentes pour définir la performance du cavalier ?

III. REVUE DE LITTERATURE

Dans un premier temps, quel système de mesure nous permettra de capturer et d'analyser le mouvement du cavalier et de son cheval au cours du temps, et pourra-t-il être réutilisé sur le terrain par le pratiquant et l'entraîneur ?

A. Les systèmes de mesures existants

A ce jour, pour capturer un mouvement, les systèmes de mesure sont variés. L'accent est porté sur deux grands systèmes qui sont : les systèmes optoélectroniques et les centrales inertielles.

Les systèmes de capture de mouvement optoélectroniques sont composés de caméras qui permettent l'émission et la réception de rayons infra-rouges. Les rayons produits sont réfléchis par des marqueurs placés sur le sujet à étudier. Ils sont fixés de telle sorte que le mouvement ne soit pas influencé par ces marqueurs. Les fréquences d'acquisition ainsi que les résolutions des caméras dépendent des modèles et des marques employés mais varient de 30 à 500 Hz et de 4 à 12 mégapixels. La figure 1 est une des caméras de la marque VICON, modèle MX-40. A partir des marqueurs, une reconstruction sur ordinateur permet de retrouver le mouvement effectué par le sujet et d'analyser les paramètres cinématiques pertinents au cours du temps pour l'étude considérée. Ce type de système est utilisé par Alexander et coll. (2014) pour capturer le mouvement du cavalier de dressage et analyser leurs postures au cours du temps.

Richards et coll. (1999) comparent différents systèmes de capture de mouvement optoélectroniques suivant 5 critères dont la précision du système.

Les deux systèmes majoritairement utilisés qui sont Qualysis et Vicon, présentent une précision supérieure aux cinq autres systèmes étudiés.

Ces deux systèmes présentent une précision de mesure de 0,198 cm pour le Qualysis et de 0,183 cm pour le système Vicon. Les centrales inertielles sont de petits boîtiers dans lesquels sont regroupés un accéléromètre, un magnétomètre et un gyroscope.

L'accéléromètre permet d'obtenir les accélérations du boîtier sur chaque axe des trois dimensions au cours du temps. Le magnétomètre émet un champ magnétique et permet de situer les centrales inertielles les unes par rapport aux autres dans l'espace et au cours du temps. Le gyroscope permet d'obtenir les rotations des boîtiers au cours du temps. Eckardt et coll., Gandy et coll., et Münz et coll. (2014) utilisent la combinaison XSENS MVN pour effectuer leur capture de mouvement. Cette combinaison est équipée de 17 centrales inertielles fixées à des points clés du corps.

Ces deux et non exhaustifs systèmes de mesure présentent tous deux des avantages et inconvénients qui sont résumés dans le tableau suivant :

SYSTEME	AVANTAGES	INCONVENIENTS
<i>SYSTEME OPTOELECTRONIQUE</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Précision importante - Environnement intérieur ou extérieur - Espace de travail important 	<ul style="list-style-type: none"> - Environnement sans infra-rouges - Coûteux - Post-processing long - Calibration
<i>CENTRALES INERTIELLES</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Simple d'utilisation - Précision - Environnement extérieur et intérieur - Pas de caméras - Liberté de mouvement - Post-processing rapide - Moins coûteux que le système optoélectronique 	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptation du sujet à la combinaison - Moins précis - Bruit de mesure supérieur

Les centrales inertielles semblent être le système de mesure le plus pertinent pour répondre au mieux aux attentes de notre projet de dimensionnement.

En effet, le système de mesure final devra être embarqué par le sujet, apporter des informations d'une précision nécessaire à la différenciation entre un sujet expert et un sujet novice et ne devra pas solliciter un post-processing chronophage.

Dans un deuxième temps, quelles sont les variables identifiées par la littérature scientifique comme étant des critères de la performance en équitation, aisément mesurables ? Dans la suite de ce mémoire, nous utiliserons le terme posture afin de décrire la succession de postures statiques au cours du mouvement du cavalier.

B. La performance en équitation

Comme dans toutes les disciplines sportives, la performance du cavalier à proprement parlé est multifactorielle. Douglas et coll (2012), le montre en la déclinant sur différents volets : la morphologie, l'importance des filières énergétiques et l'aspect biomécanique. L'aspect biomécanique correspond au projet Caval&Tic.

1. La posture : point clef de la performance

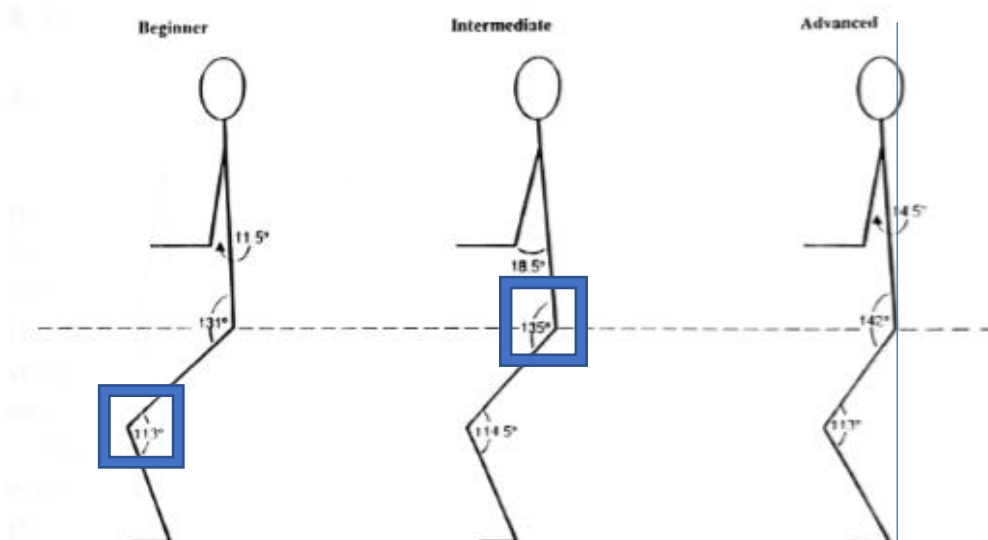


Figure 1 : Différences de postures inter-niveau au pas (Schils et coll. 1993), (De gauche à droite : Débutant, Intermédiaire et Confirmé).

L'augmentation du niveau du cavalier apporte de réelles modifications sur la posture. Schils et coll. (1993) cherchent à discriminer les cavaliers sur des exercices. Ils montrent que sur trois niveaux d'expertise (novice, intermédiaire et avancé), des différences sont constatées au niveau des angles articulaires des épaules, hanches, genoux, tronc et bras peu importe l'allure. Les angles à la hanche et au genou augmentent avec le niveau d'expertise, sur tous les exercices comme le montre la figure 1. L'association de ces deux augmentations angulaires chez l'expert VS chez le novice permet à l'articulation de la cheville se rapprocher de l'axe vertical du tronc.

Dans le même sens, Münz et coll. (2016) se focalisent sur les mouvements de deux paramètres spécifiques de la posture générale du cavalier : le bassin et le tronc. Ils comparent un groupe de cavaliers professionnels et un groupe de cavaliers apprenants.

Sur les paramètres cinématiques de rotation de ces deux segments au cours du temps, on observe des différences significatives sur l'axe antéropostérieur sur l'exercice du pas.

		Anterior-posterior rotation (AP)		Lateral rotation (LT)	
		BEG	PRO	BEG	PRO
Pelvis (rider)	MAX	18.1 ± 18.8	8 ± 11.8	3.6 ± 2.1	3.1 ± 3.7
	MIN	8.3 ± 10.4	-3.1 ± 10.3	-0.8 ± 2.4	-2.2 ± 3.7
	ROM			4.4 ± 1	5.3 ± 1.2
Trunk (horse)	MAX	3.6 ± 3.3	6.2 ± 1.1	3.4 ± 1.5	3 ± 0.8
	MIN	-3 ± 1.7	-4.8 ± 1.1	-2.9 ± 1.1	-3.2 ± 0.7
	ROM	8.6 ± 2.9	11 ± 2.2	6.3 ± 1.9	6.2 ± 1.4

Tableau 1: Différences de rotation du bassin et du tronc entre les pros et apprenants sur l'axe antéropostérieur et latéral (Münz et coll., 2016).

Le tableau 1 montre que les amplitudes minimales de rotation du pelvis sont significatives entre le groupe de débutants et le groupe de professionnels. Les amplitudes maximales de rotation du tronc sont significatives entre les deux groupes et signifie que le buste des débutants a une amplitude de mouvement plus faible que celle des professionnels.

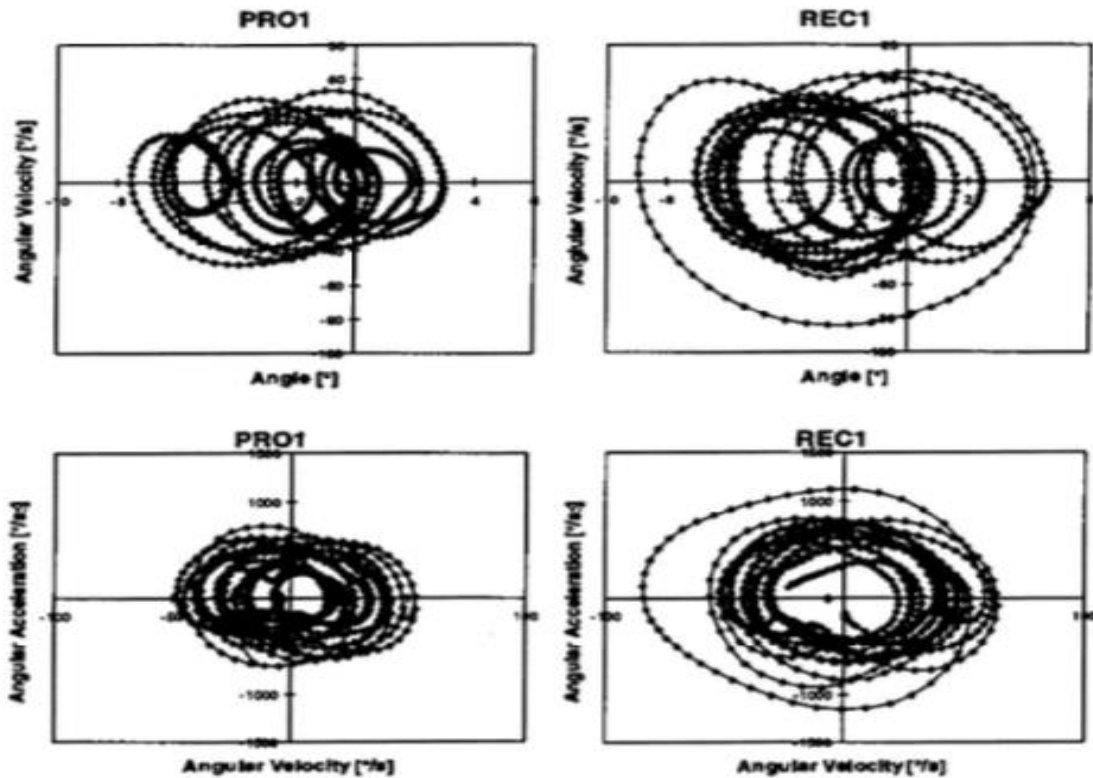


Figure 2: Plans de phase de l'angulation du tronc par rapport au dos du cheval entre un cavalier pro et un apprenant au trot de travail (Peham et coll., 2001), (Vitesse angulaire en fonction de l'angle : ligne 1 et accélération angulaire en fonction de la vitesse angulaire : ligne 2).

Les plans de phase permettent de visualiser les mouvements des segments tronc et bassin sur le même graphique en fonction du temps. Peham et coll. (2001) ont tracé les vitesses angulaires en fonction des variations angulaires et les accélérations angulaires en fonction des variations angulaires pour un groupe professionnel (PRO) et un groupe débutant (REC). La figure 2 montre les différences angulaires des mouvements des cavaliers professionnels et des cavaliers débutants. Les amplitudes des deux plans de phase du groupe professionnel est moins importante que celles tracées pour le groupe débutant.

Cela signifie que les variations angulaires du cavalier professionnel sont moins importantes que les variations angulaires des cavaliers débutants au cours d'un mouvement. Par conséquent, ce paramètre répond à la question des critères de performance du projet Caval&Tic.

D'autres variations angulaires sont investiguées par Byström et coll. (2009) sur le trot. Ces variations concernent l'asymétrie du cavalier sur son cheval.

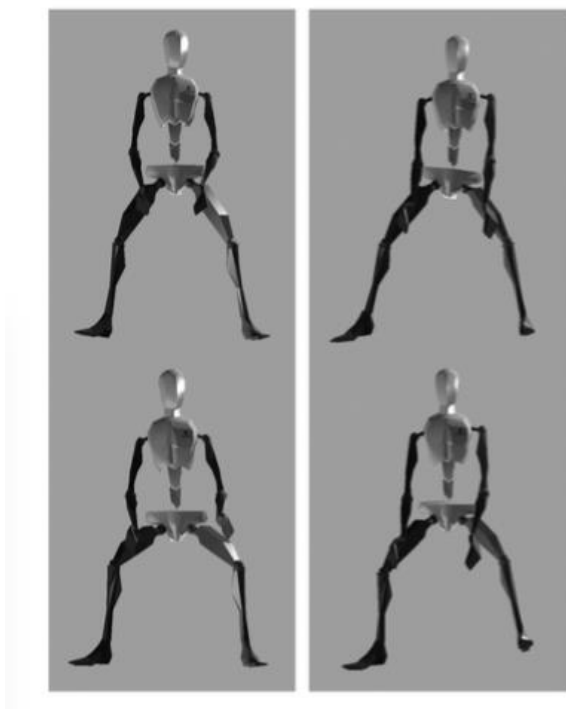


Figure 3 : Asymétrie de la rotation externe de la hanche gauche : experts à gauche et novices à droite (Gandy et coll., 2014).

Dans le même sens, Gandy et coll. (2014) montrent qu'il existe une différence d'amplitude dans la rotation de la hanche du cavalier entre le côté gauche et droit. En rapport avec notre problématique, il semblerait intéressant de mesurer cette différence de rotation externe de hanche. La figure 3 montre la différence de rotations externes de hanche entre des cavaliers experts sur la gauche de la figure et des cavaliers novices sur la droite de la figure.

Alexander et coll. (2014) montre que cette différence d'amplitude de rotation externe de hanche peut être retrouvée dans l'ensemble du corps du cavalier. En effet, ils observent que cette différence résulte d'une asymétrie globale (corps entier) et qu'elle peut être partiellement compensée par la pose d'un bandage spécifique sur la ceinture scapulaire.

Notre problématique est de dimensionner un système de mesure de variables synonymes de performance chez le cavalier. Par conséquent, il serait intéressant de pouvoir se focaliser sur trois variables de cette posture, précédemment décrites, qui sont les différences angulaires du mouvement du cavalier professionnel et novice, le mouvement du tronc et l'asymétrie de hanche.

2. Les discriminants pertinents de la posture du cavalier

La littérature scientifique identifie deux variables clefs de la posture du cavalier.

a) La région pelvienne

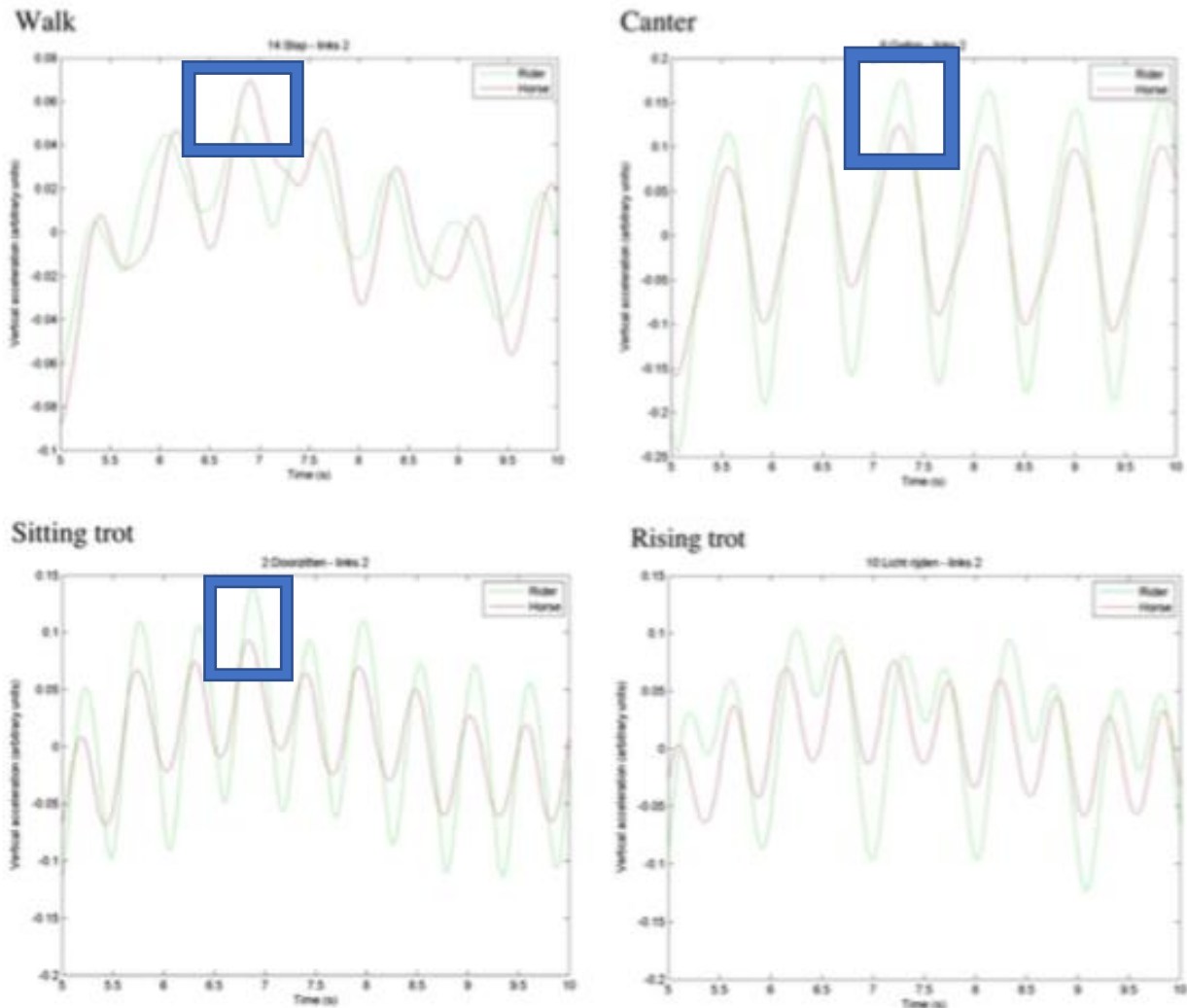


Figure 4: Graphes des accélérations verticales du cavalier et du cheval au pas, trot assis, trot enlevé et galop (Wolfram et coll., 2013), (Accélérations verticales en ordonnée et temps en abscisse, cavalier en vert et cheval en rouge).

Wolfram et coll. (2013) étudient la coordination entre le pratiquant et sa monture. Cette notion de coordination est la source du lien entre le cheval et son cavalier. Le poids du cavalier et ses actions ont des répercussions sur le dos du cheval. En effet, en fonction de l'exercice effectué et du niveau d'expertise, les forces appliquées sur le dos du cheval diffèrent. La figure 4 décrit l'évolution des pics de force verticale appliquée sur le dos du cheval. Cette mesure est effectuée sur quatre exercices différents (pas, trot enlevé, trot assis, galop).

Les auteurs montrent qu'il existe une répétition des pics de force sur le dos du cheval. Le dos du cheval est le lieu du lien entre l'homme et l'animal. Chez l'homme, le bassin fait la connexion. Le point de liaison entre les deux entités est la région pelvienne. Ce lien cheval / cavalier par le bassin précise le critère de performance associé au pelvis pour notre projet.

Dans le même sens, Münz et coll. (2013) ont réussi à discriminer les niveaux d'expertise de deux groupes de cavaliers en analysant les diagrammes angle du bassin / angle du tronc.

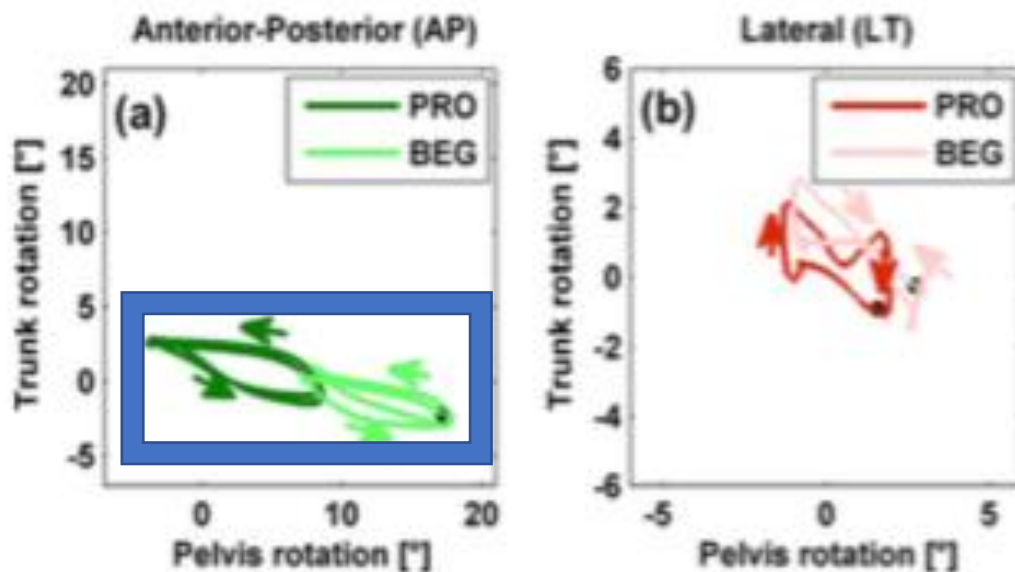


Figure 5 : Diagramme position / position de la rotation du pelvis et du tronc des deux groupes de cavaliers au trot (Münz et coll., 2013).

Ils montrent une différence sur les diagrammes position / position entre l'amplitude du mouvement des cavaliers professionnels et l'amplitude des cavaliers débutants. Les plans de phase représentatifs des mouvements des cavaliers professionnels montrent une amplitude plus importante, au pas et au trot. La figure 5 montre qu'au trot, la relation entre la rotation du tronc et la rotation du pelvis est plus étendue chez les cavaliers experts que chez les novices. Dans le même temps, la figure 6 confirme cette observation pour l'exercice du pas.

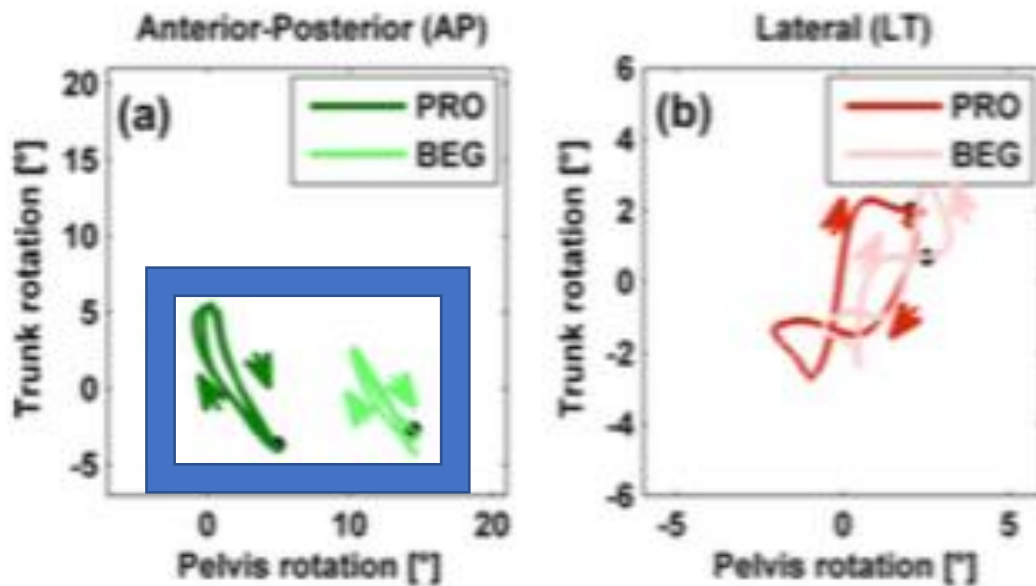


Figure 6 : Plans de phase de la rotation du pelvis et du tronc des deux groupes de cavaliers au pas (Münz et coll., 2013).

Ces deux figures permettent de déduire que les amplitudes des mouvements du bassin en relation avec ceux du tronc sont un élément clef pour répondre à notre problématique d'identification des critères de performance.

Greve et coll. (2012) introduisent le fait que le niveau d'expertise d'un cavalier par rapport à un autre sera discriminé par une synchronisation accrue du mouvement du cavalier et de celui du cheval. Ils montrent ainsi que l'augmentation de l'aire du plan de phase tracé par la rotation du tronc sur l'axe antéro-postérieur en fonction de la rotation du pelvis sur ce même axe permet de différencier deux niveaux d'expertise.

La rotation du tronc sur l'axe antéro-postérieur est visualisable par l'augmentation ou la réduction de l'angle à la hanche, explicité par Schils et coll. (1993). La rotation du pelvis sur cet axe est appelée antéversion ou rétroversion, comme le montre la figure 7. L'antéversion consiste en un basculement des épines iliaques antéro-supérieures vers l'avant. En opposition, la rétroversion consiste un basculement des épines iliaques antéro-supérieurs vers l'arrière.

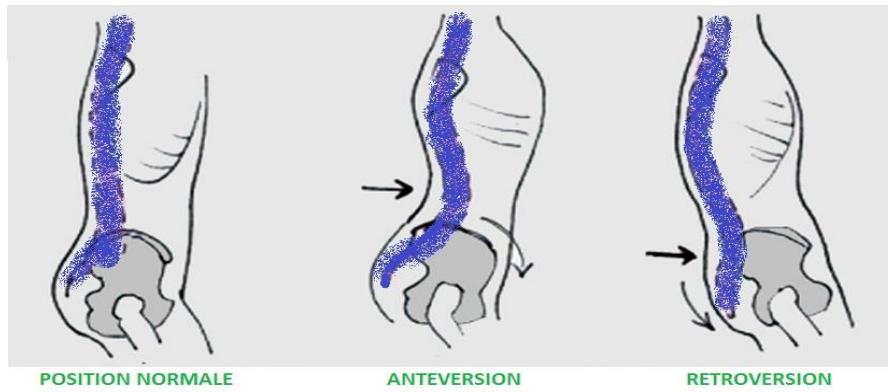


Figure 7: Antéversion et rétroversion du bassin VS posture normale.

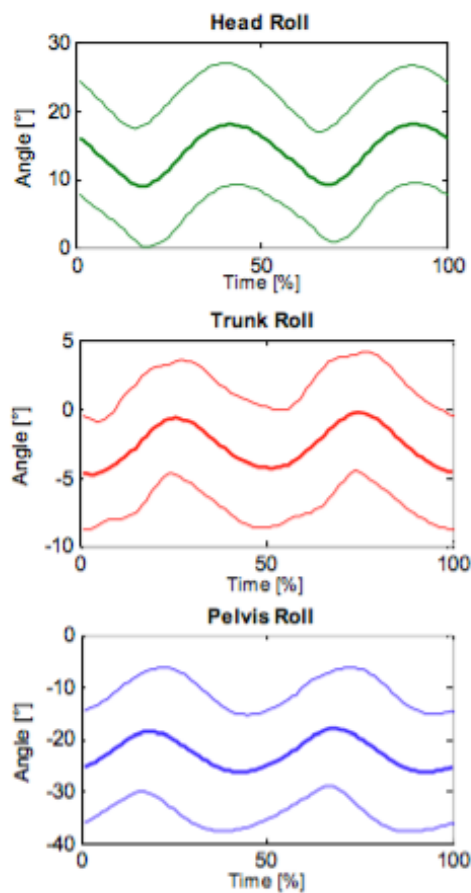


Figure 8: Rotation de la tête, tronc, et pelvis au trot assis (Byström et coll., 2009).

Eckardt et coll. (2014) montrent que la rotation pelvienne est majoritairement postérieure sur la globalité du cycle. En effet, la rotation du pelvis démarre par une phase d'antéversion puis de rétroversion. Cette phase a une durée supérieure à la phase précédente. Ceci montre que le mouvement pelvien du cavalier est majoritairement d'arrière en avant. Byström et coll. (2009) sur la figure 8, confirment l'hypothèse précédente.

Cette alternance d'antéversion et de rétroversion du bassin du cavalier est une variable observable pour la performance du cavalier et pourrait être quantifiée par un système de mesure simple et facile d'utilisation. Lagarde et coll. (2005) confirme la discrimination du niveau d'expertise par le niveau de coordination entre le bassin et le mouvement de la selle.

Pour continuer sur les mouvements du bassin, Münz et coll. (2012) mettent en évidence des inversions de phases entre les pics de rotation du pelvis humain et ceux du sternum du cheval. On constate que cette inversion de phases est commune aux quatre exercices effectués par les cavaliers.

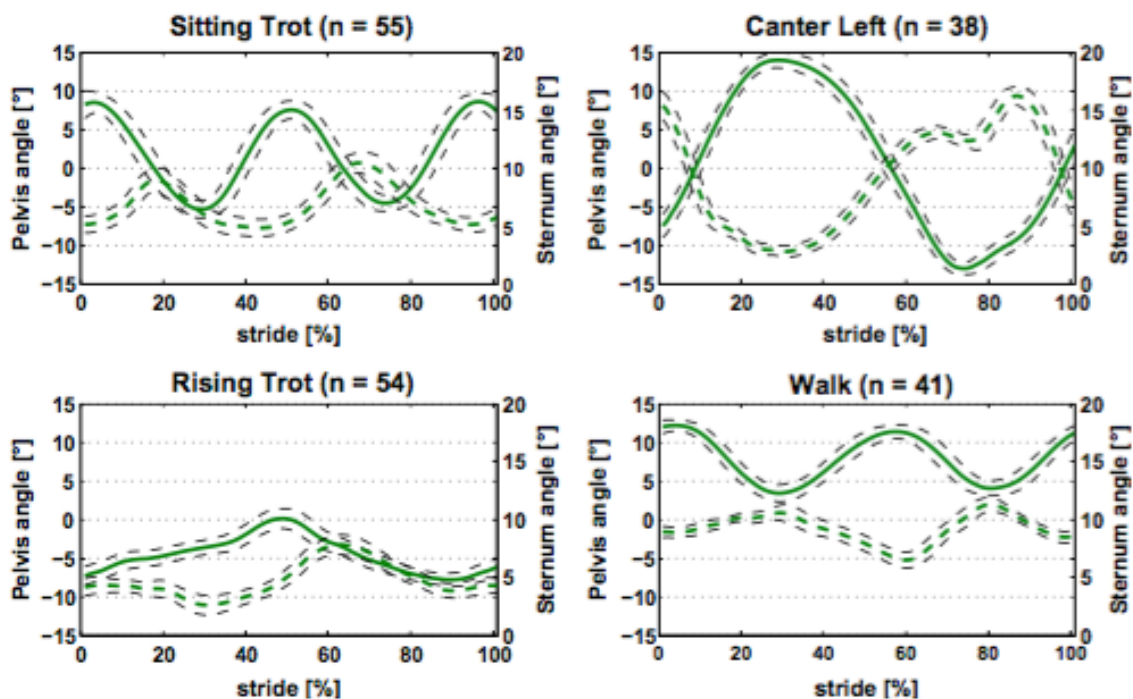


Figure 9: Mouvements du pelvis en lien avec le mouvement du sternum du cheval (Münz et coll., 2012).

La figure 9 montrent nettement ces inversions de phase entre les deux mouvements du bassin du cavalier et du sternum du cheval. Par extrapolation, on peut émettre l'hypothèse que ces inversions de phases pourraient être observées entre le mouvement du bassin du cavalier et le mouvement de la selle puisqu'elle est posée sur le dos du cheval. Ces mouvements confirment l'hypothèse que la région pelvienne est un point clef de la posture du cavalier pour la performance.

b) *La région thoraco-lombaire*

Le deuxième paramètre clef, de la posture, identifié comme pertinent par la littérature est la région thoraco-lombaire. Elle s'étend de l'articulation entre C7 et C8 et descend jusqu'à l'articulation entre le pelvis et L5. Pour simplifier, nous noterons cette partie comme le tronc.

La composante intéressante de ce segment est sa rotation autour de l'axe médio-latéral traduite par une inclinaison vers l'avant ou vers l'arrière. Schils et coll. (1993) montrent que l'angle entre l'axe vertical associé au tronc et l'axe vertical associé au repère du monde tend à se réduire avec l'augmentation du niveau d'expertise. Le tronc des experts est donc plus proche de la verticale que celui des débutants comme le montre la figure 10.

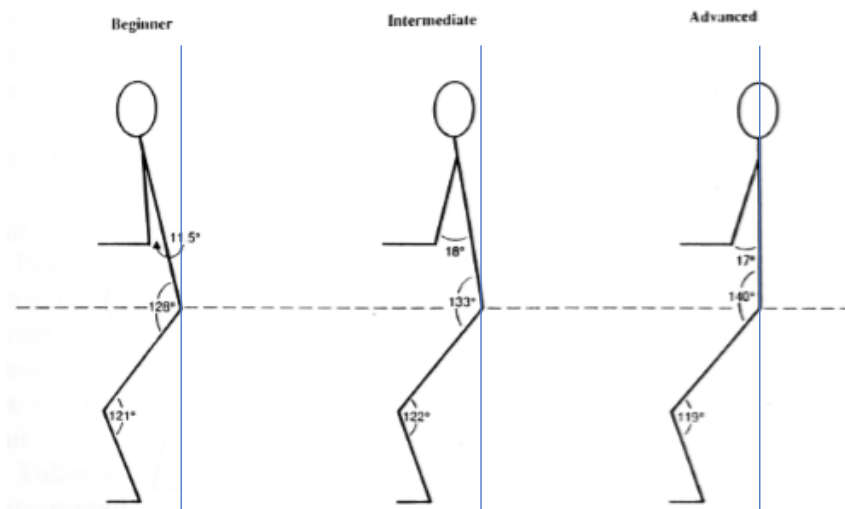


Figure 10: Modification de la position du cavalier avec le niveau d'expertise au trot assis (Schils et coll., 1993).

Dans même, Byström et coll. (2015) montrent des différences angulaires intra-individuelles en fonction des vitesses. La figure 11 présente les modifications de l'angle entre le pelvis et le tronc en fonction de la modification de la vitesse. Un exercice est présenté avec des vitesses qui augmentent (dans le sens fig a puis fig b). Chaque posture est comparée à une posture de référence en pointillée mesurée à l'arrêt. On observe que l'angle entre les deux segments tend à diminuer avec la réduction de vitesse et tend à augmenter la prise de vitesse.

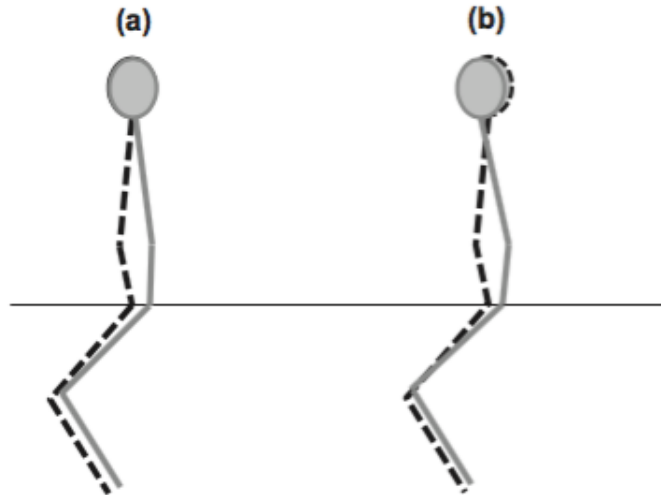


Figure 11: Variations de la posture du cavalier en fonction de la variation de vitesse intra-allure (Byström et coll., 2015).

Kang et coll. (2010) observent une diminution non significative de l'angle entre la verticale et le tronc. En effet, ils constatent eux aussi que l'augmentation du niveau d'expertise tend à réduire la rotation antéro-postérieure du tronc. Le tableau 2 montre qu'une différence entre l'angle mesuré avant et après entraînement tend à diminuer chez les cavaliers novices. En effet, après un protocole d'entraînement de 24 semaines (période 2), les valeurs de l'angle entre la verticale et le tronc des débutants tendent à se réduire.

	Advanced rider	Beginner		Significance
		Period 1	Period 2	
Elbow	158.7 ^a ± 2.3 ^A	135.3 ^b ± 10.5	135.4 ^b ± 13.3	***
Shoulder	15.5 ^a ± 1.0	19.0 ^b ± 4.0	18.7 ^b ± 3.7	*
Hip	125.4 ^a ± 6.3	120.6 ^a ± 9.4	114.0 ^b ± 10.6	**
Knee	117.3 ^a ± 6.6	126.2 ^b ± 13.2	117.4 ^a ± 8.6	**
Ankle	83.0 ^a ± 5.3	94.1 ^b ± 8.9	98.7 ^c ± 6.1	***
Front-Rear angle	-3.40 ^a ± 4.30	0.42 ^a ± 6.20	-0.94 ^a ± 6.96	NS
Left-right angle	-8.59 ± 1.11	-8.03 ± 3.99	-6.39 ± 2.74	NS

Tableau 2: Différences angulaires entre les cavaliers expérimentés et débutants, pré et post entraînement (Kang et coll., 2010).

La mesure de l'angle entre le tronc et l'axe vertical associé au repère du monde est une variable pertinente pour mesurer la performance du cavalier.

La littérature scientifique a permis d'identifier plusieurs points clef de la performance en équitation en lien avec la posture du cavalier sur sa monture.

Deux variables sont quantifiables et aisément mesurables : la rotation du bassin et l'inclinaison du tronc par rapport à l'axe vertical.

Toutefois, il serait intéressant de savoir si ces deux variables ont un impact sur l'intégrité physique du cavalier et de sa monture. En effet, dans toutes les activités physiques, l'augmentation du niveau d'expertise entraîne des risques traumatologiques croissants. La question soulevée est donc de savoir si l'augmentation du niveau d'expertise du cavalier par un mouvement du bassin accru et par une diminution de l'angle du tronc par rapport à la verticale pouvait être à l'origine d'une prévention de blessures humaine et équine ?

3. Prévention des blessures

Variables	Horse 1	Horse 2	p value
Peak vertical force 1 rising trot	2.32 ± 0.16	2.69 ± 0.28	} 0.008**
Peak vertical force 1 sitting trot	2.69 ± 0.13	3.09 ± 0.26	
Peak vertical force 2 rising trot	1.62 ± 0.24	2.19 ± 0.13	} < 0.001**
Peak vertical force 2 sitting trot	2.73 ± 0.06	3.38 ± 0.26	
Peak forward force 1 sitting trot	0.27 ± 0.12	0.68 ± 0.16	} 0.080
Peak forward force 2 rising trot	0.31 ± 0.05	0.57 ± 0.11	} 0.001**
Peak forward force 2 sitting trot	0.51 ± 0.13	0.79 ± 0.14	
Peak backward force 1 rising trot	-0.13 ± 0.09	-0.32 ± 0.09	} 0.009**
Peak backward force 1 sitting trot	-0.39 ± 0.14	-0.65 ± 0.16	
Peak backward force 2 rising trot	-0.55 ± 0.04	-0.78 ± 0.21	} 0.001**
Peak backward force 2 sitting trot	-0.49 ± 0.22	-0.67 ± 0.24	

Tableau 3: Pics de force constatés sur le dos du cheval entre les différentes positions du cavalier (De Cocq et coll., 2010).

Dans un premier temps, des pathologies dorsales chez le cheval peuvent être constatées en lien avec une posture inadaptée du cavalier. De Cocq et coll. (2010, 2012) comparent la posture pendant un trot assis (tout le temps assis dans la selle) à celle du trot enlevé (assis dans la selle une fois sur deux). Chacune de ces postures engendrera un pic de force verticale sur le dos du cheval. Ce pic de force est dû au poids du cavalier qui s'exercera sur le dos du cheval au moment du contact entre le bassin du cavalier et le dos du cheval. Le tableau 3 montre que les pics de force verticale sont significativement plus importants au trot assis par rapport au trot enlevé. La répétition de ces pics pourrait amener des pathologies dorsales. En lien avec la posture du cavalier, un mouvement du bassin accentué et qui suit parfaitement le mouvement de dos du cheval semblerait être un moyen d'atténuer l'impact de ces pics de force.

Peham et coll. (2009) comparent la posture du cavalier au trot assis, au trot enlevé et la posture debout sans jamais s’asseoir dans la selle. Ils montraient que les forces exercées sur le dos du cheval étaient plus importantes au trot assis par rapport au trot enlevé. Ils montraient également que les forces appliquées étaient supérieures au trot assis par rapport à une posture debout.

Les pathologies équinés peuvent par conséquent être amplifiées voire créées par la posture qu’adopte le cavalier sur sa monture. Maintenant, il est probable que cette posture inadaptée engendre des pathologies dorsales humaines.

Dans ce sens, Quinn et coll. (1996) montrent l’influence de la posture sur le développement de pathologies de la région lombaire chez le cavalier. Deux groupes étaient constitués. Le premier groupe montait les chevaux avec une selle type western (W) qui accroît la rétroversion du bassin du cavalier et rétablit la lordose naturelle de la région lombaire.

	<i>GP</i>			<i>W</i>		
	<i>Males</i>	<i>Females</i>	<i>Total</i>	<i>Males</i>	<i>Females</i>	<i>Total</i>
LBP	8	34	42 (66%)	1	9	10 (23%)
No LBP	9	13	22 (34%)	15	18	33 (77%)
Total	17	47	64	16	27	43

Tableau 4 : Incidence des douleurs dans la région lombaire en fonction du type de selle (Quinn et coll., 1996).

Le deuxième groupe montait les chevaux avec une selle type standard (GP) qui permet un mouvement beaucoup plus libre du bassin en permettant l’alternance entre l’antéversion et la rétroversion. Le tableau 4 montre que la prévalence des blessures de la région lombaire était supérieure pour le groupe de cavalier qui montait avec une selle de type standard.

La posture du pratiquant sur le cheval représente donc un enjeu dans sa performance mais également dans le maintien de son intégrité physique et de celle de son cheval. La posture du cavalier est une source de questionnement des moniteurs notamment dans son apprentissage. Il est important de remettre la posture du cavalier au centre de l’apprentissage afin de permettre au pratiquant de progresser tout en étant performant.

IV. SYNTHÈSE ET OBJECTIFS

Le projet Caval&Tic a pour objectif de remettre la performance du cavalier au centre le pratique. Pour cela, l'aide de la nouvelle technologie semble être une piste intéressante et prometteuse.

Comme nous l'avons vu, la performance peut être définie par deux grandes variables : la mobilité du bassin et l'inclinaison du tronc. La mobilité du bassin est mesurable par la rotation autour de l'axe médio-latéral entraînant un basculement sur l'axe antéro-postérieur, défini comme antéversion ou rétroversion du bassin. L'inclinaison du tronc est mesurable par la rotation du segment tronc autour de l'axe médio-latéral. Plus précisément, elle s'obtient en mesurant l'angle entre l'axe vertical attaché au repère du tronc et l'axe vertical attaché au repère du monde.

En se basant sur ces variables à mesurer, il nous reste à définir leur sensibilité pour estimer la performance du sujet. Plus la variable est sensible à la performance, plus elle saura significativement distinguer deux populations proches. Cette sensibilité a un impact immédiat sur le type de système de mesure qui introduit une part de bruit et, donc, peut compromettre la mesure de performance.

Pour étudier cette sensibilité, nous proposons donc d'effectuer une étude cinématique complète du mouvement du cavalier au regard de celui du cheval. L'objectif est d'étudier la sensibilité des variables identifiées comme pertinentes par la littérature par rapport à des populations de niveau d'expertise proches

V. MATERIEL ET METHODES

A. Sujets

L'échantillon de cavaliers utilisé pour le projet Caval&Tic est composé de 17 pratiquants divisés en deux groupes : le groupe « expert » est constitué de 7 écuyers instructeurs du Cadre Noir de Saumur, ayant une pratique quotidienne. Le groupe « novice » est constitué de 10 cavaliers entrant au Cadre Noir en première année, pratiquant l'équitation minimum deux fois par semaine. Si les différences observées entre ces deux populations proches sont quantifiables par les variables de la littérature, cela permettra d'envisager leur utilisation pour des populations de niveaux plus éloignés.

Un des biais de cette étude concerne le choix du cheval pour chaque pratiquant. En effet, la posture du cavalier est influencée par le comportement du cheval et réciproquement. Les comportements des deux protagonistes sont dépendants et le comportement du cheval apporte donc un biais dans l'étude centrée sur le cavalier. Un des moyens pour limiter ce biais est d'associer un même cheval à un couple de cavaliers expert-novice. Huit binômes étaient ainsi formés, avec un cavalier « novice » et un cavalier « expert ». Un seul binôme était composé de deux cavaliers « novices ». Les chevaux utilisés ont tous été formés au Cadre Noir par les écuyers et travaillent tous les jours dans l'objectif de présentation de reprises de dressage et étaient attribués par tirage au sort.

B. Environnement

Les expérimentations ont été effectuées dans un des manèges du Cadre Noir de Saumur de 20*40 mètres dont les ouvertures ont été occultées afin de réduire au maximum les perturbations lumineuses du soleil. La longueur des diagonales effectuées était de 18 mètres pour une zone de capture de 12 mètres de diagonale. La figure 12 représente un schéma de la disposition du manège.

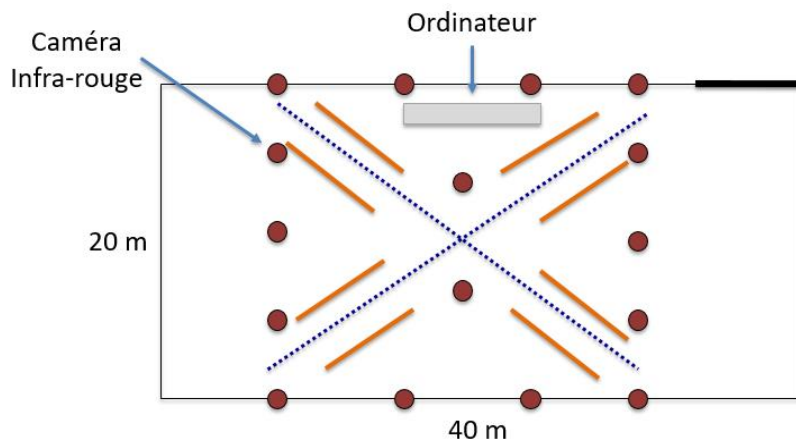


Figure 12: Schéma de la disposition du manège vue du dessus.

Les diagonales effectuées par les cavaliers étant liées, la figure effectuée réellement est appelée une huit de chiffre en dressage. Elle consiste à décrire un 8 comprenant deux diagonales, un virage à droite et un virage à gauche. Tout cela dans un souci de symétrie. La figure 13 montre la disposition réelle dans le manège aménagé.

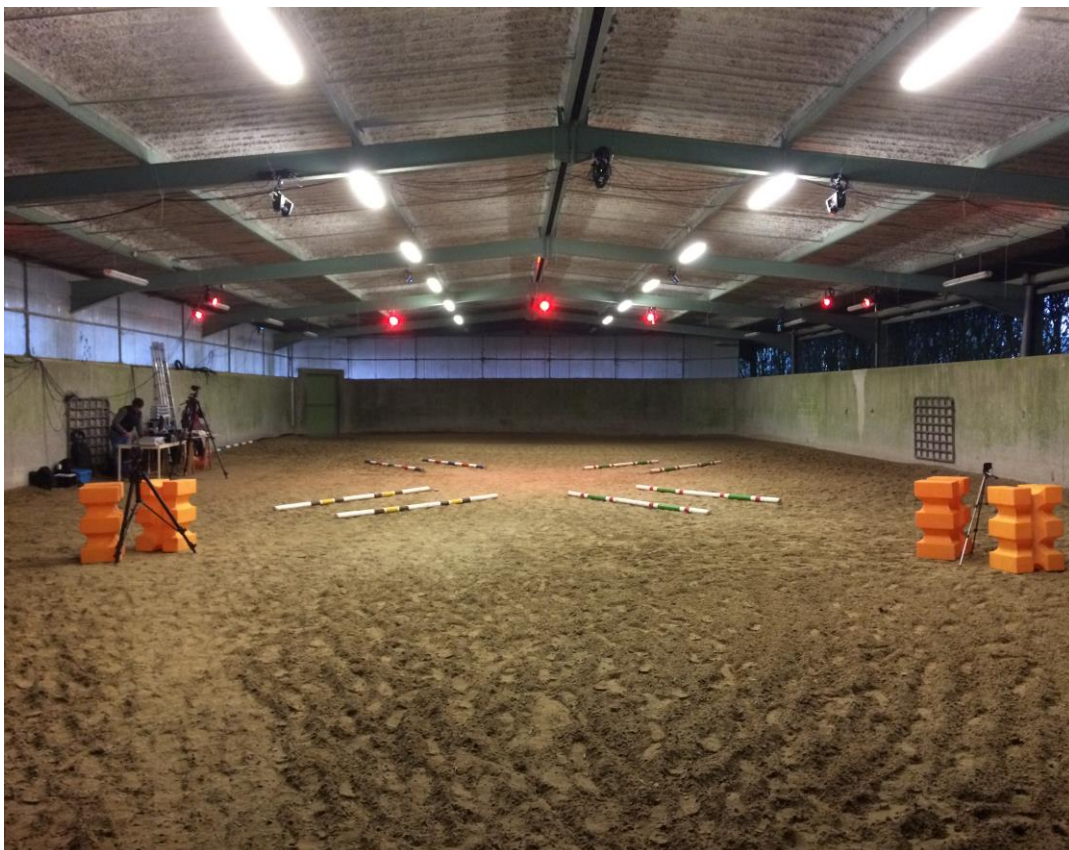


Figure 13: Photo du manège.

C. Matériel

Le système utilisé pour capturer le mouvement était le VICON composé 18 caméras infrarouges. Chaque cavalier portait 43 marqueurs positionnés sur des repères anatomiques recommandés par l'International Society of Biomechanic (WU et coll., 2002, 2005) (figure 14). 18 marqueurs étaient positionnés sur le cheval afin de pouvoir identifier les différents segments corporels nécessaires aux calculs d'angle, et pour repérer le cycle de locomotion. Les marqueurs présents sur le cheval nous permettent d'identifier la tête, les épaules, la selle, les hanches, les antérieurs (jambes avants) du cheval, afin d'avoir une représentation partielle de son mouvement au cours de l'exercice. La fréquence d'acquisition était de 120 Hz. De plus, des caméras normales ont été ajoutées autour du manège afin de filmer dans le visible les différents exercices.

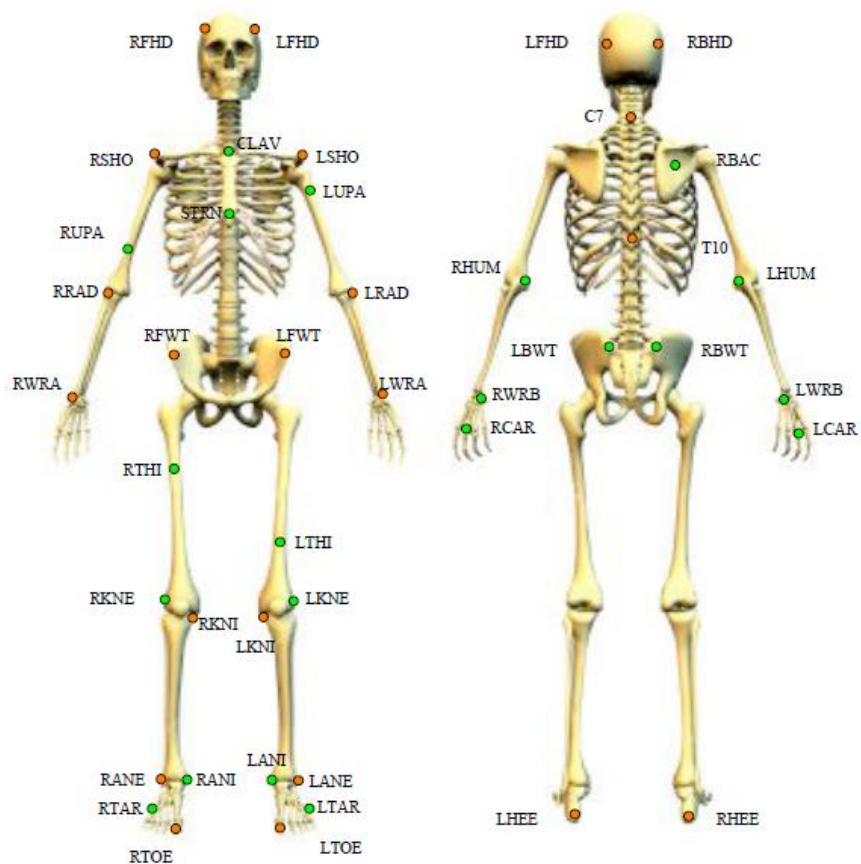


Figure 14: Schéma du positionnement des marqueurs anatomiques.

Les caméras infra-rouges étaient disposées de telle sorte que chaque marqueur soit constamment visible par au moins trois caméras.

D. Design expérimental

1. Exercices

Les cavaliers effectuaient 6 exercices sur une diagonale de manège en tournant à gauche et en tournant à droite. Ces exercices de dressage sont :

- Le pas, allure basculée marchée à quatre temps : le cavalier est constamment assis dans la selle
- Le trot assis, allure sautée non basculée dissymétrique à deux temps plus un temps de projection : le cavalier est constamment assis dans la selle
- Le trot enlevé sur les deux côtés, allure sautée non basculée dissymétrique à deux temps plus un temps de projection : le cavalier est assis dans la selle un temps sur deux soit sur le diagonal droit ou gauche (association entre l'antérieur d'un côté et le postérieur opposé)
- La transition descendante trot/pas, réduction de l'allure du cheval : le cavalier doit être assis dans la selle
- La transition ascendante pas/trot, augmentation de la vitesse du cheval : le cavalier doit être assis dans la selle
- L'épaule en dedans, figure de dressage réalisée au trot, qui consiste à placer les épaules du cheval en dedans de la piste (matérialisée par la diagonale) : le cavalier est constamment assis dans la selle

Les 6 exercices étaient randomisés et exécutés 8 fois par l'ensemble des cavaliers. Aucune autre consigne sur l'attitude du cheval ou bien du cavalier n'était exprimée. Ceci représente 48 essais par cavalier. Une fois équipé de marqueurs, chaque cavalier devait effectuer une série de mouvements isolant chaque articulation afin de calibrer le squelette du système Vicon (« range of motion »).

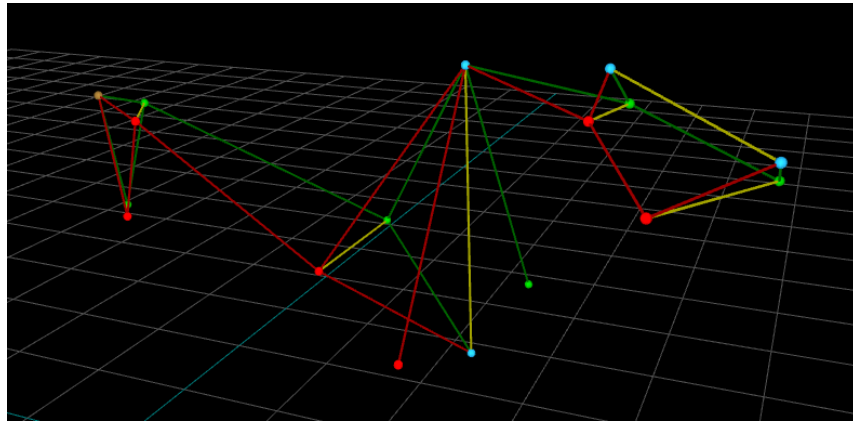


Figure 15: Range of Motion pour le cheval.

Pour le cheval (figure 15), cette phase a été simplifiée, en faisant simplement tourner le cheval autour du cavalier qui le tenait. Ceci nous a permis de créer un squelette virtuel propre à chaque cheval pour la reconstruction en trois dimensions.

2. Reconstruction en trois dimensions

Nous avons utilisé le logiciel Blade version 3.4.1 afin de pouvoir reconstruire les squelettes des cavaliers et des chevaux à partir des vues des différentes caméras. A partir des fichiers capturés, nous avons labélisé les 43 marqueurs présents sur le cavalier ainsi que les 18 présents sur le cheval. Pour chaque exercice de chaque sujet, la reconstruction des fichiers était effectuée suivant une procédure établie pour le projet Caval&Tic.

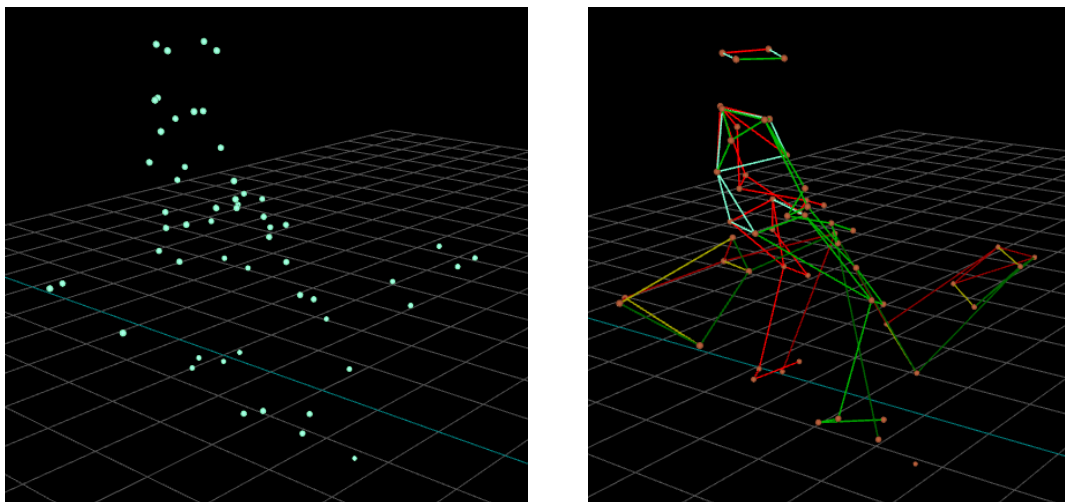


Figure 16: Avant et après reconstruction sous Blade.

La figure 16 montre les données brutes récupérées par les caméras du système optoélectronique (gauche) et les données reconstruites après le traitement sous le logiciel de reconstruction (droite).

3. Méthode

La durée de chaque fichier enregistré était différente, en lien avec la vitesse du cheval et le nombre de cycles visibles. Nous avons donc ramené chaque séquence sur une même échelle de temps, exprimée en pourcentage d'un cycle de locomotion. Nous avons utilisé le marqueur placé sur l'antérieur gauche du cheval (jambe avant gauche) pour débiter le début et la fin de chaque cycle de locomotion.

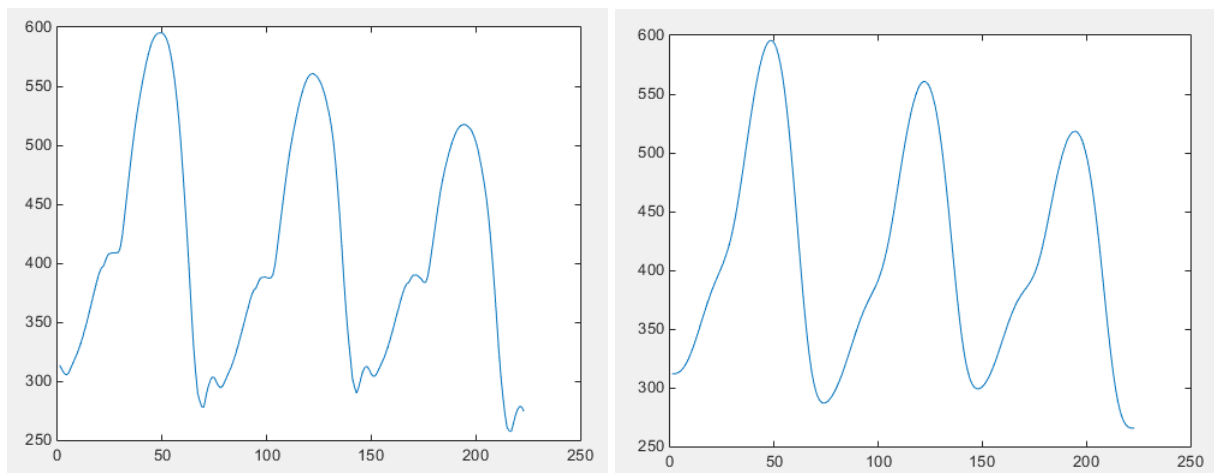


Figure 17: Oscillations verticales du marqueur de l'antérieur gauche avant et après filtrage.

Le tracé des oscillations verticales de ce marqueur présentait un bruit de mesure et des oscillations arrivaient parfois au contact au sol, ce qui rendait la détection des cycles complexe. Pour compenser cela, nous avons filtré les données brutes avec un filtre passe-bas à très basse fréquence, afin d'obtenir une courbe exploitable pour détecter les débuts et fin de cycles. Pour synchroniser les cycles, nous nous sommes basés sur la succession de pics bas du tracé de l'antérieur gauche, correspondants à un posé.

Une fois les cycles identifiés, nous pouvons effectuer les analyses sur la coordination entre les mouvements du bassin du cavalier et ceux du cheval : dans un premier temps, nous nous focalisons sur la coordination des oscillations verticales des différentes parties du corps du cavalier et du cheval.

Afin d'obtenir ces oscillations verticales, nous avons déterminé un point représentatif pour chaque segment corporel :

$$z_{\text{Bassin}} = (z_{\text{LFWT}} + z_{\text{LBWT}} + z_{\text{RFTW}} + z_{\text{RBWT}}) / 4$$

$$z_{\text{Tronc}} = (z_{\text{CLAV}} + z_{\text{C7}} + z_{\text{T10}} + z_{\text{STRN}}) / 4$$

$$z_{\text{Selle}} = (z_{\text{FSEAT}} + z_{\text{USEAT}} + z_{\text{LSEAT}} + z_{\text{RSEAT}}) / 4$$

Où z_{LFWT} représente la coordonnée verticale du marqueur LFWT (épine iliaque antérieure à gauche). Les noms des autres marqueurs utilisés dans ces formules sont indiqués en figure 14).

A partir de ces coordonnées verticales, nous avons également calculé les diagrammes angle-angle des segments les uns par rapport aux autres. Pour analyser ces diagrammes nous avons modélisé l'éparpillement des données (nuage de points) par une ellipse englobante. Les paramètres de l'ellipse sont : le coefficient de la droite portant l'ellipse (obtenu par la droite de régression passant au plus près du nuage de points), et l'éparpillement des points autour de cette droite. La droite était obtenue sous Matlab grâce à la fonction polyfit qui permet d'obtenir les coefficients directeurs a et ordonnées à l'origine b de l'équation de la droite : $y = ax + b$.

La dispersion des points autour de la droite était donnée par le double de l'écart-type des distances séparant chaque point de la droite de régression.

Afin de mesurer l'inclinaison du tronc au cours du cycle, nous avons effectué un produit scalaire entre le vecteur z du repère attaché au monde de coordonnées $(0,0,1)$ et le vecteur vertical du repère attaché au tronc. Ceci implique l'hypothèse que le mouvement est principalement antéro-postérieur.

Pour chacun des trois segments, nous avons attaché un repère suivant les recommandations de l'ISB (Wu et coll., 2002, 2005). A partir de ces repères, nous avons pu mesurer les rotations 3D des segments les uns par rapport aux autres grâce aux calculs de matrices de rotations :

$$M_{\text{bassin} \rightarrow \text{monde}} * P_{\text{bassin}} = P_{\text{monde}}$$

$$M_{\text{selle} \rightarrow \text{monde}} * P_{\text{selle}} = P_{\text{monde}}$$

$$M_{\text{bassin} \rightarrow \text{selle}} * P_{\text{bassin}} = P_{\text{selle}}$$

$$D'où : M_{\text{bassin} \rightarrow \text{selle}} = {}^t M_{\text{selle} \rightarrow \text{monde}} * M_{\text{bassin} \rightarrow \text{mond}}$$

Où $M_{\text{bassin} \rightarrow \text{monde}} * P_{\text{bassin}} = P_{\text{monde}}$ se traduit par : un point du bassin multiplié par la matrice de rotation du bassin vers le monde donne un point dans le monde. La matrice du tronc vers le bassin est calculée avec la même méthode. A partir de ces matrices de rotations, il est possible de déduire les angles de rotation en 3D (angles d'Euler) θ_x , θ_y et θ_z .

4. Analyses statistiques

L'objectif du projet Caval&Tic est de dimensionner un système de mesure permettant de mesurer les paramètres de performance en équitation et d'effectuer un retour au pratiquant et à son entraîneur. Ce système de mesure doit permettre au cavalier de remettre sa performance physique au centre de son entraînement et de sa pratique quotidienne ou hebdomadaire.

Le critère de performance identifié par la littérature est la posture du cavalier. Ce critère permet de discriminer un cavalier de niveau débutant et un cavalier de niveau expert peu importe l'exercice que le pratiquant effectue.

Il se décline en deux variables qui sont la rotation du bassin au cours d'un cycle et les variations d'inclinaison du tronc vers l'avant. Tous deux relèvent d'une synchronisation verticale avec le mouvement du cheval.

Les mesures de ces deux variables donnent deux composantes qui sont le coefficient directeur de la droite de régression associée au plan de phase tracé entre les oscillations verticales du bassin, du tronc et de la selle ; et la dispersion de l'ellipse correspondante autour de cette droite.

Par conséquent, une ANOVA à deux voies semblait être le plus approprié pour permettre de comparer nos deux populations : la première voie étant le niveau d'expertise (Expert VS Novice) et la deuxième voie étant le plan de phase le plus pertinent (Tronc/Selle VS Tronc/Bassin, Tronc/ Bassin VS Bassin/Selle et Tronc/Bassin VS Bassin/Selle). Le test post-hoc le plus adéquat était le test de Bonferroni avec une puissance accrue avec un nombre de comparaison faible, ici six, avec un seuil de significativité fixé à 5% ($p < 0,05$).

Pour les variations d'inclinaison du tronc, un T-Test non apparié avec un seuil de significativité de 5% a été utilisé.

VI. RESULTATS

A. Oscillations verticales

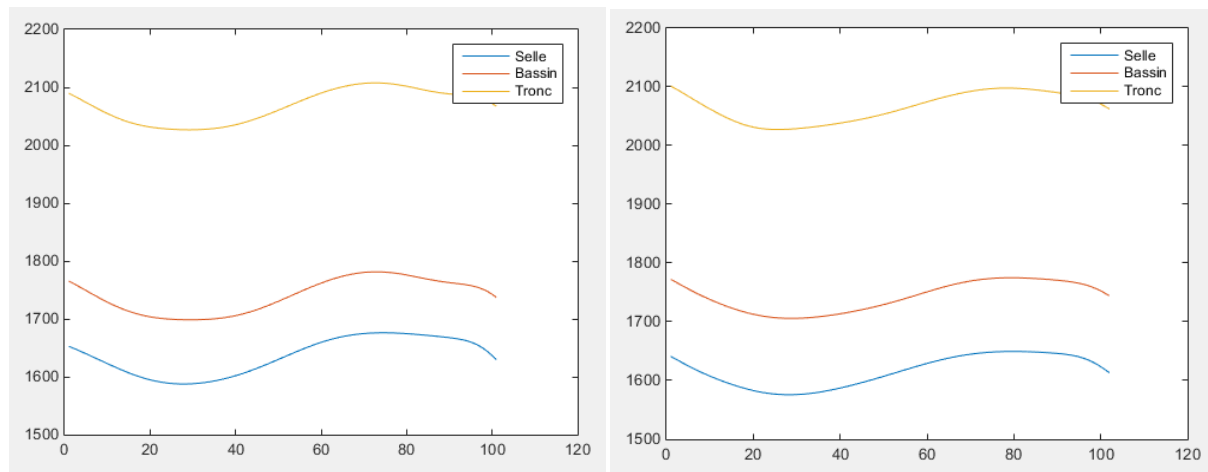


Figure 18: Oscillations verticales du tronc, du bassin et de la selle sur un cycle de trot assis des experts (gauche) et des novices (droite).

La figure 18 présente les oscillations verticales d'un cycle de trot assis pour le groupe de cavaliers experts (gauche) et pour le groupe de cavaliers novices (droite). On observe une différence entre les amplitudes des oscillations verticales du bassin et du tronc par rapport à la selle. On observe également que la différence entre les oscillations verticales de la selle et du bassin est moindre chez les cavaliers experts que chez les cavaliers novices.

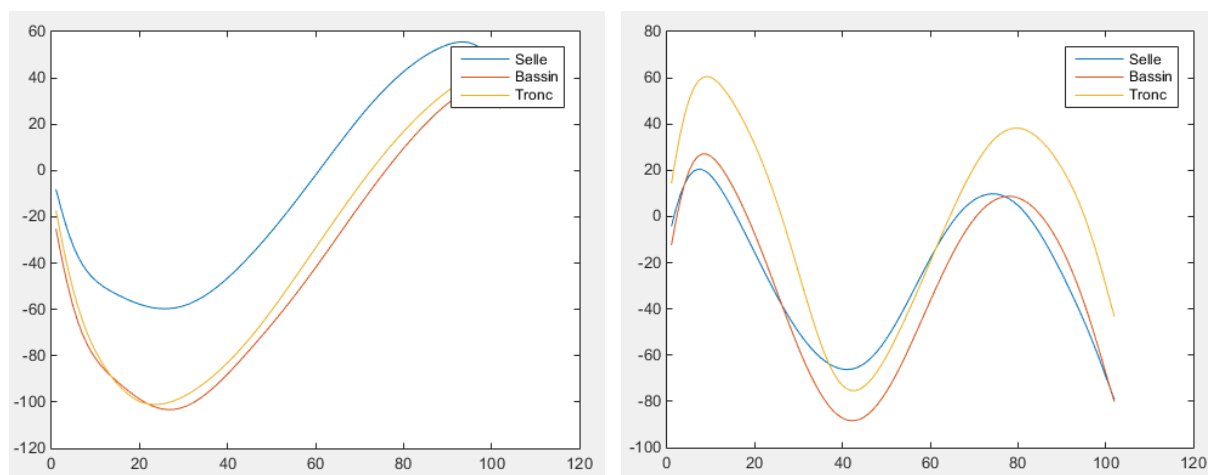


Figure 19: Oscillations verticales normalisées par la moyenne sur un cycle de trot assis des experts (gauche) et des novices (droite).

La figure 19 présente les cycles précédents normalisés par la moyenne de chaque oscillation verticale.

Les oscillations verticales du bassin du cavalier expert sont plus en phase avec les oscillations verticales du cavalier novice. Ces dernières présentent un retard de phase par rapport au mouvement de la selle.

B. Diagrammes position / position

Nous avons tracé les diagrammes position / position de chaque cavalier par exercice, par exemple pour le trot assis (figure 20).

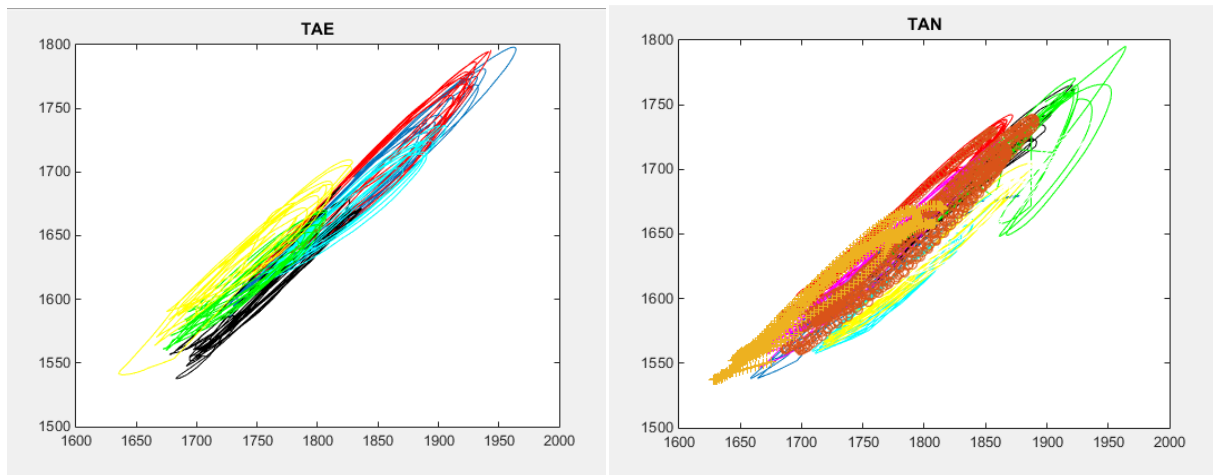


Figure 20 : Diagrammes position / position au trot assis de chaque expert (gauche) et novice (droite).

Les ellipses tracées nous ont permis de calculer les coefficients directeurs et les dispersions autour d'une droite de régression propre à chaque sujet par exercice. Le tableau 5 présente les moyennes des coefficients directeurs individuels par exercice.

COEFFICIENTS DIRECTEURS	EXPERTS	NOVICES	SIGN
Trot Enlevé sur le diagonal droit	0,82 ± 0,13	0,81 ± 0,12	p=0,45
Trot Enlevé sur le diagonal gauche	0,67 ± 0,03	0,68 ± 0,08	p=0,31
Trot Assis	0,83 ± 0,04	0,81 ± 0,04	p=0,21
Transition Trot / Pas	0,91 ± 0,03	0,91 ± 0,03	p=0,49
Transition Pas / Trot	0,87 ± 0,1	0,88 ± 0,05	p=0,44
Epaule en dedans à droite	0,81 ± 0,03	0,81 ± 0,04	p=0,38
Epaule en dedans à gauche	0,85 ± 0,05	0,84 ± 0,03	p=0,48

Tableau 5 : Coefficients directeurs moyens par exercice.

Les différences observées entre les deux populations ne sont pas significatives par exercice.

Le tableau 6 présente les moyennes des dispersions autour de la droite de régression calculée par sujet par exercice.

Les différences observées entre les deux populations ne sont pas significatives par exercice.

<u>DISPERSIONS</u>	EXPERTS	NOVICES	SIGN
Trot Enlevé sur le diagonal droit	42 ± 12	47 ± 16	p=0,28
Trot Enlevé sur le diagonal gauche	37 ± 7	32 ± 11	p=0,13
Trot Assis	15 ± 2	14 ± 6	p=0,26
Transition Trot / Pas	16 ± 4	22 ± 25	p=0,24
Transition Pas / Trot	11 ± 4	12 ± 8	p=0,36
Epaule en dedans à droite	13 ± 3	13 ± 4	p=0,4
Epaule en dedans à gauche	11 ± 2	10 ± 4	p=0,23

Tableau 6 : Dispersions moyennes par exercice.

C. Inclinaison du tronc

Nous avons mesuré l'inclinaison du tronc sur l'axe antéro-postérieur en calculant l'angle du tronc avec l'axe vertical du monde. Cet angle a été calculé par sujet et concaténé par exercice afin d'obtenir moyenne et écart-type par exercice pour chaque population. Le tableau 7 présente les moyennes et écart-types des angles mesurés par exercice.

<u>ANGLE DU TRONC</u>	EXPERTS	NOVICES	SIGN
Trot Enlevé sur le diagonal droit	7,8 ± 4,0	6,7 ± 2,8	p=0,07
Trot Enlevé sur le diagonal gauche	8,3 ± 3,9	8,8 ± 4,6	p=0,29
Trot Assis	5,7 ± 2,3	4,8 ± 2,4	p=0,02*
Transition Trot / Pas	7,0 ± 3,3	6,4 ± 2,6	p=0,15
Transition Pas / Trot	4,9 ± 1,8	5,5 ± 2,7	p=0,07
Epaule en dedans à droite	6,0 ± 2,6	6,5 ± 2,7	p=0,26
Epaule en dedans à gauche	6,3 ± 2,9	6,1 ± 3,4	p=0,42

Tableau 7 : Angles moyens du tronc par exercice.

Dans six exercices sur sept, les différences observées ne sont pas significatives. Dans le cas du trot assis, on constate que l'angle du tronc des cavaliers experts est significativement différent de celui des cavaliers novices ($p < 0.05$, $p = 0.02$).

Nous avons également calculé la variation de l'angle du tronc autour de cet angle moyen mesuré par sujet et par exercice.

Le tableau 8 présente ces variations par exercice par population.

VARIATIONS DE L'ANGLE DU TRONC	EXPERTS	NOVICES	SIGN
Trot Enlevé sur le diagonal droit	7,8 ± 3,3	8,2 ± 3,0	p=0,24
Trot Enlevé sur le diagonal gauche	6,8 ± 3,1	7,6 ± 3,2	p=0,09
Trot Assis	5,8 ± 2,4	5,2 ± 2,7	p=0,08
Transition Trot / Pas	7,0 ± 2,2	7,7 ± 2,6	p=0,04*
Transition Pas / Trot	5,7 ± 2,2	5,5 ± 2,6	p=0,03*
Epaule en dedans à droite	5,5 ± 2,8	6,0 ± 3,0	p=0,22
Epaule en dedans à gauche	6,6 ± 2,4	5,9 ± 2,4	p=0,18

Tableau 8 : Variations moyennes de l'angle du tronc.

Dans cinq exercices sur sept, les différences observées ne sont pas significatives. Dans les cas des transitions trot / pas et pas / trot, les variations angulaires des cavaliers experts sont significativement différentes de celles des cavaliers novices (respectivement $p < 0.05$, $p = 0.04$, $p = 0.03$).

VII. DISCUSSION

L'objectif du projet Caval&Tic est de dimensionner un système de mesure permettant au cavalier de remettre sa performance au centre de son entraînement quotidien ou hebdomadaire. Ce système doit être simple d'utilisation et ne doit pas nécessiter un post-processing chronophage. Par conséquent, il semblerait intéressant de s'orienter vers un système plus proche des centrales inertielles que des systèmes optoélectroniques. Afin d'évaluer le degré de sensibilité et de significativité dont notre système a besoin, nous avons effectué une mesure cinématique complète du mouvement du cavalier sur sept exercices différents (trot enlevé sur les deux diagonaux, trot assis, transition trot / pas et pas / trot, épaule en dedans à gauche et à droite). Cette mesure a été effectuée grâce au système optoélectronique Vicon. En partant du système le plus précis existant, nous sommes capables d'évaluer les degrés de sensibilité et de significativité nécessaires pour notre futur système. De plus, le degré de précision du Vicon était nécessaire pour discriminer nos deux populations assez proches en termes de niveau d'expertise d'un point de vue subjectif.

A. Mouvements du bassin

Les oscillations verticales des mouvements du bassin, du tronc et de la selle ne nous permettent pas statistiquement de conclure à une différence entre nos deux populations. En effet, les diagrammes position / position tracés permettent de calculer le coefficient directeur de la droite de régression associée mais également la dispersion de l'ellipse autour de cette droite. En comparant les deux populations, quel que soit l'exercice, aucune différence significative n'est relevée.

Le coefficient directeur de la droite de régression du groupe expert n'est pas significativement plus grand que celui du groupe novice. Les résultats montrent même une égalité entre les deux valeurs par exercice. Ils tendent à montrer que la coordination entre les oscillations verticales du bassin et les oscillations verticales de la selle est identique chez les experts que chez les novices.

En effet, en tendant vers 1, le coefficient directeur nous indique pour une oscillation verticale de la selle, l'oscillation verticale du bassin du cavalier expert suivra à 80% celle de la selle.

Par conséquent, nous pouvons déduire que le mouvement du bassin du cavalier expert et du cavalier novice observe une amplitude importante sur l'axe vertical avec un suivi accru du mouvement de la selle.

On sait à présent que l'amplitude des mouvements du bassin du cavalier ne nous permet pas de différencier les deux populations. Nos résultats ne sont pas en adéquation avec ceux présentés dans la littérature scientifique. Ces divergences sont liées aux différences entre les populations choisies par les études précédentes et celles de notre étude qui sont assez proches en termes de niveau.

Le mouvement du bassin reste néanmoins intéressant à étudier du point de la littérature (Münz et coll. 2012, Münz et coll. 2013, Eckardt et coll. 2014). Une variable de ce mouvement qui reste à étudier est la translation du bassin sur l'axe antéro-postérieur.

B. Inclinaison du tronc

L'inclinaison du tronc par rapport à la verticale ne montre pas de différences significatives entre nos deux populations. Tout comme pour les mouvements du bassin, l'inadéquation entre nos résultats et ceux de la littérature peut être associée à notre choix de populations.

Peham et coll. (2001) mesure également l'inclinaison du tronc mais par rapport au dos du cheval et trace les plans de phase de vitesse angulaire par rapport à l'angle et de l'accélération angulaire par rapport à la vitesse angulaire. Cette mesure montre des différences significatives entre deux populations (experts et débutants), populations différentes des nôtres. Néanmoins, cette piste est à explorer en utilisant les calculs matriciels. Les matrices de rotation, du tronc vers le bassin et du bassin vers la selle calculées, pour nos deux populations nous renseigneraient sur la stabilité du tronc du cavalier.

Le tableau 8 résume les variations d'inclinaison du tronc par rapport à la verticale en fonction de l'exercice. Le calcul de l'angle entre l'axe vertical attaché au repère du tronc et celui attaché au repère du monde permet d'obtenir à chaque instant d'un cycle puis d'un essai puis d'un sujet puis de tous les sujets d'un groupe par exercice l'inclinaison du tronc vers l'avant.

Les variations sont ensuite calculées grâce à la différence entre l'angle maximum et minimum pour tous les sujets sur un type d'exercice. Les variations mesurées sont significativement inférieures pour le groupe de cavaliers experts pour tous les types d'exercices. En effet, l'angle mesuré est identique chez le cavalier novice. Cette différence permettrait d'établir une fourchette d'angle pour laquelle le pratiquant est considéré comme un sujet expert ou non. Elle permettrait également de conclure que la réduction de la variation de cet angle est synonyme d'augmentation du niveau d'expertise du pratiquant. Plus le niveau augmente, plus la stabilisation du tronc est accrue, tout exercice confondu.

C. Limites

Nos résultats ne permettent pas de discriminer de deux populations assez proches en termes de niveau. Cependant, lors de nos expérimentations et de l'établissement du protocole, un des biais majeurs partiellement éliminé est le biais « cheval ». En effet, d'après les professionnels de la discipline, le comportement du cheval et le comportement du cavalier sont interdépendants. L'un module le comportement de l'autre et réciproquement. Ce biais a été partiellement compensé par la composition de binôme qui effectuait les exercices avec le même cheval. Ce binôme, constitué d'un cavalier expert et d'un cavalier novice, permet une comparaison singulière des critères de performance sélectionnés précédemment.

Par conséquent, les résultats présentés ne sont pas significatifs en n'excluant pas le fait que les chevaux auraient pu adopter des comportements différents avec un autre cavalier.

Ce biais « cheval » a été partiellement compensé par l'établissement de binôme expert / novice. Ce binôme est lui aussi partiellement représentatif de la population cavalière. En effet, nos deux populations sont différenciées seulement par leur nombre d'années durant lesquelles ils ont pratiqué l'équitation au Cadre de Noir de Saumur. Les experts étaient des instructeurs avec un passif équestre de vingt ans ou plus, au Cadre Noir, quand les novices étaient des entrants dans cette même école. Malgré tout, ces cavaliers novices avaient un passif équestre proche d'une quinzaine d'année. Les tests d'entrée dans cette école d'équitation étant assez sélectifs, nous pouvons affirmer que les entrants ne sont pas des cavaliers réellement novices.

La deuxième limite de notre étude est la différence de niveau entre les deux populations. Cette faible différence de niveau entre nos deux populations présentait l'avantage de dire qu'une différence significative observée serait d'autant plus significative si on la mesurait entre deux publics clairement distincts. Elle présentait aussi le risque de ne montrer qu'une tendance à la discrimination, ou ne rien montrer.

Que ce soit pour le coefficient directeur ou la dispersion, nos valeurs mesurées sont en inadéquation avec celles de la littérature. Ce biais est à mettre au regard des populations choisies. En effet, dans la littérature, les populations expertes sont identiques à la nôtre mais les populations novices, pratiquant l'équitation une fois par semaine depuis seulement un à deux ans, ne présentent pas les mêmes atouts que la nôtre, pratiquant l'équitation trois fois par semaine depuis une dizaine d'années. De plus, pour l'angle du tronc, ce biais semble aussi limiter la différenciation possible par un calcul entre le tronc et la verticale et non entre le tronc et le dos du cheval.

VIII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les conclusions de cette étude cinématique partielle du cavalier nous permettent d'avancer sur la définition des critères de performance globaux et sur leur utilité dans la différenciation du niveau d'expertise. En effet, nous avons constaté que les critères de performance identifiés par la littérature ne pouvaient être utilisables que sur des populations présentant des différences de niveau importantes. Notre étude permet de montrer qu'avec deux populations proches en termes de niveau, il semblait difficile d'utiliser des variables associées à ces critères. En effet, il ne semble pas judicieux d'utiliser la translation verticale du bassin du cavalier au regard de celle de la selle. Il se pourrait que l'utilisation de la translation antéro-postérieure du bassin par rapport à celle de la selle serait plus judicieuse d'après l'avis des experts de la discipline. De plus, nos résultats ne montrent pas de différences significatives quant à l'angle du tronc avec la verticale entre nos deux populations proches du même niveau d'expertise.

Néanmoins, malgré l'absence de significativité, ces critères de performance laissent à penser que des variables associées pourraient être exploitables. Dans un premier temps, la normalisation des diagrammes position / position par rapport pourrait être un enjeu intéressant pour comparer les sujets entre eux indépendamment de leur affectation à une population. Dans un second temps, pour aller dans le même sens que Peham et coll. (2001), les matrices de rotation que nous avons calculées nous permettraient de calculer l'angle du tronc par rapport au dos du cheval tout en reprenant les plans de phase de cet auteur avec des populations plus proches en termes de niveau d'expertise. Dans un troisième temps, Alexander et coll. (2014) nous présentaient le phénomène d'asymétrie posturale compensée par un strapping. L'asymétrie de rotation externe de hanche pourrait être présentée comme un paramètre pertinent pour la différenciation des niveaux d'après Gandy et coll. (2014). Enfin, l'objectif du projet Caval&Tic étant de rendre un feedback temps réel au pratiquant et à son entraîneur, il serait fortement envisageable d'effectuer des comparaisons métriques afin d'atteindre cet objectif.

IX. BIBLIOGRAPHIE

- Alexander, Jill, Sarah-Jane Hobbs, Karen May, Alison Northrop, Charlotte Brigden, et James Selfe. « Postural Characteristics of Female Dressage Riders Using 3D Motion Analysis and the Effects of an Athletic Taping Technique: A Randomised Control Trial ». *Physical Therapy in Sport* 16, n° 2 (mai 2015): 154-61. doi:10.1016/j.ptsp.2014.09.005.
- Byström, A., M. Rhodin, K. Peinen, M. A. Weishaupt, et L. Roepstorff. « Basic Kinematics of the Saddle and Rider in High-Level Dressage Horses Trotting on a Treadmill ». *Equine Veterinary Journal* 41, n° 3 (mars 2009): 280-84. doi:10.2746/042516409X394454.
- Byström, A., L. Roepstorff, K. Geser-von Peinen, M.A. Weishaupt, et M. Rhodin. « Differences in Rider Movement Pattern between Different Degrees of Collection at the Trot in High-Level Dressage Horses Ridden on a Treadmill ». *Human Movement Science* 41 (juin 2015): 1-8. doi:10.1016/j.humov.2015.01.016.
- Cocq, P. de, M. Muller, H. M. Clayton, et J. L. van Leeuwen. « Modelling Biomechanical Requirements of a Rider for Different Horse-Riding Techniques at Trot ». *Journal of Experimental Biology* 216, n° 10 (15 mai 2013): 1850-61. doi:10.1242/jeb.070938.
- Cocq, Patricia de, Anne Mariken Duncker, Hilary M. Clayton, Maarten F. Bobbert, Mees Muller, et Johan L. van Leeuwen. « Vertical Forces on the Horse's Back in Sitting and Rising Trot ». *Journal of Biomechanics* 43, n° 4 (mars 2010): 627-31. doi:10.1016/j.jbiomech.2009.10.036.
- Douglas, J.-L., M. Price, et D.M. Peters. « A Systematic Review of Physical Fitness, Physiological Demands and Biomechanical Performance in Equestrian Athletes ». *Comparative Exercise Physiology* 8, n° 1 (janvier 2012): 53-62. doi:10.3920/CEP12003.
- Eckardt, Falko, Andreas Münz, et Kerstin Witte. « Application of a Full Body Inertial Measurement System in Dressage Riding ». *Journal of Equine Veterinary Science* 34, n° 11-12 (novembre 2014): 1294-99. doi:10.1016/j.jevs.2014.09.009.
- Gandy, Elizabeth A., Anne Bondi, Robert Hogg, et Timothy M. C. Pigott. « A Preliminary Investigation of the Use of Inertial Sensing Technology for the Measurement of Hip Rotation Asymmetry in Horse Riders ». *Sports Technology* 7, n° 1-2 (3 avril 2014): 79-88. doi:10.1080/19346182.2014.905949.
- Greve, Line, et Sue Dyson. « The Horse–saddle–rider Interaction ». *The Veterinary Journal* 195, n° 3 (mars 2013): 275-81. doi:10.1016/j.tvjl.2012.10.020.

- Kang, Ok-Deuk, Youn-Chul Ryu, Che-Cheong Ryew, Woon-Yong Oh, Chong-Eon Lee, et Min-Soo Kang. « Comparative Analyses of Rider Position according to Skill Levels during Walk and Trot in Jeju Horse ». *Human Movement Science* 29, n° 6 (décembre 2010): 956-63. doi:10.1016/j.humov.2010.05.010.
- Lagarde, J., J. a. S. Kelso, C. Peham, et T. Licka. « Coordination Dynamics of the Horse-Rider System ». *Journal of Motor Behavior* 37, n° 6 (novembre 2005): 418-24. doi:10.3200/JMBR.37.6.418-424.
- Marchand, A., et E. Dulos. « Kinetics of a Bacterial Culture Growth: Validity of the Affinity Rule in Biological Systems ». *Applied Microbiology* 30, n° 6 (décembre 1975): 994-1002.
- Münz, Andreas, Falko Eckardt, Christine Heipertz-Hengst, Christian Peham, et Kerstin Witte. « A Preliminary Study of an Inertial Sensor-Based Method for the Assessment of Human Pelvis Kinematics in Dressage Riding ». *Journal of Equine Veterinary Science* 33, n° 11 (novembre 2013): 950-55. doi:10.1016/j.jevs.2013.02.002.
- Münz, Andreas, Falko Eckardt, et Kerstin Witte. « Horse–rider Interaction in Dressage Riding ». *Human Movement Science* 33 (février 2014): 227-37. doi:10.1016/j.humov.2013.09.003.
- Peham, C., A.B. Kotschwar, B. Borckenhagen, S. Kuhnke, J. Molsner, et A. Baltacis. « A Comparison of Forces Acting on the Horse’s Back and the Stability of the Rider’s Seat in Different Positions at the Trot ». *The Veterinary Journal* 184, n° 1 (avril 2010): 56-59. doi:10.1016/j.tvjl.2009.04.007.
- Peham, C., T. Licka, M. Kapaun, et M. Scheidl. « A New Method to Quantify Harmony of the Horse-Rider System in Dressage ». *Sports Engineering* 4, n° 2 (mai 2001): 95-101. doi:10.1046/j.1460-2687.2001.00077.x.
- Peham, C., T. Licka, H. Schobesberger, et E. Meschan. « Influence of the Rider on the Variability of the Equine Gait ». *Human Movement Science* 23, n° 5 (novembre 2004): 663-71. doi:10.1016/j.humov.2004.10.006.
- Quinn, S., et S. Bird. « Influence of Saddle Type upon the Incidence of Lower Back Pain in Equestrian Riders ». *British Journal of Sports Medicine* 30, n° 2 (juin 1996): 140-44.
- Richards, James G. « The Measurement of Human Motion: A Comparison of Commercially Available Systems ». *Human Movement Science* 18, n° 5 (octobre 1999): 589-602. doi:10.1016/S0167-9457(99)00023-8.
- Schils, Sheila J., Nancy L. Greer, Lela J. Stoner, et Calvin N. Kobluk. « Kinematic Analysis of the Equestrian — Walk, Posting Trot and Sitting Trot ». *Human Movement Science* 12, n° 6 (décembre 1993): 693-712. doi:10.1016/0167-9457(93)90011-D.

- Wolframm, Inga A., Jurjen Bosga, et Ruud G.J. Meulenbroek. « Coordination Dynamics in Horse-Rider Dyads ». *Human Movement Science* 32, n° 1 (février 2013): 157-70. doi:10.1016/j.humov.2012.11.002.
- Wu, Ge, Frans C.T. van der Helm, H.E.J. (DirkJan) Veeger, Mohsen Makhsous, Peter Van Roy, Carolyn Anglin, Jochem Nagels, et al. « ISB Recommendation on Definitions of Joint Coordinate Systems of Various Joints for the Reporting of Human Joint motion—Part II: Shoulder, Elbow, Wrist and Hand ». *Journal of Biomechanics* 38, n° 5 (mai 2005): 981-92. doi:10.1016/j.jbiomech.2004.05.042.
- Wu, Ge, Sorin Siegler, Paul Allard, Chris Kirtley, Alberto Leardini, Dieter Rosenbaum, Mike Whittle, et al. « ISB Recommendation on Definitions of Joint Coordinate System of Various Joints for the Reporting of Human Joint Motion--Part I: Ankle, Hip, and Spine. International Society of Biomechanics ». *Journal of Biomechanics* 35, n° 4 (avril 2002): 543-48.

X. RESUMES

RÉSUMÉ:

La représentation de la pratique de l'équitation est souvent différente de la pratique réelle. Afin de remettre la performance au centre de la pratique, la nouvelle technologie nous permet de retourner un feedback temps réel au cavalier et à l'entraîneur. Nous devons pour cela dimensionner un système de mesure capable d'analyser la posture du cavalier en temps réel en fonction de l'exercice. La littérature scientifique a identifié la région pelvienne (Münz et coll. 2013, 2013 ; Eckardt et coll. 2014) et la région thoraco-lombaire (Shils et coll. 1993 ; Kang et coll. 2010 ; Byström et coll. 2015) comme des critères de performance. Une analyse cinématique partielle de deux populations de pratiquants de niveaux proches a été mise en place sur 7 types d'exercices (trot enlevé à droite/gauche, trot assis, transition trot/pas, pas/trot, épaule en dedans à gauche/droite). Aucun résultat significatif du mouvement vertical du bassin n'a été trouvé. La différence d'angulation du tronc avec la verticale est significative pour l'exercice du trot assis ($p=0.02$) mais non significative pour les autres exercices. Les variations de cet angle sont significatives pour les exercices des transitions trot/pas et pas/trot (respectivement $p=0.04$, $p=0.03$). La faible différence de niveau de nos deux populations ainsi que le « biais cheval » sont deux limites à notre étude. Les rotations inter-segmentaires et les oscillations antéro-postérieures du bassin sont deux pistes d'exploration.

ABSTRACT:

People's representation of horse-riding is often far from real discipline exigencies. In order to better understand performance, new technologies allow us to give real-time feedbacks to both rider and coach. To do so, we need to build a measuring system which can analyze rider's posture in real time, according to the specific exercise (rising trot, sitting trot, etc.). The pelvic region (Münz et al., 2013, 2013, Eckardt et al., 2014) and the thoracolumbar region (Shils et al., 1993, Kang et al 2010, Byström et al. 2015) has been identified as factors of performance. Kinematic analysis of riders (two different levels of practice) was carried out on 7 different exercises (rising trot on the right/left, sitting trot, transition trot/walk, walk/trot, shoulder inwards to the left/right). No significant result was found on vertical movements of the pelvis. Significant difference in the antero-posterior angle of the trunk with the vertical axe was found for the sitting trot ($p=0.02$) but was not significant for the other exercises. Variations of this angle were significant for trot/walk and walk/trot transitions (respectively $p=0.04$, $p=0.03$). The small difference in our population level, as well as the "horse bias", are the major limits of our study. Further work may focus on the inter-segmental rotations and the antero-posterior oscillations of the pelvis.

XI. ANNEXES

```
function [peak,value]=peakFinder(a)

peak=[];
value=[];

[b,c]=butter(2,(.5*20/120)); % estimation des coefficients pour le lissage
af=filtfilt(b,c,a); % filtrage de la courbe de Horse_LEG

vmin=min(af(:,end)); % détermination du min et max de la courbe
vmax=max(af(:,end));

for i=2:(size(af,1)-1); % pour les lignes entre 2 et size-1
    if af(i)<(vmin*1.1) || af(i)>(vmax*0.9) % majoration du min de 10% ou minoration du max de 10%
        if (af(i-1,3)-af(i,3))*(af(i,3)-af(i+1,3))<0; % produit des deux vecteurs adjacents inférieur à 0
            peak=[peak;i]; % le numéro de la ligne
        end
    end
end

for i=size(peak,1):-1:1;
    value=[a(peak(i,1),end);value]; % la valeur correspondante
end

end
```

Figure 21: Code sous matlab pour trouver les pics verticaux de l'antérieur gauche du cheval.

```
function [pdebut,pfin] = cycle (a,peak,value)

if value(1,1) > mean(a(:,end)); % si la valeur du pic est > à la moyenne
    debut(1,1) = 2; % on commence au pic 2
else
    debut(1,1) = 1; % sinon on commence au pic 1
end

n = length(peak) - debut(1,1);
ncycle = floor(n/2); % nombre de cycle équivalent au nombre de pic divisé par deux et dont on prend l'entier inférieur

for i = 1:ncycle;
    pdebut(i) = peak(debut(1,1)+2*(i-1)); % indice du début du cycle
    pfin(i) = peak(debut(1,1)+2*i); % indice du fin de cycle
end

end
```

Figure 22: Code sous matlab pour définir les cycles de chaque exercice.

```
function e = ellipse (x,y,n)

p = polyfit (x,y,n);
a = p(1,1);

for i = 1:size(x,1);
    A (i,:) = abs((p(1,1)*x(i) + p(1,2) - (y(i,end)))));
    sd = (sum (A)) / size(x,1);
    SD = 2*sd;
end

e = [a,SD];

end
```

Figure 23: Code sous matlab pour définir les coefficients directeurs et dispersions autour des droites de régression.

Les diagrammes position / position représentent les tracés des oscillations verticales de la selle en fonction de celles du bassin.

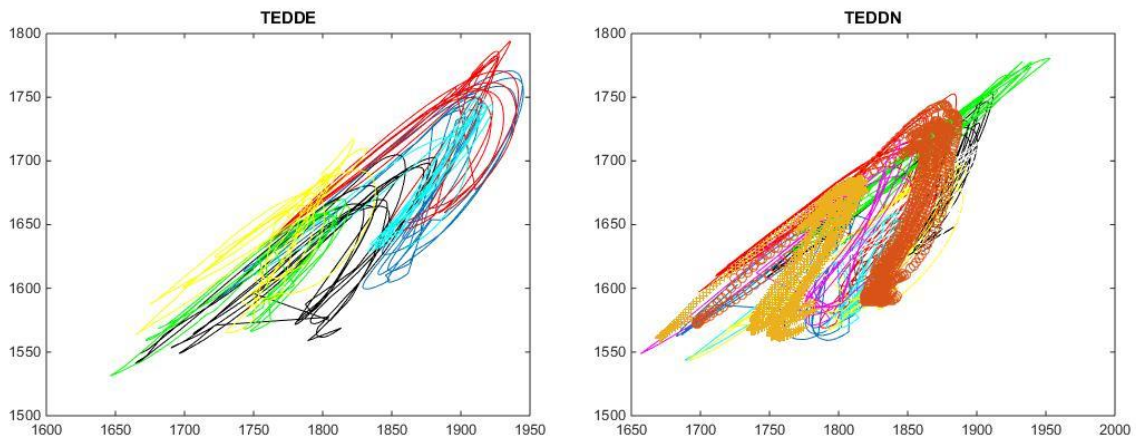


Figure 25: Diagramme position / position du trot enlevé sur le diagonal droit des experts (gauche) et novices (droite).

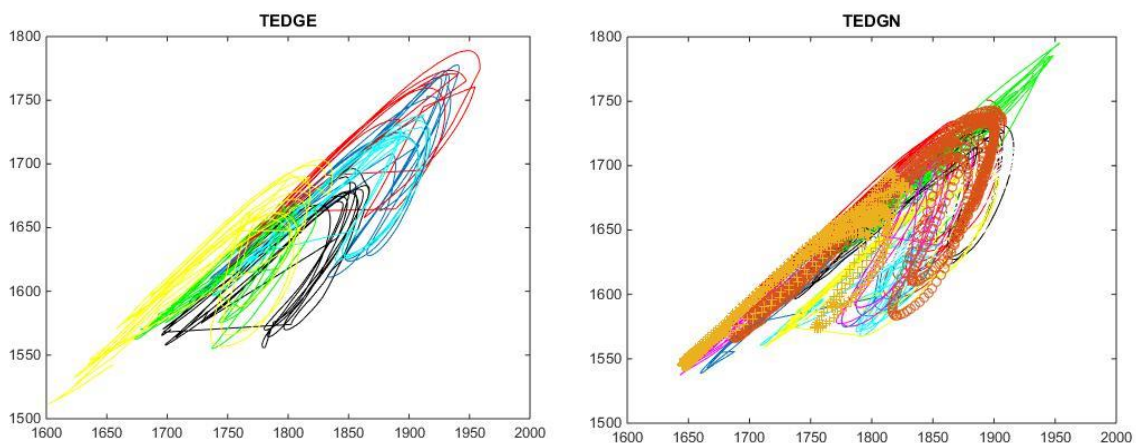


Figure 24: Diagramme position / position du trot enlevé sur le diagonal gauche des experts (gauche) et novices (droite).

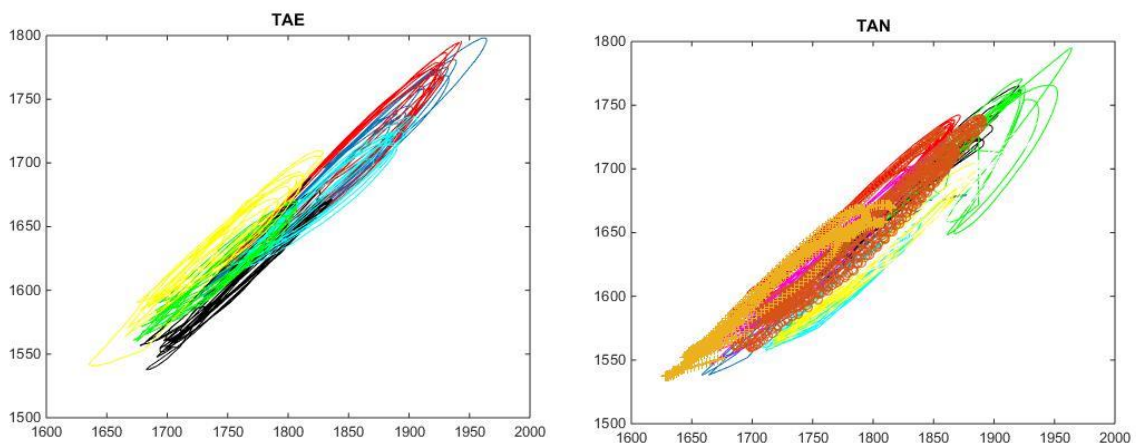


Figure 26: Diagramme position / position du trot assis des experts (gauche) et novices (droite).

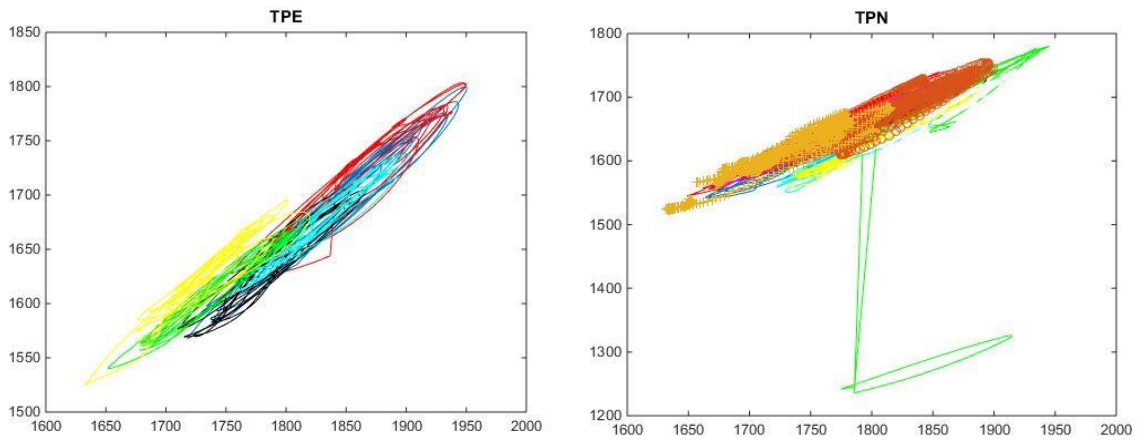


Figure 28: Diagramme position / position de la transition trot/pas des experts (gauche) et novices (droite).

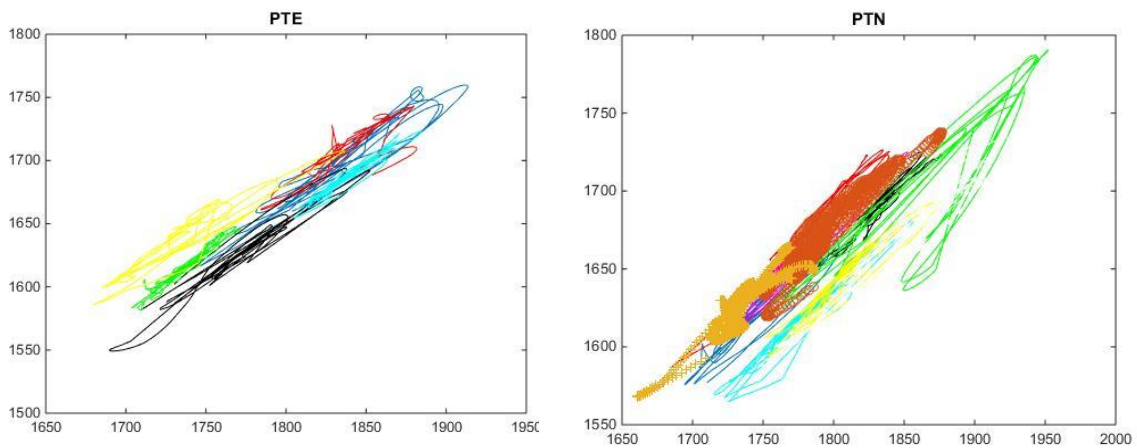


Figure 27: Diagramme position / position de la transition pas/trot des experts (gauche) et novices (droite).

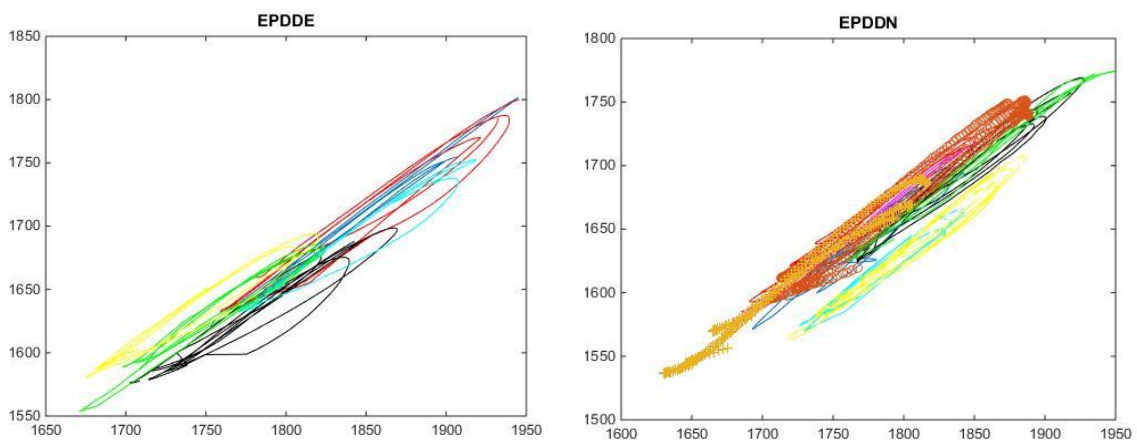


Figure 29: Diagramme position / position de l'épaule en dedans à droite des experts (gauche) et novices (droite).

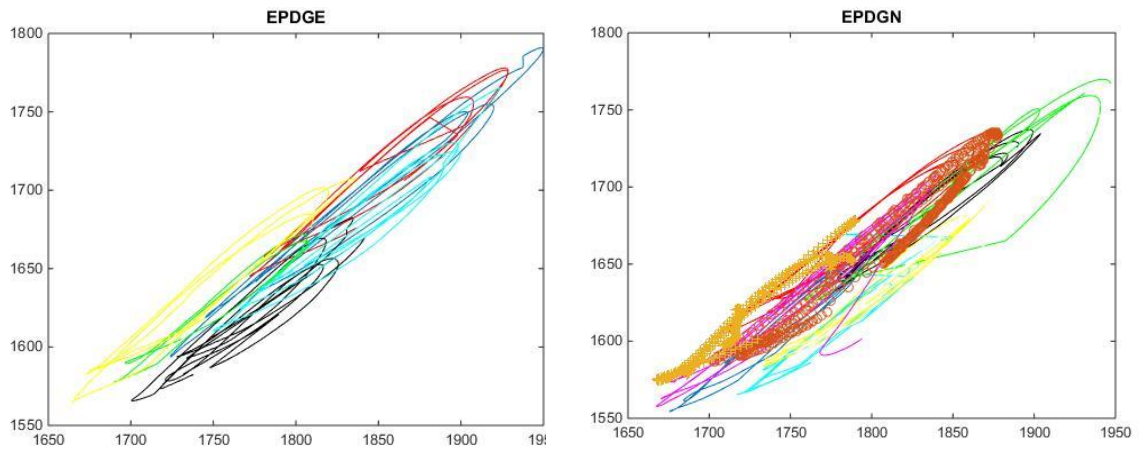


Figure 30: Diagramme position / position de l'épaule en dedans à gauche des experts (gauche) et novices (droite).